

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЄШКОВ

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Проектування системи електропостачання рудозбагачувальної фабрики»

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ЕЕ-22мб,
ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Костянтин ЛЮБЧЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук

_____ Наталія ГАРАСЬОВА

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛЄШКОВ

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Любченка Костянтина Миколайовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання рудозбагачувальної фабрики

Design of the power supply system of an ore processing plant

2. Керівник роботи Гарасьова Наталія Юріївна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 03.06.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи розрахунок електричних навантажень; побудова графіків та картограми електричних навантажень; вибір напруги і електричних схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання; розрахунок режимів реактивної потужності; вибір трансформаторів; розрахунок струмів коротких замикань, вибір обладнання та силових мереж; розрахунок спеціального розділу кваліфікаційної роботи

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

| Розділ | Консультант | Підпис, дата | |
|---------------------------|------------------------------|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| <i>Спеціальний розділ</i> | <i>доцент Н.Ю. Гарасьова</i> | | |
| | | | |
| | | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1 | <i>Вступ. Коротка характеристика комплексу</i> | <i>03.02-07.02</i> | |
| 2 | <i>Розрахунок електричних навантажень</i> | <i>13.04-23.04</i> | |
| 3 | <i>Побудова графіків електричних навантажень</i> | <i>24.04-26.04</i> | |
| 4 | <i>Побудова картограми електричних навантажень</i> | <i>27.04-01.05</i> | |
| 5 | <i>Вибір напруги і електричних схем</i> | <i>02.05-5.05</i> | |
| 6 | <i>Режими реактивної потужності</i> | <i>6.05-9.05</i> | |
| 7 | <i>Вибір трансформаторів</i> | <i>10.05-13.05</i> | |
| 8 | <i>Розрахунок струмів КЗ, вибір обладнання та силових мереж системи електропостачання</i> | <i>14.05-17.05</i> | |
| 9 | <i>Спеціальний розділ</i> | <i>18.05-28.05</i> | |
| 10 | <i>Оформлення презентаційної частини КР</i> | <i>29.05-30.05</i> | |
| 11 | <i>Оформлення пояснювальної записки КР</i> | <i>01.06-03.06</i> | |
| | | | |
| | | | |

Дата видачі завдання
« 03 » лютого 2025 р.

Підпис керівника _____

Наталія ГАРАСЬОВА

Завдання прийнято до виконання
« 03 » лютого 2025 р.

Підпис здобувача _____

Костянтин ЛЮБЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 75 с. основної частини; 13 рис.; 19 табл.; 15 джерел, 1 додаток

Любченко К. М. Проектування системи електропостачання рудозбагачувальної фабрики. – Рукопис.

Бакалаврська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025 рік.

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне проектування системи електропостачання рудозбагачувальної фабрики з урахуванням специфіки технологічного процесу, структури енергоспоживання та вимог надійності. На основі аналізу освітлювальних, силових електричних навантажень у мережах до та понад 1000 В побудовано графіки навантаження та сформовано картограми розподілу потужності для оптимального вибору місця розташування головної та цехових трансформаторних підстанцій.

Розглянуто різні варіанти схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання фабрики. З метою зниження втрат електроенергії проаналізовано баланс реактивної потужності та виконано техніко-економічний вибір компенсуючих пристроїв. Проведено розрахунок струмів коротких замикань, здійснено вибір кабельних ліній, високовольтного обладнання, трансформаторів струму та напруги.

Окрема увага приділена захисту високовольтних синхронних двигунів компресорної станції. Визначено основні види пошкоджень, розроблено диференційні та струмові захисти, наведено приклади розрахунку налаштувань реле для захисту двигунів напругою 10 кВ.

Результати роботи підтверджують ефективність запропонованих технічних рішень у підвищенні енергоефективності та надійності електропостачання технологічного комплексу рудозбагачувального підприємства.

Ключові слова: система електропостачання, силові та освітлювальні навантаження, реактивна потужність, струми КЗ, високовольтні синхронні двигуни, релейний захист.

ABSTRACT

Qualification work: 75 p. main part; Fig. 13; 19 tables; 15 sources, 1 applications

Lyubchenko K. M. Design of the power supply system of an ore processing plant. – Manuscript.

Bachelor's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

The qualification work included a comprehensive design of the power supply system of the ore processing plant, taking into account the specifics of the technological process, the structure of energy consumption, and reliability requirements. Based on the analysis of lighting and power electrical loads in networks up to and above 1000 V, load schedules were constructed and power distribution cartograms were formed for the optimal selection of the location of the main and shop transformer substations.

Various options for external and internal power supply schemes of the factory were considered. In order to reduce electricity losses, the reactive power balance was analyzed and a technical and economic selection of compensating devices was made. Short-circuit currents were calculated, and cable lines, high-voltage equipment, current and voltage transformers were selected.

Special attention is paid to the protection of high-voltage synchronous motors of a compressor station. The main types of damage are determined, differential and current protections are developed, and examples of calculating relay settings for protecting 10 kV motors are given.

The results of the work confirm the effectiveness of the proposed technical solutions in increasing energy efficiency and reliability of power supply of the technological complex of the ore processing enterprise.

Keywords: power supply system, power and lighting loads, reactive power, short circuit currents, high-voltage synchronous motors, relay protection.

З М І С Т

| | | |
|---|--|----|
| | ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 8 |
| | ВСТУП. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЗФ ТА ВИХІДНІ ДАННІ ДО ПРОЕКТУВАННЯ..... | 9 |
| 1 | ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РУДОЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ..... | 11 |
| | 1.1 Силові електричні навантаження рудозбагачувальної фабрики в електричних мережах до 1000 В..... | 11 |
| | 1.2 Освітлювальні навантаження РЗ фабрики..... | 13 |
| | 1.3 Силові електричні навантаження рудозбагачувальної фабрики в електричних мережах вище 1000 В..... | 14 |
| | 1.4 Побудова графіків електричних навантажень РЗФ..... | 16 |
| 2 | ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ РЗФ ТА ВИБІР МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ГЗП | 24 |
| 3 | ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ВИБІР СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РЗФ..... | 26 |
| 4 | КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РУДОЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ.. | 33 |
| | 4.1 Баланс реактивної потужності рудозбагачувальної фабрики та вибір пристроїв компенсації..... | 33 |
| | 4.2 Вибір потужності, кількості та місця розташування компенсуючих пристроїв рудозбагачувальної фабрики | 36 |
| 5 | ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ РЗФ | 38 |
| | 5.1 Вибір кількості, потужності та місця розташування трансформаторів ГЗП і цехових підстанцій РЗ фабрики..... | 38 |
| | 5.2 Компоновка та місце розташування цехових ТП РЗ фабрики..... | 41 |

| | | | | | | | | |
|----------|------|--------------|---------|------|---|--------|-------|---------|
| | | | | | КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | |
| Розроб. | | Любченко К. | | | Проектування системи електропостачання рудозбагачувальної фабрики | Літера | Аркуш | Аркушів |
| Перевір. | | Гарасьова Н. | | | | Д | 6 | 79 |
| Н.контр. | | | | | ЦНТУ гр. ЕЕ-22мб | | | |
| Затв. | | Плешков П. | | | | | | |

| | | |
|-----|--|----|
| 6 | РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КЗ В МЕРЕЖІ РЗФ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ І ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ..... | 43 |
| 6.1 | Розрахунок струмів короткого замикання в мережі РЗФ..... | 43 |
| 6.2 | Вибір кабелів високовольтної мережі фабрики..... | 48 |
| 6.3 | Вибір високовольтного обладнання РЗФ..... | 50 |
| 7 | АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНЬ ТА ЗАХИСТУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ..... | 53 |
| 7.1 | Особливості застосування високовольтних синхронних двигунів на компресорних станціях..... | 53 |
| 7.2 | Основні види пошкоджень високовольтних СД..... | 54 |
| 7.3 | Виконання релейного захисту високовольтних синхронних двигунів..... | 59 |
| 7.4 | Захист від багатofазних замикань в обмотці статора..... | 61 |
| 7.5 | Розрахунок захисту синхронного двигуна компресорної станції напругою 10 кВ..... | 67 |
| | ВИСНОВКИ..... | 72 |
| | ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... | 74 |
| | Додаток А. Вибір високовольтного обладнання напругою 35 кВ та 10 кВ рудозбагачувальної фабрики..... | 76 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РЗФ – рудозбагачувальна фабрика

ЦКС – центральна компресорна станція

КТП – комплектна трансформаторна підстанція

ТЕП – техніко-економічні показники

СЕП – система електропостачання

ЛЕП – лінія електропередач

ГЕН – графік електричних навантажень

КЛ – кабельна лінія

ГЗП – головна знижувальна підстанція

КРП – компенсація реактивної потужності

БСК – батареї статичних конденсаторів

КЕН – картограма електричних навантажень

ЦЕН - центр електричних навантажень

РП – розподільчий пристрій

КЗ – коротке замикання

ТС – трансформатори струму

ТН – трансформатори напруги

ТМГ – трансформатор трифазний з масляним охолодженням, герметичний

ВСД – високовольтний синхронний двигун

ПУЕ – правила улаштування електроустановок

РТ – реле тока

ОС – обмотка статора

АР – асинхронний режим

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 8 |

ВСТУП. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЗФ ТА ВИХІДНІ ДАННІ ДО ПРОЕКТУВАННЯ

Основне призначення фабрики - це виробництво залізорудного концентрату як сировини для металургійного переділу.

У технологічному процесі рудозбагачувальної фабрики особливу увагу приділяють стадії подрібнення, яка є ключовою для ефективного вилучення заліза з руди. Фабрика складається з восьми секцій, кожна з яких забезпечує три стадії подрібнення та п'ять стадій збагачення, що дозволяє досягати високої продуктивності, яка складає 220 т/год по руді та 88 т/год по концентрату.

Технологічний процес подрібнення включає стадії дроблення, першу та другу стадії подрібнення. Дроблення виконується в одну стадію до крупності 300 - 0 мм, де 70% руди надходить з кар'єру, а 30% - з корпусу дроблення. Перша стадія подрібнення здійснюється в млинах самоподрібнення МБ-70-23, які працюють у замкнутому циклі з класифікаторами, досягаючи крупності 75–80% класу. У другій стадії подрібнення використовуються рудно-галечні млини, що працюють у замкнутому циклі з гідроциклонами, досягаючи крупності 95–98% класу.

Безшарове подрібнення застосовується для тонковкраплених кварцитів, що забезпечує ефективне вивільнення заліза. Оптимальні параметри роботи млинів, такі як ступінь заповнення барабана рудою (38–40%) та густина зливу (70–75% твердого), критично впливають на продуктивність. Питомі продуктивності млинів самоподрібнення та рудно-галечних по класу -0,074 мм становлять відповідно 0,9 і 0,3 т/год·м³.

Після подрібнення матеріал піддається магнітній сепарації, де використовуються магнітні сепаратори з протиточними (I стадія) та напівпротиточними ваннами (II–V стадії). Процес включає перечищення магнітного продукту та знешламлення матеріалу перед магнітною сепарацією та фільтрацією. Це дозволяє отримувати концентрат із вмістом заліза 64,4% та магнітного заліза 71%. Спрощену технологічну схему дробильно-збагачувального виробництва приведено на рис 1. Таким чином, стадія подрібнення є основною в

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 9 |

технологічному процесі рудозбагачення, оскільки забезпечує необхідну крупність матеріалу для ефективного подальшого збагачення та досягнення високоякісного кінцевого продукту.



Рис.1 - Спрощена технологічна схема дробильно-збагачувального виробництва

В роботі виконано проектування системи електропостачання рудо-збагачувальної фабрики з урахуванням особливостей її технологічного електрообладнання. До основного електротехнічного устаткування фабрики належать магнітні сепаратори, вакуум-фільтри, насосні установки, конвеєри та інші механізми, які забезпечують безперервність технологічного процесу.

Окрім основного обладнання, для повноцінної роботи фабрики передбачено підрозділи допоміжного призначення: компресорне відділення, надземні транспортні галереї, лабораторії тощо. Детальний розподіл електричних навантажень за структурними підрозділами подано у таблиці 1.

Таблиця 1 - Електричні навантаження по підрозділам підприємства.

| № | Найменування підрозділів | Площа цеха, м ² | Кількість ЕП | Одного | Сумарна |
|---|--------------------------|----------------------------|--------------|-----------|---------|
| 1 | ЗФ 1 стадії | 1060 | 61 | 3,75-75 | 999 |
| 2 | ЗФ 2 стадії | 2170 | 88 | 3-110 | 2619 |
| 3 | АПК | 510 | 33 | 0,25-41,5 | 372,2 |
| 4 | Столова | 320 | 35 | 0,4-40 | 318,5 |
| 5 | Котельна | 350 | 12 | 4,5-75 | 426 |
| 6 | ЦКС | 820 | 27 | 0,08-55 | 560,1 |
| 7 | Надземні галереї 1-2 | 720 | 16 | 3,75-7,5 | 98,2 |

Серед високовольтного технологічного обладнання особливе місце займають синхронні двигуни компресорної станції та асинхронні двигуни, що приводять у дію дробарки, млини й транспортерні системи.

Таблиця 1.1-Електричні навантаження в мережі до 1000 В РЗ фабрики

| № | Найменування | п | Потужність ЕП, кВт | | m | K _v | cos φ / tg φ | Середнє навантаження кВт | | N _{эф} | K _M | Розрахункове навантаження, кВт | | | | |
|----|--|-----|--------------------|---------|----|----------------|--------------|--------------------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|--|--|
| | | | одного | всього | | | | P _{CM} | Q _{CM} | | | P _p , кВт | Q _p , кВар | S _p , кВА | | |
| 1. | Збагачувальна фабрика першої стадії | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Конвейєри | 4 | 75 | 300 | | 0,6 | 0,8/0,75 | 180,00 | 135,00 | | | | | | | |
| | Магнітний сепаратор (ПБМ-П) | 12 | 7,5-15 | 120 | | 0,7 | 0,8/0,75 | 84,00 | 63,00 | | | | | | | |
| | Спиральний класифікатор (КСН-24Н) | 6 | 7,5 | 45 | | 0,7 | 0,8/0,75 | 31,50 | 23,63 | | | | | | | |
| | Гідроциклон (ГЦ-2000) | 4 | 15 | 60 | | 0,35 | 0,8/0,75 | 21,00 | 15,75 | | | | | | | |
| | Шафи управління | 12 | 3,75 | 45 | | 0,6 | 0,8/0,75 | 27,00 | 20,25 | | | | | | | |
| | Вентиляція | 23 | 7,5-37 | 429 | | 0,6 | 0,8/0,75 | 257,40 | 193,05 | | | | | | | |
| | Всього | 61 | 3,75-75 | 999 | >3 | 0,60 | 0,8/0,75 | 600,90 | 450,68 | 27 | 1 | 600,90 | 450,68 | 751,13 | | |
| 2. | Збагачувальна фабрика другої стадії | | | | | | | | | | | | | | | |
| | АПК | 33 | 0,25-41,5 | 372,15 | >3 | 0,38 | 0,75/0,88 | 141,42 | 124,45 | 18 | 1 | 141,42 | 124,45 | 188,38 | | |
| | Ідальня | 35 | 0,4-40 | 318,5 | >3 | 0,41 | 0,72/0,97 | 130,59 | 126,67 | 15 | 1,01 | 131,89 | 126,67 | 182,87 | | |
| | Котельня | 12 | 4,5-75 | 426 | | 0,88 | 0,8/0,75 | 374,88 | 281,16 | 11 | 1 | 374,88 | 281,16 | 468,60 | | |
| 6. | Компресорна станція | 27 | 0,08-55 | 560,1 | >3 | 0,7 | 0,79/0,77 | 392,07 | 301,89 | 20 | 1 | 392,07 | 301,89 | 494,83 | | |
| 7. | Наземні галереї №1-2 | 16 | 3,75-7,5 | 98,2 | >3 | 0,57 | 0,4/2,29 | 55,97 | 128,18 | 16 | 1 | 55,97 | 128,18 | 139,87 | | |
| | Ітого силове навантаження | 272 | 0,08-110 | 5392,95 | >3 | 0,70 | 0,73/0,93 | 3791,03 | 2984,42 | 98,05 | 1 | 3791,03 | 2984,42 | 4824,80 | | |
| | Освітлювальне | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Всього по РЗФ | | | | | | | | | | | | | | | |

1.2 Освітлювальні навантаження РЗ фабрики

У якості методу розрахунку застосовуємо метод питомої потужності [2]. Продовжимо у якості прикладу використовувати збагачувальну фабрику першої стадії:

$$F_{\text{зфІст.}}=1060 \text{ м}^2; \quad p_0=18 \text{ Вт/м}^2; \quad K_c=0,95;$$

$$P_{\text{в.зфІст.}}=p_0 \cdot F_{\text{прим.}} \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 1060 \cdot 10^{-3} = 19,08 \text{ кВт.}$$

Розрахункове активне навантаження:

$$P_{\text{р.о.зфІст.}} = k_1 \cdot k_c \cdot P_{\text{в.зфІст.}} = 1,12 \cdot 0,95 \cdot 19,08 = 20,30 \text{ кВт.}$$

Розрахункове реактивне навантаження:

$$Q_{\text{р.о.зфІст.}} = P_{\text{р.о.зфІст.}} \cdot \text{tg}\varphi = 20,30 \cdot 1,73 = 35,12 \text{ квар.}$$

Розрахункове повне навантаження:

$$S_{\text{р.о.зфІст.}} = \sqrt{P_{\text{р.о.зфІст.}}^2 + Q_{\text{р.о.зфІст.}}^2} = \sqrt{20,30^2 + 35,12^2} = 40,56 \text{ кВА.}$$

Розрахунок по іншим підрозділам заводу аналогічний, зведено до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Розрахунок освітлювальних навантажень підрозділів РЗФ.

| n/n | Назва підрозділу | $F_{\text{прим.}},$ м ² | $P_0,$ Вт/м ² $\times 10^{-3}$ | $P_{\text{в.}},$ кВт | K_1 | K_c | $\frac{\cos \varphi}{\text{tg} \varphi}$ | $P_{\text{р.осв.}},$ кВт | $Q_{\text{р.осв.}},$ кВар |
|-----|-------------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------|-------|-------|--|-----------------------------|------------------------------|
| 1 | Збагачувальна фабрика першої стадії | 1060 | 18 | 19,08 | 1,12 | 0,95 | 0,5/1,73 | 20,30 | 35,12 |
| 2 | Збагачувальна фабрика другої стадії | 2170 | 18 | 39,06 | 1,12 | 0,95 | 0,5/1,73 | 41,56 | 71,90 |
| 3 | Котельня | 350 | 12 | 4,2 | 1,12 | 0,95 | 0,5/1,73 | 4,47 | 7,73 |
| 4 | Компресорна станція | 820 | 12 | 9,84 | 1,12 | 0,95 | 0,5/1,73 | 10,47 | 18,11 |
| 5 | Адміністративно-побутовий корпус | 510 | 18 | 9,18 | 1,2 | 0,85 | 0,9/0,48 | 9,36 | 4,49 |
| 6 | Їдальня | 320 | 18 | 5,76 | 1,2 | 0,85 | 0,9/0,48 | 5,88 | 2,82 |
| 7 | Надземні галереї № 1 та № 2 | 720 | 10 | 7,2 | 1,12 | 0,95 | 0,5/1,73 | 7,66 | 13,25 |
| 8 | Освітлення території | 259100 | 0,1 | 25,91 | 1,12 | 1 | 0,5/1,73 | 29,02 | 50,20 |
| 9 | Всього | | | | | | | 128,72 | 203,63 |

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 13 |

1.3 Силові електричні навантаження рудозбагачувальної фабрики в електричних мережах вище 1000 В

Попередньо визначаємо кількість трансформаторів КТП:

$$N_0 = P_{р.н.РЗФ} / (K_3 \cdot S_H) = 3919,744 / (0,7 \cdot 1000) = 5,59 \text{ шт,}$$

де $P_{р.н.РЗФ}$ – розрахункове навантаження РЗФ на напрузі 0,4 кВ; K_3 – коефіцієнт завантаження трансформаторів РЗФ (попередньо вибирається 0,7); $S_H=1000$ кВА – номінальна потужність одного трансформатора (вибір проводиться у 5-му розділі). Приймаємо три комплектні двотрансформаторні підстанції.

Розрахунок навантаження вище 1000 В для першої трансформаторної підстанції.

$$n_{ел.тп1}=139; P_{н.мін.тп1}=0,25 \text{ кВт}; P_{н.мак.тп1}=75 \text{ кВт}; P_{н\Sigma тп1}=1975,8 \text{ кВт};$$

$$P_{3M\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{3Mi} = 1179,53 \text{ кВт}; \quad Q_{3M\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{3Mi} = 1007,4 \text{ квар};$$

$$K_B = \frac{P_{3M\Sigma}}{P_{H\Sigma}} = \frac{1179,53}{1975,8} = 0,597;$$

$$\cos \varphi = 0,76; \quad tg \varphi = \frac{Q_{3M\Sigma}}{P_{3M\Sigma}} = \frac{1007,4}{1179,53} = 0,86;$$

$$m = \frac{P_{н.мак.тп1}}{P_{н.мін.тп1}} = \frac{75}{0,25} = 18,75; \text{ тобто } m > 3.$$

$$n_{эф} = \frac{2P_{H\Sigma}}{P_{н.мак}} = \frac{2 \cdot 1975,8}{75} = 52,688 \approx 53; \quad K_p=1,0;$$

$$P_{р.тп1} = K_{р.тп1} \cdot P_{3M\Sigma.тп1} = 1,0 \cdot 1179,53 = 1179,53 \text{ кВт};$$

$$Q_{р.тп1} = Q_{3M\Sigma.тп1} = 1007,4 \text{ квар}$$

$$S_{р.тп1} = \sqrt{P_{р.тп1}^2 + Q_{р.тп1}^2} = \sqrt{1179,529^2 + 1007,417^2} = 1551,186 \text{ кВА}$$

$$P_{р.о.тп1} = 44,307 \text{ кВт}; \quad Q_{р.о.тп1} = 69,307 \text{ квар.}$$

Сумарне навантаження:

$$P_{\Sigma тп1} = P_{р.тп1} + P_{р.о.тп1} = 1179,529 + 44,307 = 1223,836 \text{ кВт};$$

$$Q_{\Sigma тп1} = Q_{р.тп1} + Q_{р.о.тп1} = 1007,417 + 69,307 = 1076,724 \text{ квар.}$$

| | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|------|
| | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | 14 |

Сумарне реактивне навантаження з врахуванням вибраних у розділі 4 компенсуючих пристроїв 0,4 кВ:

$$Q_{\Sigma \text{тп1 з кп}} = Q_{\Sigma \text{тп1}} - Q_{\text{кп}} = 1076,724 - 400 = 676,724 \text{ квар};$$

$$S_{\Sigma \text{тп1 з кп}} = \sqrt{P_{\Sigma \text{тп1}}^2 + Q_{\Sigma \text{тп1 з кп}}^2} = \sqrt{1223,836^2 + 676,724^2} = 1398,474 \text{ кВА.}$$

Завантаження трансформаторів:

$$K_{3.\text{тп1}} = \frac{S_{\Sigma \text{тп1 з кп}}}{n \cdot S_{\text{н.т.}}} = \frac{1398,474}{2 \cdot 1000} = 0,699 \approx 0,7.$$

Втрати потужності у трансформаторах першої підстанції РЗФ (параметри трансформаторів наведено у розділі 5):

$$\Delta P_{\text{тп1}} = n_{\text{т}} \cdot (\Delta P_{\text{хх}} + \Delta P_{\text{кз}} \cdot k_3^2) = 2 \cdot (0,77 + 10,6 \cdot 0,68^2) = 11,928 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q = n \left(\frac{I_{\text{X}}}{100} S_{\text{H}} + \frac{U_{\text{K}}}{100} S_{\text{H}} \cdot K_3^2 \right)$$

$$\Delta Q_{\text{тп1}} = 2 \cdot \left(\frac{1,2}{100} \cdot 1000 + \frac{5,5}{100} \cdot 1000 \cdot 0,68^2 \right) = 77,9.$$

Всього на шинах 10 кВ ТП1 РЗ фабрики:

$$P_{\text{р.тп1 рзф}} = P_{\Sigma \text{тп1}} + \Delta P_{\text{тп1}} = 1223,836 + 11,928 = 1235,764 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{р.тп1 рзф}} = Q_{\Sigma \text{тп1}} + \Delta Q_{\text{тп1}} = 676,724 + 77,9 = 754,624 \text{ квар};$$

$$S_{\Sigma.\text{тп1}} = \sqrt{P_{\Sigma \text{тп1}}^2 + Q_{\Sigma \text{тп1}}^2} = \sqrt{1235,764^2 + 754,624^2} = 1447,954 \text{ кВА.}$$

Аналогічні розрахунки для ТП2 та ТП3 зведено до таблиці 1.3.

Навантаження фабрики на напрузі 10 кВ розраховується аналогічно, з додаванням високовольтного навантаження асинхронних та синхронних двигунів, потужності високовольтних КП:

$$P_{\text{р.10 рзф.}} = P_{\Sigma \text{рзф}} + P_{\Sigma \text{сд,ад}} = 3955,528 + 1323 + 1600 + 1008 = 7886,528 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{р.10 рзф.}} = Q_{\Sigma \text{рзф.}} + Q_{\Sigma \text{сд,ад}} + Q_{\text{кп.10}} = 1484,486 - 1058 + 1200 + 756 - 1200 = 1182,486 \text{ квар};$$

$$S_{\text{р.10 рзф.}} = \sqrt{P_{\text{р.10 рзф.}}^2 + Q_{\text{р.10 рзф.}}^2} = \sqrt{7886,528^2 + 1182,486^2} = 7974,69 \text{ кВА.}$$

З врахуванням коефіцієнту одночасності $k_0=0,95$ [1]:

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 15 |

$$P_{p.10pзф.ко} = k_0 \cdot P_{p.10pзф} = 0,95 \cdot 7886,528 = 7492,202 \text{ кВт};$$

$$Q_{p.10pзф.ко} = k_0 \cdot Q_{p.10} = 0,95 \cdot 1182486 = 1123,36 \text{ квар};$$

$$S_{p.10pзф.ко} = \sqrt{P_{p.10pзф.ко}^2 + Q_{p.10pзф.ко}^2} = \sqrt{7492,202^2 + 1123,36^2} = 7575,95 \text{ кВА}.$$

Загальні розрахунки наведено у таблиці 1.3.

1.4 Побудова графіків електричних навантажень

Побудова графіків виконується за методикою, що наведено у п.3.3 [1]. Враховується активна та реактивна потужності, період року, робоча або вихідна доба. Таблиці 1.4-1.6 містять данні для побудови графіків навантажень фабрики, на рис.1.1-1.4 представлено графіки.

Таблиця 1.4 – Споживання активної потужності РЗФ за зимовий та літній періоди

| t,год | Рз,% | Рз,кВт | Рл,% | Рл,кВт | Рз,% | Рз,кВт | Рл,% | Рл,кВт |
|-------|--------------|----------|-------|----------|---------------|----------|------|----------|
| | Робочий день | | | | Вихідний день | | | |
| 0-1 | 80 | 5993,762 | 68 | 5094,697 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 1-2 | 80 | 5993,762 | 68 | 5094,697 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 2-3 | 80 | 5993,762 | 68 | 5094,697 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 3-4 | 80 | 5993,762 | 68 | 5094,697 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 4-5 | 80 | 5993,762 | 68 | 5094,697 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 5-6 | 85 | 6368,372 | 72,25 | 5413,116 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 6-7 | 85 | 6368,372 | 72,25 | 5413,116 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 7-8 | 90 | 6742,982 | 76,5 | 5731,535 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 8-9 | 100 | 7492,202 | 85 | 6368,372 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 9-10 | 100 | 7492,202 | 85 | 6368,372 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 10-11 | 85 | 6368,372 | 72,25 | 5413,116 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 11-12 | 94 | 7042,67 | 79,9 | 5986,269 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 12-13 | 94 | 7042,67 | 79,9 | 5986,269 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 13-14 | 94 | 7042,67 | 79,9 | 5986,269 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 14-15 | 94 | 7042,67 | 79,9 | 5986,269 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 15-16 | 85 | 6368,372 | 72,25 | 5413,116 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 16-17 | 85 | 6368,372 | 72,25 | 5413,116 | 26 | 1947,973 | 22,1 | 1655,777 |
| 17-18 | 85 | 6368,372 | 72,25 | 5413,116 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 18-19 | 95 | 7117,592 | 80,75 | 6049,953 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 19-20 | 100 | 7492,202 | 85 | 6368,372 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 20-21 | 100 | 7492,202 | 85 | 6368,372 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 21-22 | 95 | 7117,592 | 80,75 | 6049,953 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 22-23 | 95 | 7117,592 | 80,75 | 6049,953 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| 23-24 | 80 | 5993,762 | 68 | 5094,697 | 30 | 2247,661 | 25,5 | 1910,512 |
| | | 160408 | | 136346,8 | | 51246,66 | | 43559,66 |

Таблиця 1.3. Розрахунок електричних навантажень в мережі вище 1000 В рудозбагачувальної фабрики

| № | Найменування | n | Потужність ЕП, кВт | | m | K _B | cosφ / tgφ | Середнє навантаження, кВт | | N _{эф} | K _M | Розрахункове навантаження, кВт | | |
|----|-------------------------------------|-----|--------------------|--------|----|----------------|------------|---------------------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| | | | одного | всього | | | | P _{CM} | Q _{CM} | | | P _p , кВт | Q _p , кВар | S _p , кВА |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| | ТП-1 | | | | | | | | | | | | | |
| 1. | Збагачувальна фабрика першої стадії | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 61 | 3,75-75 | 999 | >3 | 0,602 | 0,8/0,75 | 600,9 | 450,68 | 27 | 1 | 600,900 | 450,675 | 751,125 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 20,301 | 35,121 | |
| | Всього по 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 621,201 | 485,796 | 788,599 |
| 2. | Компресорна станція | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 27 | 0,08-55 | 560,1 | >3 | 0,7 | 0,79/0,77 | 392,07 | 301,89 | 20 | 1 | 392,070 | 301,894 | 494,832 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 10,470 | 18,113 | |
| | Всього по 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 402,540 | 320,007 | 514,240 |
| 3. | Їдальня | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 35 | 0,4-40 | 318,5 | >3 | 0,41 | 0,72/0,97 | 130,585 | 126,67 | 15 | 1,01 | 131,891 | 126,667 | 182,866 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 5,875 | 2,820 | |
| | Всього по 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 137,766 | 129,488 | 189,067 |
| 4. | Надземні галереї №1 та №2 | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 16 | 3,75-7,5 | 98,2 | >3 | 0,57 | 0,4/2,29 | 55,974 | 128,18 | 16 | 1 | 55,974 | 128,180 | 139,869 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 7,661 | 13,253 | |
| | Всього по 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 63,635 | 141,434 | 155,090 |
| | Ітого | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 139 | 0,25-75 | 1975,8 | >3 | 0,597 | 0,76/0,86 | 1179,53 | 1007,4 | 53 | 1 | 1179,529 | 1007,417 | 1551,186 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 44,307 | 69,307 | 82,259 |
| | Всього на шинах 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 1223,836 | 1076,724 | 1630,064 |

Продовження таблиці 1.3.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----|-------------------------------------|-----|-----------|--------|----|-------|-----------|---------|--------|----|----|-----------|----------|----------|
| | КП 0,4 кВ ТП1 | | | | | | | | | | | | -400 | |
| | З урахуванням КП | | | | | | | | | | | 1223,836 | 676,724 | 1398,474 |
| | Втрати в трансформаторах | | | | | | | | | | | 11,928 | 77,9 | |
| | Шини 10кВ ТП1 РЗФ | | | | | | | | | | | 1235,764 | 754,624 | 1447,954 |
| | ТП-2; ТП-3 | | | | | | | | | | | | | |
| 1. | Збагачувальна фабрика другої стадії | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 88 | 3-110 | 2619 | >3 | 0,8 | 0.8/0.75 | 2095,2 | 1571,4 | 48 | 1 | 2095,200 | 1571,400 | 2619,000 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 41,560 | 71,899 | |
| | Всього по 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 2136,760 | 1643,299 | 2695,584 |
| 2. | Котельня | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 12 | 4,5-75 | 426 | >3 | 0,88 | 0.8/0.75 | 374,88 | 281,16 | 11 | 1 | 374,880 | 281,160 | 468,600 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 4,469 | 7,731 | 8,930 |
| | Всього по 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 379,349 | 288,891 | 476,827 |
| 3 | Адміністративний корпус | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 33 | 0,25-41.5 | 372,15 | >3 | 0,38 | 0,75/0,88 | 141,417 | 124,45 | 18 | 1 | 374,880 | 281,160 | 468,600 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 4,469 | 7,731 | 8,930 |
| | Всього по 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 379,349 | 288,891 | 476,827 |
| | Ітого | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 133 | 0,25-110 | 3045 | >3 | 0,858 | 0,8/0,75 | 2611,5 | 1977 | 55 | 1 | 2611,497 | 1977,007 | 3275,435 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 46,029 | 79,630 | |
| | Освітлення території | | | | | | | | | | | 29,131 | 50,397 | |
| | Всього на шинях 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 2686,657 | 2107,033 | 3414,340 |
| | КП 0,4 кВ ТП2 | | | | | | | | | | | | -1440 | |
| | З урахуванням КП | | | | | | | | | | | 2686,6568 | 667,033 | 2768,223 |

Продовження таблиці 1.3.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|------|----------|---------|----|-------|-----------|---------|--------|----|----|----------|----------|----------|
| | Втрати в трансформаторах ТП2-ТП3 (4x1000) | | | | | | | | | | | 23,856 | 155,8 | |
| | Шини 10кВ ТП2-3 РЗФ | | | | | | | | | | | 2710,513 | 822,833 | 2832,655 |
| | Всього по РЗФ | | | | | | | | | | | | | |
| | силове | 272 | 0,08-110 | 5392,95 | >3 | 0,703 | 0.73/0.93 | 3791,03 | 2984,4 | 98 | 1 | 3791,026 | 2984,424 | 4824,797 |
| | освітлювальне | | | | | | | | | | | 128,718 | 203,634 | 240,905 |
| | Всього на шинах 0,4 кВ | | | | | | | | | | | 3919,744 | 3090,786 | 4991,729 |
| | Втрати в гр-рах | | | | | | | | | | | 35,784 | 233,7 | |
| | З урахуванням втрат | | | | | | | | | | | 3955,528 | 3324,486 | 5167,051 |
| | КП 0.4 кВ | | | | | | | | | | | | -1840 | |
| | З урахуванням КУ | | | | | | | | | | | 3955,528 | 1484,486 | 4224,915 |
| | Високовольтне навантаження фабрики | | | | | | | | | | | | | |
| | СД компресорів | 3 | 630 | 1890 | | 0,7 | 1/0 | 1323 | 992,25 | 3 | 1 | 1323 | -1058 | 1790,186 |
| | АД млинів | 4 | 500 | 2000 | | 0,8 | 0.8/0.75 | 1600 | 1200 | 4 | 1 | 1600,000 | 1200,000 | 2000,000 |
| | АД насосів | 2 | 630 | 1260 | | 0,8 | 0.75/0.88 | 1008 | 756 | 2 | 1 | 1008,000 | 756,000 | 1260,000 |
| | КП 10 кВ | | | | | | | | | | | | -1200 | |
| | Всього по РЗФ | | | | | | | | | | | 7886,528 | 1182,486 | 7974,69 |
| | З врахуванням коефіцієнту одночасності | 0,95 | | | | | | | | | | 7492,202 | 1123,362 | 7575,95 |

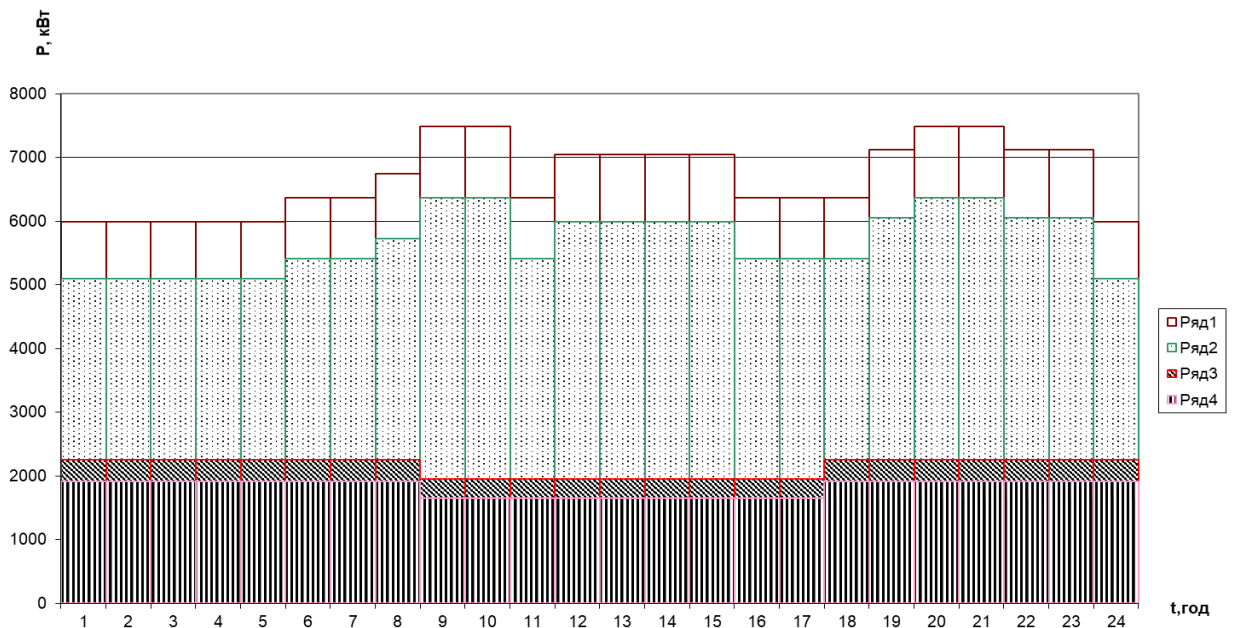


Рис. 1.1 - Добові графіки активного навантаження РЗФ: 1,2- робочі; 3,4- вихідні зимового та літнього періодів.

Таблиця 1.5 - Споживання реактивної потужності РЗФ до компенсації за зимовий та літній періоди

| t, год | Qз, % | Qз, квар | Qл, % | Qл, квар | Qз, % | Qз, квар | Qл, % | Qл, квар |
|--------|--------------|----------|-------|----------|---------------|----------|-------|----------|
| | Робочий день | | | | Вихідний день | | | |
| 0-1 | 86 | 4314,156 | 73,1 | 3667,032 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 1-2 | 86 | 4314,156 | 73,1 | 3667,032 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 2-3 | 86 | 4314,156 | 73,1 | 3667,032 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 3-4 | 86 | 4314,156 | 73,1 | 3667,032 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 4-5 | 86 | 4314,156 | 73,1 | 3667,032 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 5-6 | 90 | 4514,814 | 76,5 | 3837,592 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 6-7 | 90 | 4514,814 | 76,5 | 3837,592 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 7-8 | 90 | 4514,814 | 76,5 | 3837,592 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 8-9 | 100 | 5016,46 | 85 | 4263,991 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 9-10 | 100 | 5016,46 | 85 | 4263,991 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 10-11 | 90 | 4514,814 | 76,5 | 3837,592 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 11-12 | 95 | 4765,637 | 80,75 | 4050,791 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 12-13 | 95 | 4765,637 | 80,75 | 4050,791 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 13-14 | 95 | 4765,637 | 80,75 | 4050,791 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 14-15 | 95 | 4765,637 | 80,75 | 4050,791 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 15-16 | 92 | 4615,143 | 78,2 | 3922,872 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 16-17 | 92 | 4615,143 | 78,2 | 3922,872 | 28 | 1404,609 | 23,8 | 1193,917 |
| 17-18 | 92 | 4615,143 | 78,2 | 3922,872 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 18-19 | 95 | 4765,637 | 80,75 | 4050,791 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 19-20 | 100 | 5016,46 | 85 | 4263,991 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 20-21 | 100 | 5016,46 | 85 | 4263,991 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 21-22 | 93 | 4665,308 | 79,05 | 3965,512 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 22-23 | 93 | 4665,308 | 79,05 | 3965,512 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| 23-24 | 88 | 4414,485 | 74,8 | 3752,312 | 32 | 1605,267 | 27,2 | 1364,477 |
| | | 111114,6 | | 94447,4 | | 36720,49 | | 31212,41 |

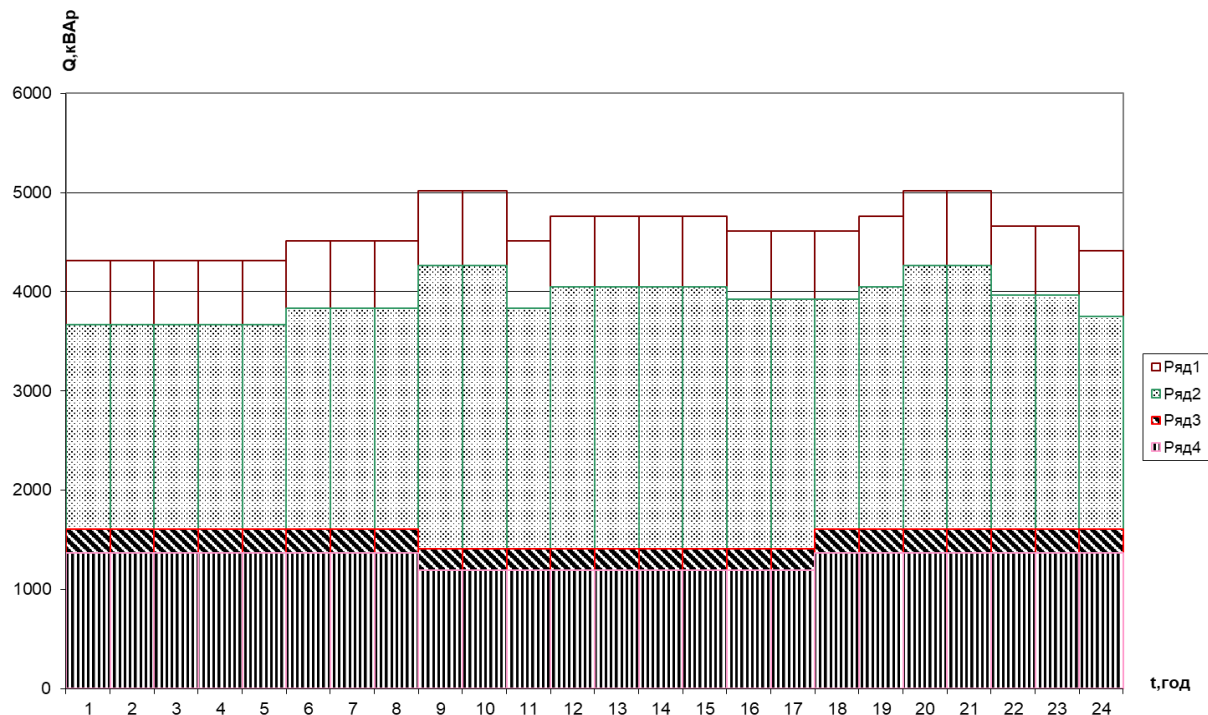


Рис. 1.2 - Добові графіки реактивного навантаження РЗФ до компенсації: 1,2 - робочі; 3,4 - вихідні зимового та літнього періодів

Таблиця 1.6 - Споживання реактивної потужності РЗФ після виконання компенсації за зимовий та літній періоди

| t, год | Qз,% | Qз,квар | Qл,% | Qл,квар | Qз,% | Qз,квар | Qл,% | Qл,квар |
|--------|--------------|----------|-------|---------|---------------|---------|------|----------|
| | Робочий день | | | | Вихідний день | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0-1 | 86 | 966,091 | 73,1 | 821,178 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 1-2 | 86 | 966,091 | 73,1 | 821,178 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 2-3 | 86 | 966,091 | 73,1 | 821,178 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 3-4 | 86 | 966,091 | 73,1 | 821,178 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 4-5 | 86 | 966,091 | 73,1 | 821,178 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 5-6 | 90 | 1011,026 | 76,5 | 859,372 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 6-7 | 90 | 1011,026 | 76,5 | 859,372 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 7-8 | 90 | 1011,026 | 76,5 | 859,372 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 8-9 | 100 | 1123,362 | 85 | 954,858 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 9-10 | 100 | 1123,362 | 85 | 954,858 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 10-11 | 90 | 1011,026 | 76,5 | 859,372 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 11-12 | 95 | 1067,194 | 80,75 | 907,115 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 12-13 | 95 | 1067,194 | 80,75 | 907,115 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 13-14 | 95 | 1067,194 | 80,75 | 907,115 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 14-15 | 95 | 1067,194 | 80,75 | 907,115 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 15-16 | 92 | 1033,493 | 78,2 | 878,469 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 16-17 | 92 | 1033,493 | 78,2 | 878,469 | 28 | 314,541 | 23,8 | 267,360 |
| 17-18 | 92 | 1033,493 | 78,2 | 878,469 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 18-19 | 95 | 1067,194 | 80,75 | 907,115 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 19-20 | 100 | 1123,362 | 85 | 954,858 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 20-21 | 100 | 1123,362 | 85 | 954,858 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 21-22 | 93 | 1044,727 | 79,05 | 888,018 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 22-23 | 93 | 1044,727 | 79,05 | 888,018 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| 23-24 | 88 | 988,559 | 74,8 | 840,275 | 32 | 359,476 | 27,2 | 305,554 |
| | | 24882,47 | | 21150,1 | | 8223,01 | | 6989,558 |

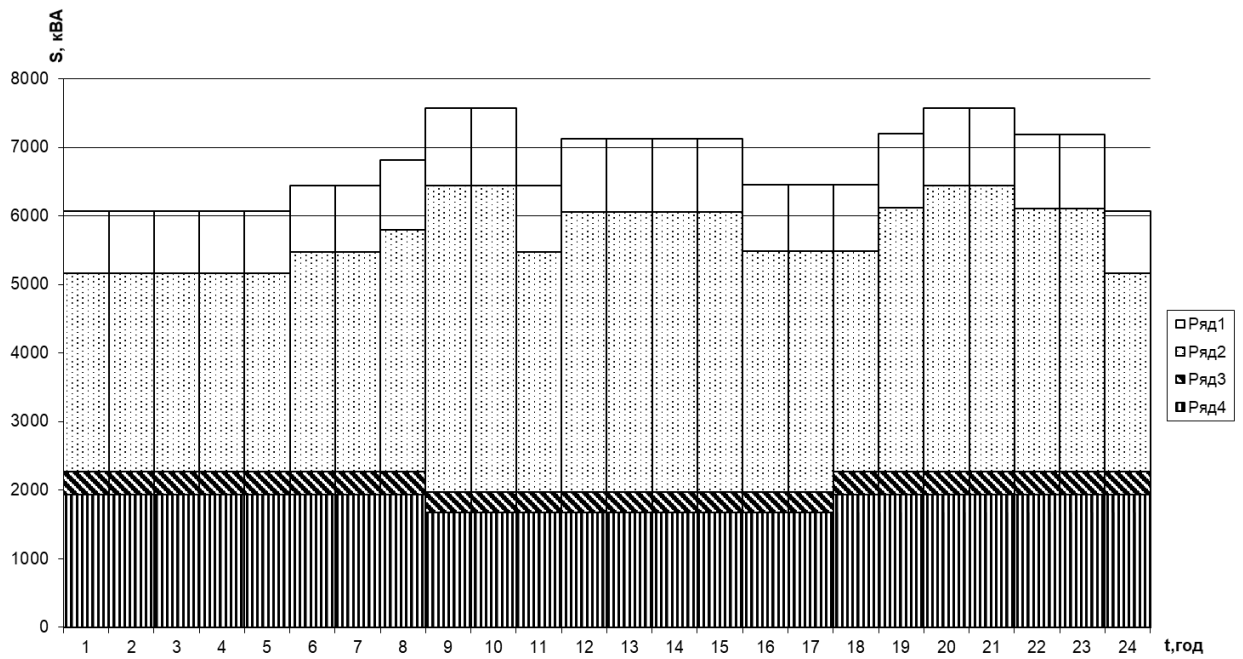


Рис. 1.3 - Добові графіки повного навантаження РЗФ після виконання компенсації: 1,2 - робочі; 3,4 - вихідні зимового та літнього періодів

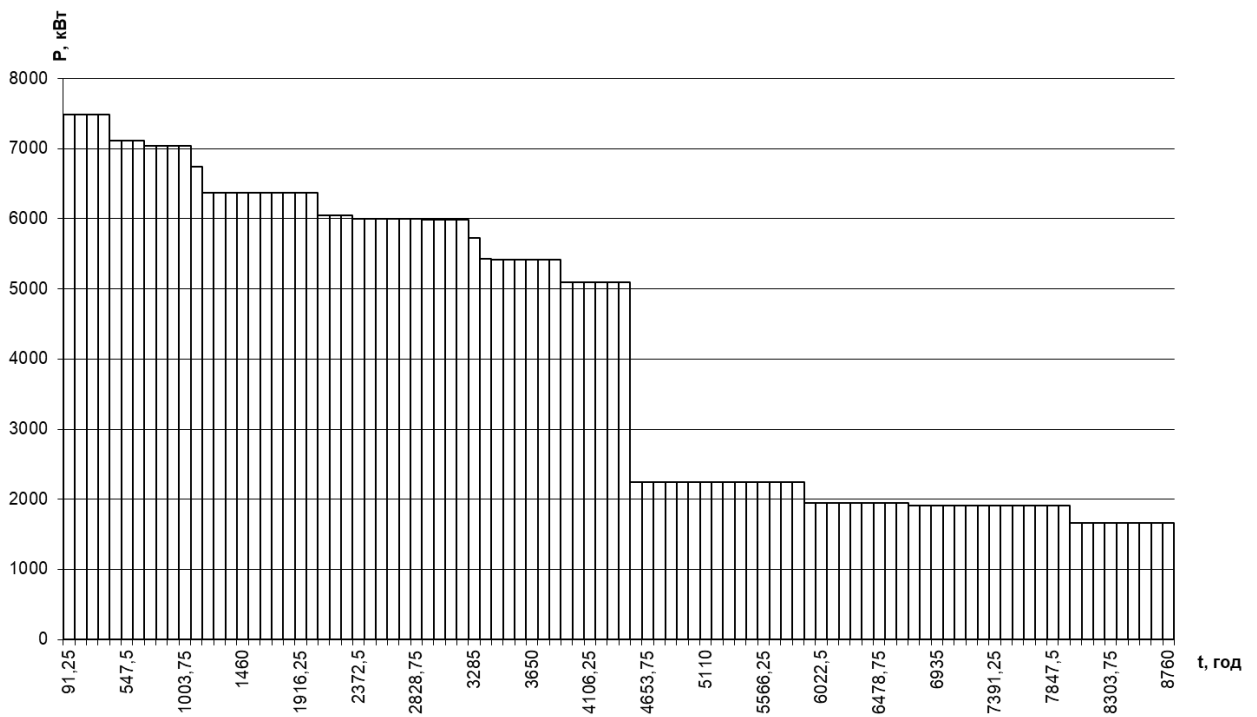


Рис. 1.4 - Річний графік РЗФ за тривалістю по активній потужності

| | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата |

Споживання активної та реактивної енергії РЗФ:

$$W_{p.pзф} = \sum (P_i \cdot t_i) = 160408 \cdot 147 + 136346,8 \cdot 105 + 51246,66 \cdot 65 + 43559,66 \cdot 48 = \\ = 43318297,39 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$V_{p.pзф} = \sum (Q_i \cdot t_i) = 24882,47 \cdot 147 + 21150,1 \cdot 105 + 8223,01 \cdot 65 + 6989,56 \cdot 48 = \\ = 6748477,577 \text{ кВАр} \cdot \text{год}.$$

Час використання максимуму енергосистеми:

$$T_{m.pзф} = \frac{\sqrt{W_{p.pзф}^2 + V_{p.pзф}^2}}{S_{p.pзф}} = \frac{\sqrt{(43318297,39^2 + 6748477,577^2)}}{7575,95} = 5786,84 \text{ год}.$$

Час найбільших втрат:

$$\tau_{pзф} = \left(0,124 + \frac{T_{m.pзф}}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{5786,84}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 4325,38 \text{ год}.$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 23 |

2 ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ РЗФ ТА ВИБІР МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ГЗП

Розраховуємо картограму електричних навантажень рудозбагачувальної фабрики на основі розрахункових даних про активну потужність. Картограма дозволяє візуалізувати зображення розподілу електричних навантажень на території фабрики. При побудові, для кожного цеху, визначається радіус кола, який пропорційний його розрахунковому навантаженню.

Наприклад, для збагачувальної фабрики першої черги:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_{p1} + P_{o1}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{600,9 + 20,3}{\pi \cdot 30}} = 2,57 \text{ см},$$

де $m = 30 \text{ кВт/см}^2$ - прийнятий масштаб.

Частка освітлювального навантаження:

$$\alpha = \frac{360 \cdot P_{o1}}{P_{p1} + P_{o1}} = \frac{360 \cdot 20,3}{621,2} = 11,77^\circ.$$

Аналогічні розрахунки для інших цехів заносимо в таблицю 2.1.

Картограма дозволяє визначити умовну точку центру електричних навантажень (ЦЕН), до якого потрібно наближувати ГЗП.

Визначаємо координати центру електричних навантажень:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = 521518,653 / 7823,039 = 66,66 \text{ м};$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = 1194469,27 / 7823,039 = 152,69 \text{ м},$$

де n - кількість виробничих цехів на підприємстві;

x_i, y_i - координати розташування i -го цеху відповідно до генерального плану;

P_i - розрахункова величина електричного навантаження i -го цеху.

З розрахунків отримано наступні координати ЦЕН: $x_0 = 66,66 \text{ м}$, $y_0 = 152,69 \text{ м}$. Дані для побудови картограми електричних навантажень приведено в таблиці 2.1.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 24 |

Таблиця 2.1 – Картограма електричних навантажень рудозбагачувальної фабрики

| п/п | Назва підрозділу | $P_{р-і}$, кВт | $P_{овт,і}$, кВт | $P_{Σ}$, кВт | $X_{i,м}$ | $Y_{i,м}$ | $R_{,мм}$ | α ,град | $P_i \times X_i$, м | $P_i \times Y_i$, м |
|-----|---|-----------------|-------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------------|----------------------|
| 1 | Збагачувальна фабрика 1-ї стадії | 600,9 | 20,30 | 621,20 | 80 | 150 | 11,765 | 2,568 | 49696,09 | 93180,17 |
| 2 | Високовольтне навантаження | 1600 | 0 | 1600 | 80 | 150 | 0 | 4,121 | 128000 | 240000 |
| 3 | Збагачувальна фабрика 2-ї стадії | 2095,2 | 41,56 | 2136,76 | 33 | 150 | 7,00 | 4,763 | 70513,079 | 320513,98 |
| 4 | Адміністративно-побутовий корпус | 141,42 | 9,36 | 150,78 | 43 | 120 | 22,36 | 1,265 | 6483,699 | 18094,03 |
| 5 | Ідальня | 131,89 | 5,88 | 137,77 | 98 | 126 | 15,356 | 1,209 | 13500,99 | 17358,42 |
| 6 | Котельня | 374,88 | 4,47 | 379,35 | 21 | 188 | 4,246 | 2,007 | 7966,32 | 71317,57 |
| 7 | Компресорна станція | 392,07 | 10,47 | 402,54 | 102 | 206 | 9,366 | 2,067 | 41059,06 | 82923,19 |
| 8 | Високовольтне навантаження компресорної | 2331 | 0 | 2331 | 80 | 150 | 0 | 4,975 | 186480 | 349650 |
| 9 | Надземна галерея №1 | 27,99 | 3,83 | 31,824 | 330 | 20 | 43,34 | 0,581 | 10500,73 | 636,41 |
| 10 | Надземна галерея №2 | 27,99 | 3,83 | 31,824 | 230 | 25 | 43,34 | 0,581 | 7318,69 | 795,51 |
| | Всього | | | 7823,039 | | | | | 521518,653 | 1194469,27 |

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ВИБІР СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РЗФ

Метою цього розділу є вибір найбільш надійного, технічно та економічно доцільного варіанту. Порівняння проводиться у вигляді таблиці техніко-економічних показників (ТЕП), що дозволяє наочно визначити оптимальний варіант. Найкращим вважається той, що має найнижчі приведені витрати за весь життєвий цикл, забезпечує необхідну надійність та якість живлення [1]. Для розрахунків запропоновано 2 варіанти:

- 1) електропостачання рудозбагачувальної фабрики здійснюється дволанцюговою ЛЕП 35 кВ від шин підстанції енергосистеми на відстані 3,4 км, з встановленням ГЗП - 35/10 кВ;
- 2) для електропостачання РЗФ прокладаються кабельні лінії напругою 10 кВ від підстанції енергосистеми довжиною 3,4 км. В цьому випадку передбачається встановлення ЦРП - 10 кВ.

Схеми зовнішнього електропостачання наведено на рис.3.1 а) – для першого варіанту та 3.1 б) – для другого.

Вибираємо основні елементи схем електропостачання та визначаємо в них втрати електроенергії та вартість цих втрат.

Для першого варіанту розраховуємо переріз повітряної ЛЕП 35 кВ (рис.3.1 а) та вибираємо необхідний трансформатор 35/10 кВ.

$$I_{p.1вар.} = \frac{S_{p.pзф}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{7575,95}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 35} = 62,49 \text{ А.}$$

Вибираємо дволанцюгову ЛЕП 35 кВ з проводами перерізом 95 мм² : АС-95, з параметрами: $I_{трив.} = 330 \text{ А}$, $\Delta P_{1км} = 134 \text{ кВт/км}$.

Завантаження лінії в нормальному режимі:

$$k_3 = \frac{I_P}{I_{трив.}} = \frac{62,49}{330} = 0,189.$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 26 |

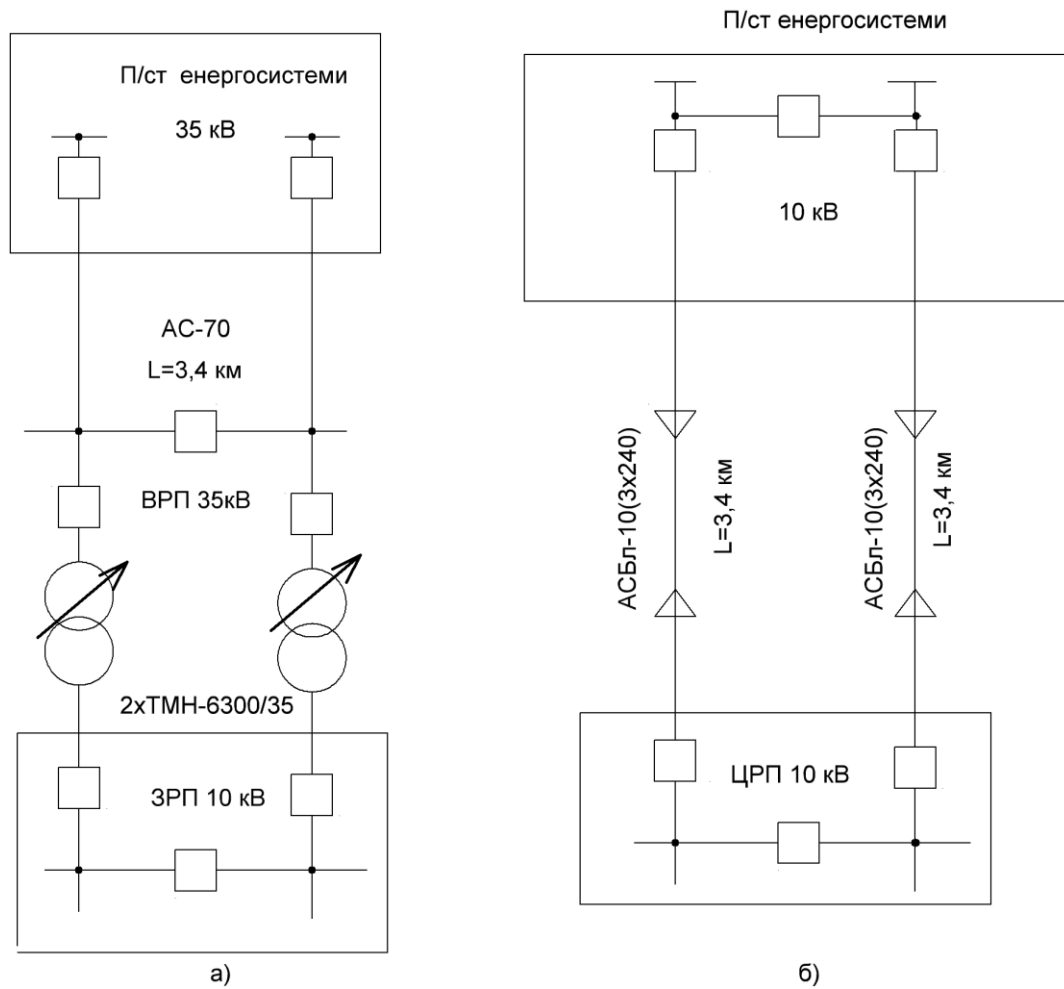


Рис.3.1 – Можливі варіанти схем зовнішнього електропостачання

Для отриманої потужності підприємства приймаємо два трансформатори потужністю $S_{н} = 6,3$ МВА (більш детально у розділі 5). Параметри трансформаторів: тип ТМН-6300/35; $\Delta P_{кз} = 46,5$ кВт; $\Delta P_{хх} = 9,2$ кВт.

Коефіцієнт завантаження у нормальному режимі:

$$k_3 = \frac{S_{p.pзф}}{2 \cdot S_{н.тр}} = \frac{7575,95}{2 \cdot 6300} = 0,601.$$

Перевіряємо надійність живлення споживачів при виході з ладу одного з трансформаторів:

$$S_{ав} = 1,4 \cdot S_{н.тр} = 1,4 \cdot 6300 = 8820 \text{ кВА} > S_{p.pзф} = 7575,95 \text{ кВА}.$$

Надійність живлення підприємства забезпечується без відключення споживачів III-ї категорії.

$$\Delta P_{лен} = \Delta p_{0лен} \cdot n \cdot l \cdot k_3^2 = 134 \cdot 2 \cdot 3,4 \cdot 0,189^2 = 47,259 \text{ кВт};$$

$$\Delta E_{лен} = \Delta P_{лен} \cdot \tau_{\max.pзф} = 47,259 \cdot 4325,38 = 204412,9 \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

$$\Delta E_{тр} = 2 \cdot (\Delta P_x \cdot t_{екл} + \Delta P_k \cdot \tau_{\max.pзф} \cdot k_3^2) = 2 \cdot (9,2 \cdot 8760 + 46,5 \cdot 4325,38 \cdot 0,601^2) = 306609,4 \text{ кВт}\cdot\text{год}.$$

$$\Delta E_{Iвар.} = \Delta E_{лен} + \Delta E_{тр} = 204412,9 + 306609,4 = 511022,37 \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

$$C_{Iвар.втр.} = \Delta E_{Iвар.} \cdot C_0 = 511022,37 \cdot 8,65 \cdot 10^{-3} = 4419,321 \text{ тис.грн}.$$

Для другого варіанту визначаємо переріз кабельної лінії КЛ 10 кВ (рис.3.1 б):

$$I_{p.2вар.} = \frac{S_{p.pзф}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{7575,95}{2\sqrt{3} \cdot 10,5} = 208,28 \text{ А}$$

Планується до прокладання КЛ АСБ-10 [7] перерізом 3x150 мм².

Характеристики: $I_{тр.доп.} = 275 \text{ А}$; $\Delta p_0 = 56 \text{ кВт/км}$.

Виконуємо перевірку в нормальному та аварійному режимах роботи:

$$I_p = 208,28 \text{ А} \leq k_n \cdot I_{тр.доп.} = 0,92 \cdot 275 = 253 \text{ А};$$

$$I_{p.ав.} = 2 \cdot I_p = 2 \cdot 208,28 = 416,57 \text{ А} \leq k_{ав.н} \cdot k'_n \cdot I_{тр.доп.} = 1,25 \cdot 1 \cdot 275 = 343,75 \text{ А}.$$

Для аварійного режиму перевірка не виконується, приймаємо КЛ більшого перерізу: КЛ марки АСБ-10 (3x240), з перерізом 240 мм² та параметрами: $I_d = 355 \text{ А}$; $\Delta p_{1км} = 58 \text{ кВт/км}$. Повторюємо перевірку:

$$I_p = 208,28 \text{ А} \leq k_n \cdot I_{тр.доп.} = 0,92 \cdot 355 = 326,6 \text{ А};$$

$$I_{p.ав.} = 2 \cdot I_p = 2 \cdot 208,28 = 416,57 \text{ А} \leq k_{ав.н} \cdot k'_n \cdot I_{тр.доп.} = 1,25 \cdot 1 \cdot 355 = 443,75 \text{ А}.$$

$$k_3 = \frac{I_p}{I_d} = \frac{208,28}{355} = 0,587.$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 28 |

З цим кабелем завод надійно працює в аварійному режимі.

Далі визначаються втрати потужності і енергії:

$$\Delta P_{кл} = \Delta p_{0кл} \cdot n \cdot l \cdot k_3^2 = 58 \cdot 2 \cdot 3,4 \cdot 0,587^2 = 135,77 \text{ кВт};$$

$$\Delta E_{кл} = \Delta P_{кл} \cdot \tau_{\max.рзф} = 135,77 \cdot 4325,38 = 587244,4 \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

$$C_{2вар.втр.} = \Delta E_{кл.} \cdot C_0 = 587244,4 \cdot 10,228 \cdot 10^{-3} = 6006,36 \text{ тис.грн.}$$

Визначаємо збитки від перерви в електропостачанні при живлення кабельною лінією 10 кВ. Для цього варіанту розрахункова схема складається з вимикача та КЛ (напруга 10 кВ). Проводимо розрахунок за методикою, що вказана в [1].

$$\lambda_{a1} = 0,02 \text{ 1/рік}; \quad \lambda_{a2} = \frac{2,51 \cdot 3,4}{100} = 0,085 \text{ 1/рік};$$

$$\lambda_a = \sum_1^n \lambda_{ai} = 0,02 + 0,085 = 0,105 \text{ 1/рік.}$$

$$T_{\text{в}} = \frac{\sum \lambda_{ai} \cdot T_{\text{в}i}}{\lambda_a} = \frac{0,02 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} + 0,085 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{0,1} = 6,17 \cdot 10^{-3};$$

$$K_{\text{п.п}} = 1,2 \cdot K_{\text{п.пм}} = 1,2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 3,24 \cdot 10^{-3} \text{ в.о.}$$

$$K_{\text{ав.п}} = 0,5 \cdot \lambda \cdot K_{\text{п.п}}^2 = 0,5 \cdot 0,1 \cdot (3,24 \cdot 10^{-3})^2 = 0,525 \cdot 10^{-6} \text{ в.о.}$$

$$K_{\text{ав}}^{(1)} = \lambda_a \cdot T_{\text{в}} = 0,1 \cdot 6,17 \cdot 10^{-3} = 0,617 \cdot 10^{-3} \text{ в.о.}$$

$$K_{\text{ав}}^{(2)} = K_{\text{а}}^{(1)} + 2 \cdot K_{\text{ав.п}} = (0,617 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot 0,525 \cdot 10^{-6} = 1,667 \cdot 10^{-6} \text{ в.о.}$$

$$T_{\text{а}} = K_{\text{ав}}^{(2)} \cdot 8760 = 1,667 \cdot 10^{-6} \cdot 8760 = 0,0146;$$

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{р}} \cdot T_{\text{м}}}{8760} = \frac{7492,202 \cdot 5786,84}{8760} = 4949,335 \text{ кВт.}$$

Приймаємо питомі збитки $Z_0 = 52,7$ грн/кВт·год:

$$Z = Z_0 \cdot P_{\text{ср}} \cdot T_{\text{а}} \cdot 10^{-3} = 52,7 \cdot 4949,335 \cdot 0,0146 \cdot 10^{-3} = 3,81 \text{ тис.грн.}$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 29 |

Для варіанту живлення повітряною лінією розрахунки виконано аналогічно, результати занесено у таблицю 5.3.

Визначаємо капітальні вкладення за двома варіантами схем зовнішнього електропостачання у вигляді таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Капітальні вкладення за варіантами схем зовнішнього електропостачання РЗФ

| № варіанту | Найменування елемента схеми | Одиниця вимірювання | Кількість | Питома вартість, тис. грн. | Загальна вартість, тис. грн. |
|------------|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------------|------------------------------|
| I | Трансформатор ТМН-6300/35 | шт. | 2 | 4000 | 8000 |
| | ВРП-35 кВ (три вимикача) | шт. | 1 | 1800 | 1800 |
| | ЛЕП-35 кВ 2хАС-70 | км | 3,4 | 456 | 1550,4 |
| | Всього | | | | 11350,4 |
| II | КЛ АСБ-10 (3х240) в траншеї | км | 6,8 | 1356 | 8540,8 |
| | Шафи 10 кВ з ВВ ВР-1 | шт. | 2 | 190 | 380 |
| | Всього | | | | 8920,8 |

Визначаємо поточні витрати за двома варіантами схем електропостачання РЗФ у вигляді таблиці 3.2. Розрахунки проводяться по двом складовим: амортизаційні відрахування та експлуатаційні витрати.

Таблиця 3.2 Розрахунок поточних витрат для схем електропостачання РЗФ

| Варіант | Найменування елементів схеми | K_j , т.грн. | H_{ai} , % | H_{ei} , % | H_{aei} , % | C_j , т.грн. |
|---------|---------------------------------|----------------|--------------|--------------|---------------|----------------|
| I | Трансформатори | 8000 | 15 | 5 | 20 | 1600 |
| | Відкритий розподільчий пристрій | 1800 | 15 | 5 | 20 | 360 |
| | Повітряна лінія | 1550,4 | 5 | 5 | 10 | 155,04 |
| | Всього | 11350,4 | | | | 2115,04 |
| II | Кабельна лінія в траншеї | 8540,8 | 5 | 5 | 10 | 854,08 |
| | Шафа 10 кВ з вимикачами | 380 | 15 | 5 | 20 | 76 |
| | Всього | 8920,8 | | | | 930,08 |

Загальні поточні витрати розраховуємо за формулою:

$$C = A + E = \frac{K_i \cdot H_a}{100} + \frac{K_i \cdot H_e}{100},$$

де K_i - вартість i -го елемента схеми електропостачання; H_a, H_e – значення норм амортизаційних та експлуатаційних відрахувань.

Розраховуємо приведені витрати ($P_{\text{в}}$) для варіантів електропостачання рудозбагачувальної фабрики:

$$P_{\text{вIвар.}} = E_{\text{н}} \cdot K_{\text{I}} + C_{\text{I}} + C_{\text{Iврт.}} + Z_{\text{I}} = 0,12 \cdot 11350,4 + 2115,04 + 4419,321 + 3,81 = 7900,219 \text{ тис. грн.}$$

$$P_{\text{вIIвар.}} = E_{\text{н}} \cdot K_{\text{II}} + C_{\text{II}} + C_{\text{IIврт.}} + Z_{\text{II}} = 0,12 \cdot 8920,8 + 930,08 + 6006,36 + 16,4 = 8023,336 \text{ тис. грн.}$$

Порівняння основних показників схем за варіантами наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3- Порівняння ТЕП варіантів схем зовнішнього електропостачання РЗФ

| Назва показника | Варіант I (тис.грн) | Варіант II (тис.грн) |
|------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Капіталовкладення | 11350,4 | 8920,8 |
| Поточні витрати | 2115,04 | 930,08 |
| Вартість втрат електричної енергії | 4419,321 | 6006,36 |
| Збитки | 3,81 | 16,4 |
| Приведені витрати | 7900,219 | 8023,336 |

Порівняння приведених витрат за варіантами свідчить, що вони відрізняються на 1,6 %. Такі варіанти вважаються рівно економічними. Вибір остаточного варіанту виконуємо виходячи з міркувань перспектив розвитку підприємства та економії в розрахунках за спожиту електроенергію. Остаточо вибираємо варіант з встановленням ГЗП на фабриці та напругою 35 кВ.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 31 |

Для внутрішньозаводських розподільчих мереж прийнято напругу 10 кВ, що є оптимальним вибором для сучасних промислових підприємств. У порівнянні з 6 кВ, напруга 10 кВ забезпечує зниження втрат електроенергії, покращує ефективність передавання потужності та дозволяє зменшити переріз кабельних ліній, що позитивно впливає на економічні показники проекту. Також напруга 10 кВ має ширшу сферу застосування та краще узгоджується з сучасним високовольтним обладнанням.

У цехових мережах для живлення силових і освітлювальних електроприймачів використовується напруга 380/220 В як стандартна і найбільш розповсюджена в Україні. Вона забезпечує ефективну роботу електрообладнання. Напруга 660 В використовується лише в окремих випадках і вимагає додаткового техніко-економічного обґрунтування.

Для заводської розподільчої мережі обрано прокладку кабельних ліній 10 кВ із використанням радіальної схеми електропостачання, що є простою у реалізації та обслуговуванні. Радіальна схема забезпечує високу надійність електропостачання, оскільки у випадку аварії чи пошкодження на одній з ліній відключається лише окремий споживач, не впливаючи на роботу інших частин підприємства. Крім того, така схема дозволяє легко масштабувати мережу та спрощує локалізацію аварій.

Живлення синхронних та асинхронних двигунів передбачено безпосередньо від шин головної знижувальної підстанції, що забезпечує стабільні параметри живлення та підвищує надійність роботи критичних технологічних установок.

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 32 |

4 КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РУДОЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ

4.1 Баланс реактивної потужності рудозбагачувальної фабрики та вибір пристроїв компенсації

Для виконання розрахунків використовуємо дані, що отримані у першому розділі роботи, таблиця 1.3.

Економічно доцільна потужність, що передається від системи:

$$Q_c = P_{p.0,4.pзф} \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 7886,528 \cdot 0,15 = 1182,98 \text{ квар.}$$

Мінімальна кількість трансформаторів потужністю 1000 кВА при коефіцієнті завантаження 0,7 :

$$n_{m.\min} = P_{p.0,4.pзф} / (k_z \cdot S_m) = 3919,744 / (0,7 \cdot 1000) = 5,59 \text{ шт.}$$

Можливо використовувати 6 трансформаторів.

Варіант I КРП при мінімальній кількості трансформаторів $n_{T\min}$.

Потужність, що передається через цехові підстанції на 0,4 кВ :

$$Q_{п1} = \sqrt{(n \cdot S_{mp} \cdot k_z)^2 - P_{p.0,4.pзф}^2} = \sqrt{(6 \cdot 1000 \cdot 0,7)^2 - 3919,744^2} = 1508,51 \text{ квар.}$$

Виходячи з балансу реактивної потужності визначаємо кількість КП на 0,4 кВ:

$$Q_{н.бск} = Q_{p.0,4.pзф} - Q_{п1} = 3090,786 - 1508,511 = 1582,275 \text{ квар}$$

З врахуванням стандартної потужності КП, приймаємо для ТП-1: 2 х УКРМ (АКУ) - 0,4-200-20 та для ТП – 2-3: 4 х УКРМ (АКУ) - 0,4-360-40. Загальна потужність $Q'_{н.бск} = 1840$ квар.

Остаточне значення передаваної потужності:

$$Q_{п.ут.} = Q_{p.0,4.pзф} - Q_{н.бск} = 3090,786 - 1840 = 1250,786 \text{ квар.}$$

Тоді в мережі 10 кВ встановлюємо:

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 33 |

$$Q_{в.бск} = Q_{р.10.рзф} - Q'_{н.бск} - Q_c = 5280,486 - 1840 - 1182,98 = 2257,51 \text{ квар}$$

Розглянемо можливість використання РП, що генерується СД компресорної в режимі перезбудження. Її максимальне значення можливо оцінити за формулою:

$$Q_{сд.мах} = n \cdot \frac{\alpha \cdot P_{ном} \cdot tg\varphi_{ном}}{\eta} = 3 \cdot \frac{1,27 \cdot 630 \cdot 0,484}{0,96} = 1210,2 \text{ квар,}$$

де n – кількість синхронних двигунів компресорної;

α – значення коефіцієнту допустимого перевантаження двигуна;

$P_{ном}$ – номінальне активне навантаження двигуна;

$tg\varphi_{ном}$ – тангенс реактивної потужності;

η - ККД ВСД.

Потужність БСК у мережі 10 кВ:

$$Q'_{в.бск} = Q_{в.бск} - Q_{мах} = 2257,51 - 1210,2 = 1047,31 \text{ квар.}$$

Враховуючи стандартну потужність високовольтних БСК, вибираємо 2хУКРМ-56-10,5 -600 У3, $Q''_{кв} = 1200$ квар. Тоді значення РП, що генерує СД:

$$Q_{сд} = Q_{в.бск} - Q''_{в.бск} = 2257,51 - 1200 = 1057,51 \approx 1058 \text{ квар.}$$

Вибір потужності БСК 0,4 кВ, 10 кВ та СД для двох інших варіантів (*варіант II* - $n_{Tmin} + 1 = 7$ та *варіант III* - $n_{Tmin} + 2 = 8$) розраховується аналогічно та представлено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Визначення потужності КП за варіантами

| Варіант | n_T | $Q_{п.ут.},$ квар | $Q'_{н.бск},$ квар | $Q''_{в.бск},$ квар | $Q_{сд},$ квар |
|----------------|-------|----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| n_{Tmin} | 6 | 1250,786 | 1840 | 1200 | 1058 |
| $n_{Tmin} + 1$ | 7 | 2940,786 | 150 | 2800 | 1148 |
| $n_{Tmin} + 2$ | 8 | 3999,45 | 0 | 3000 | 1098 |

Визначаємо втрати активної потужності (від передачі реактивної потужності) у різних елементах схеми для варіанта n_{Tmin} :

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 34 |

- у цехових трансформаторах:

$$\Delta P_{\text{тр}} = Q_{\text{ц.у.т.}}^2 \cdot R_{\text{ек}} / U_{\text{н}}^2 = 1250,786^2 \cdot 176,67 \cdot 10^{-6} / 10^2 = 2,76 \text{ кВт},$$

$$\text{де } R_{\text{ек}} = (\Delta P_{\text{кз}} \cdot U_{\text{н}}^2) / (N_{\text{тр}} \cdot S_{\text{н тр}}^2) = (10,6 \cdot 10^2) / (6 \cdot 1000^2) = 176,67 \cdot 10^{-6} \text{ кОм};$$

- у низьковольтних БСК:

$$\Delta P_{\text{н.бск.}} = \Delta P_{\text{тит}} \cdot Q'_{\text{н.бск.}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1840 = 8,28 \text{ кВт};$$

- високовольтних БСК:

$$\Delta P_{\text{в.бск.}} = \Delta P_{\text{тит}} \cdot Q'_{\text{в.бск.}} = 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot 1200 = 3,6 \text{ кВт};$$

- у синхронних двигунах:

$$\Delta P_{\text{сд}} = Q_{\text{сд}} \cdot \left(\frac{D_1}{Q_{\text{ном}}} + \frac{2 \cdot D_2 \cdot Q_{\text{сд}}}{Q_{\text{ном}}^2 \cdot n} \right) + Q_{\text{сд}} \cdot \frac{D_2}{Q_{\text{ном}}^2 \cdot n} =$$

$$= 1057,51 \cdot \left(\frac{2,47}{304,92} + \frac{2 \cdot 4,46 \cdot 1057,51}{304,92^2 \cdot 3} \right) + 1057,51 \cdot \frac{4,46}{304,92^2 \cdot 3} = 44,35 \text{ кВт}.$$

Визначаємо вартість елементів схеми для варіанта I (n_{Tmin}):

- низьковольтних БСК:

$$K_{\text{н.бск}} = \sum(n_{\text{н.бскі}} \cdot k_{\text{н.бскі}}) = 2 \cdot 81 + 4 \cdot 123,8 = 656 \text{ тис. грн};$$

- високовольтних БСК:

$$K_{\text{в.бск}} = \sum(n_{\text{в.бскі}} \cdot k_{\text{в.бскі}}) = 2 \cdot 1245 = 2490 \text{ тис. грн};$$

- КТП:

$$K_{\text{кТП}} = \sum(n_{\text{кТПі}} \cdot k_{\text{кТПі}}) = 3 \cdot 1664 = 4992 \text{ тис. грн}.$$

Аналогічні розрахунки для другого та третього варіантів компенсації наведено у таблиці 4.2.

На підставі проведених вище розрахунків визначаємо приведені витрати за варіантами:

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 35 |

$$Z_i = E_H \cdot (K_{н.бскі} + K_{в.бскі} + K_{кТПі}) + (\Delta P_{н.бск.і} + \Delta P_{в.бск.і} + \Delta P_{сд.і} + \Delta P_{тп.і}) \cdot C_0 \cdot \tau; \quad (4.1)$$

Таблиця 4.2 - Розрахункові витрати для II та III варіантів КРП

| Варіант | n_T | $S_{тр}$, кВА | $R_{ек}$, Ом | $\Delta P_{тп}$, кВт | $\Delta P_{н.бск}$, кВт | $\Delta P_{в.бск}$, кВт | $\Delta P_{сд}$, кВт | $K_{н.бск}$, тис.грн | $K_{в.бск}$, тис.грн | $K_{кТП}$, тис.грн |
|--------------|-------|-------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| n_{Tmin} | 6 | 1000 | 0,177 | 2,76 | 8,28 | 3,6 | 44,35 | 656 | 2430 | 4992 |
| n_{Tmin+1} | 7 | 1000 | 0,151 | 13,09 | 0,675 | 8,4 | 51,42 | 85,4 | 2824,1 | 5824 |
| n_{Tmin+2} | 8 | 1000 | 0,133 | 72,56 | 0 | 9,0 | 47,43 | 0 | 3028,6 | 6656 |

$$Z_I = 0,12 \cdot (656 + 2490 + 4992) + (8,28 + 3,6 + 44,35 + 2,76) \cdot 5140,44 \cdot 10^{-3} \times \\ \times 4325,38 = 1312,581 \text{ тис.грн.}$$

$$Z_{II} = 0,12 \cdot (85,4 + 2824,1 + 5824) + (0,675 + 8,4 + 51,42 + 13,09) \cdot 5140,44 \cdot 10^{-3} \times \\ \times 4325,38 = 1637,163 \text{ тис.грн.}$$

$$Z_{III} = 0,12 \cdot (0 + 3028,6 + 6656) + (0 + 9 + 47,43 + 72,56) \cdot 5140,44 \cdot 10^{-3} \times \\ \times 4325,38 = 2869,172 \text{ тис.грн.}$$

За приведеними витратами приймаємо до встановлення перший варіант КРП.

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв на РЗФ

Визначаємо реактивну потужність БСК у мережі 0,4 кВ РЗФ:

$$Q_n = \sqrt{(n \cdot S_{мп} \cdot k_3)^2 - P_{р.0,4}^2};$$

$$Q_{бск} = Q_n - Q_{п};$$

- для ТП1:

$$Q_{n.mn1} = \sqrt{(2 \cdot 1000 \cdot 0,7)^2 - 1223,84^2} = 679,87 \text{ квар};$$

$$Q_{бск.тп1} = 1076,72 - 679,87 = 396,85 \text{ квар.}$$

Встановлюємо: 2 x УКРМ (АКУ) - 0,4-200-20 [8]. Виконуємо аналогічні розрахунки для ТП2 та 3. Результати зведено до таблиці 4.3.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 36 |

Таблиця 4.3 – Характеристика БСК 0,4 кВ

| ТП | n_T | $P_{p.тпi},$ кВт | $Q_{p.тпi},$ квар | $Q_{п.тпi},$ квар | $Q_{бск.тпi},$ квар | $n_{бск}$ | Тип БСК | $\Sigma Q_{бск},$ квар |
|----|-------|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-----------|-------------------------|---------------------------|
| 1 | 2 | 1223,84 | 1076,72 | 679,87 | 396,85 | 2 | УКРМ (АКУ) - 0,4-200-20 | 400 |
| 2 | 2 | 1343,33 | 1053,52 | 394,29 | 659,22 | 2 | УКРМ (АКУ) - 0,4-360-40 | 720 |
| 3 | 2 | 1343,33 | 1053,52 | 394,29 | 659,22 | 2 | УКРМ (АКУ) - 0,4-360-40 | 720 |

На напрузі 10 кВ, відповідно до розрахунків, встановлюються: 2хУКРМ-56-10,5 -600 УЗ [9].

В цьому розділі визначено баланс реактивної потужності на рудозбагачувальній фабриці. Перевірено виконання вимоги системи:

$$tg\varphi_{pзф} = \frac{P_{p.пзф}}{Q_{p.пзф}} = \frac{1182,486}{7886,528} = 0,1499 \leq tg\varphi_{сист.} = 0,15 \text{ квар.}$$

Для забезпечення необхідного рівня компенсації на фабриці встановлено низьковольтні БСК ($Q_{н.бск}=1840$ квар), високовольтні БСК ($Q_{в.бск}=1200$ квар) та використовується реактивна потужність, що генерується високовольтними СД компресорів, що працюють в режимі перезбудження ($Q_{сд}=1058$ квар).

5 ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ РЗФ

5.1 Вибір кількості, потужності та місця розташування трансформаторів ГЗП і цехових підстанцій РЗ фабрики

Головна знижувальна підстанція (ГЗП) і цехові трансформаторні підстанції (ТП) є ключовими елементами системи електропостачання підприємства. Їхнє правильне розміщення безпосередньо впливає на надійність, енергоефективність і економічність всієї електроенергетичної інфраструктури.

Положення ГЗП та ТП визначається характером і величиною навантажень, їх просторовим розміщенням на генеральному плані підприємства, а також технічними, архітектурними та експлуатаційними умовами. Серед них - компоновка виробничих приміщень, розташування технологічного обладнання, умови охолодження, пожежна безпека, електробезпека та чинники навколишнього середовища.

Особливу увагу при проектуванні ГЗП слід приділяти вибору силових трансформаторів, адже вони повинні забезпечувати надійну роботу навіть в умовах аварійного та систематичного перевантаження. Відповідно до нормативних вимог, трансформатори мають працювати з перевантаженням до 40% протягом не більше 5 діб у разі аварії. При цьому початковий коефіцієнт завантаження трансформатора не повинен перевищувати 0,93, а тривалість щоденного перевантаження - до 6 годин.

Тоді потужність трансформатора ГЗП:

$$S_{\text{т.розр.}} = S_{\text{max}} / ((n-1) \cdot 1,4) = 7575,95 / ((2-1) \cdot 1,4) = 5411,39 \text{ кВА} .$$

Приймаємо трансформатор ТМН-6300/35/10, зовнішній вигляд якого та основні технічні характеристики наведено на рис. 5.1 [11].

Завантаження трансформаторів в нормальному режимі:

$$K_z = \frac{S_p}{2 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{7575,95}{2 \cdot 6300} = 0,601.$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 38 |



Технічні характеристики:

- номінальна потужність $S_{\text{ном}}=6300$ кВА;
- висока напруга $U_{\text{вн}}=35$ кВ;
- низька напруга $U_{\text{нн}}=11$ кВ;
- втрати неробочого ходу $\Delta P_{\text{хх}}=9,2$ кВт;
- втрати короткого замикання $\Delta P_{\text{кз}}=46,5$ кВт;
- напруга короткого замикання $U_{\text{к}}\% =7,5$ %;
- струм холостого ходу $I_{\text{хх}}=0,9$ %;
- межі регулювання $\pm 6 \times 1,5$.

Рис. 5.1 - Зовнішній вигляд та основні технічні характеристики ТР ТМН-6300/35/10

Аварійне навантаження розраховується з урахуванням виходу з ладу одного з трансформаторів, і в такому режимі допускається відключення лише споживачів третьої категорії, тоді як споживачі першої та другої категорій повинні залишатися забезпеченими електроенергією. Відключення споживачів III-ї категорії не потрібне:

$$S_{\text{ав.}} = 1,4 \cdot S_{\text{Н}} = 1,4 \cdot 6300 = 8820 \text{ кВА} > S_{\text{р.рзф}} = 7575,95 \text{ кВА.}$$

Особливо важливе значення має вибір цехових трансформаторних підстанцій, оскільки саме вони забезпечують безпосереднє живлення основного виробничого електрообладнання - як силових установок, так і систем освітлення. Оптимальний вибір ТП залежить від характеру електричних навантажень цеху, просторової структури виробництва, площі розміщення споживачів та технологічного розташування устаткування. Обов'язково враховувати також категорію надійності споживачів, відстані до найбільш навантажених точок, умови охолодження трансформаторів, пожежну безпеку та зручність експлуатаційного обслуговування, можливість інтеграції ТП у загальну структуру будівлі.

ТП повинні забезпечувати достатній рівень резервування, можливість роботи в режимі аварійного живлення, а також відповідати вимогам щодо

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 39 |

короткочасних перевантажень, якщо це передбачено технологічним циклом. При цьому важливо забезпечити компактність, доступність та безпечність експлуатації трансформаторної підстанції в умовах цеху. Таким чином, технічно обґрунтований вибір цехових трансформаторних підстанцій є вирішальним для стабільної та ефективної роботи електроенергетичної системи РЗФ.

Виконаємо розрахунок потужності цехової ТП на прикладі ТП1. Вибір номінальної потужності здійснюємо з урахуванням систематичного та аварійного перевантаження [1]:

$$S_{\text{НОМ}} \geq \frac{S_p}{n \cdot K_1} = \frac{1447,95}{2 \cdot 1,09} = 664,99 \text{ кВА.}$$

$$S_{\text{НОМ}} \geq \frac{K_{I,II} \cdot S_p}{(n-1) \cdot K_2} = \frac{0,9 \cdot 1447,95}{(2-1) \cdot 1,4} = 930,827 \text{ кВА.}$$

Приймаємо трансформатор ТМГ-1000/10/0,4, його зовнішній вигляд якого та технічні характеристики представлено на рис. 5.2 [10].



Технічні характеристики:

- $S_{\text{НОМ}} = 1000$ кВА;
- $U_{\text{ВН}} = 10$ кВ;
- $U_{\text{НН}} = 0,4$ кВ;
- втрати НХ $\Delta P_{\text{ХХ}} = 770$ Вт;
- втрати КЗ $\Delta P_{\text{КЗ}} = 10500$ Вт;
- напруга КЗ $U_{\text{К}} \% = 6,0$ %;
- струм НХ $I_{\text{ХХ}} = 1,2$ %.

Рис. 5.2 – Зображення та технічні характеристики трансформатору ТМГ-1000/10/0,4 ЕКО

Коефіцієнт завантаження для ТР ТП 1:

- в нормальному режимі:

| | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|------|
| | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | 40 |

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{mp}} = \frac{1447,954}{2 \cdot 1000} = 0,724;$$

- в аварійному режимі:

$$K_3 = \frac{K_{I,II} \cdot S_p}{S_{ном}} = \frac{0,9 \cdot 1447,95}{1000} = 1,30 < 1,4.$$

Розрахунки для трансформаторів ТП-2 та ТП-3 аналогічні та наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1- Вибір трансформаторів цехових ТП РЗФ

| № ТП | Марка ТР | P_p , кВт | Q_p , квар | S_p , кВА | $N_{тр} \times S_{тр}$, кВА | K_3 |
|------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------------------------|-------|
| 1 | ТМГ 1000 ЕКО | 1235,76 | 754,62 | 1447,95 | 2x1000 | 0,724 |
| 2 | ТМГ 1000 ЕКО | 1355,26 | 411,42 | 1416,33 | 2x1000 | 0,708 |
| 3 | ТМГ 1000 ЕКО | 1355,26 | 411,42 | 1416,33 | 2x1000 | 0,708 |

5.2 Компоновка та місце розташування цехових ТП РЗ фабрики

Для рудозбагачувальної фабрики оптимальним вибором буде силовий трансформатор типу ТМГ потужністю від 1000 кВА, напругою 10/0,4 кВ, з масляним охолодженням та герметичним виконанням.

Герметичні трансформатори типу ТМГ мають конструктивні переваги, що забезпечують високу надійність та мінімальні експлуатаційні витрати. Завдяки герметичному виконанню масло повністю ізольоване від зовнішнього повітря, що запобігає його окисленню та значно подовжує термін служби трансформатора. Це дозволяє відмовитися від регулярного аналізу, регенерації масла і профілактичного обслуговування, знижуючи витрати на експлуатацію.

Крім того, трансформатори ТМГ оснащені високовольтним перемикачем ступенів напруги, що забезпечує регулювання в межах $\pm 2 \times 2,5\%$ від номінальної напруги. Це дозволяє оптимізувати параметри живлення споживачів у разі змін навантаження або нестабільності в зовнішній мережі. Перемикання виконується в знеструмленому стані, що є безпечним і простим у застосуванні.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 41 |

Встановлюємо комплектні трансформаторні підстанції (КТП), які мають низку технічних та експлуатаційних переваг. Вони постачаються у зібраному вигляді, що скорочує терміни монтажу та пусконаладжувальних робіт, займають мінімум місця та можуть бути встановлені безпосередньо біля споживачів, що зменшує довжину кабельних ліній і втрати, виконані у герметичних корпусах, що забезпечує захист від вологи, пилу та впливу навколишнього середовища, оснащені вбудованими системами захисту та автоматики.

Для рудозбагачувальної фабрики трансформаторні підстанції повинні бути пило- та вологозахищені, стійкі до температурних і вібраційних впливів, мати антикорозійний захист, оснащені якісним захистом та автоматикою, проектуватись з урахуванням аварійного резервування та надійності живлення. Саме тому для таких умов переважно використовуються герметичні КТП бетонного або металевих типу.

Приймаємо комплектні трансформаторні підстанції блочного типу КТПБ [12] та встановлюємо їх прибудованими до корпусу.

Технічні вимоги до КТП при прибудованому встановленні: вогнестійкі конструкції корпусу або протипожежні перегородки; наявність вентиляції або охолодження; доступність для обслуговування трансформатора та комутаційної апаратури; захист від несанкціонованого доступу; наявність заземлення та блискавкозахисту.

КТП доцільно розміщувати якнайближче до основних груп електроприймачів, що дозволяє мінімізувати довжину кабельних ліній, зменшити втрати електроенергії та забезпечити стабільність напруги у навантаженні. Прийняте розміщення КТП: 1- прибудована до корпусу збагачувальної фабрики 1 стадії, 2; 3 - прибудовані до корпусу збагачувальної фабрики 2 стадії (генплан РЗФ).

Таким чином, правильний вибір типу і потужності силових трансформаторів та КТП - це критично важливе завдання, яке враховує навантаження, резервування, можливість перевантажень і специфіку експлуатації в умовах конкретного промислового підприємства.

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 42 |

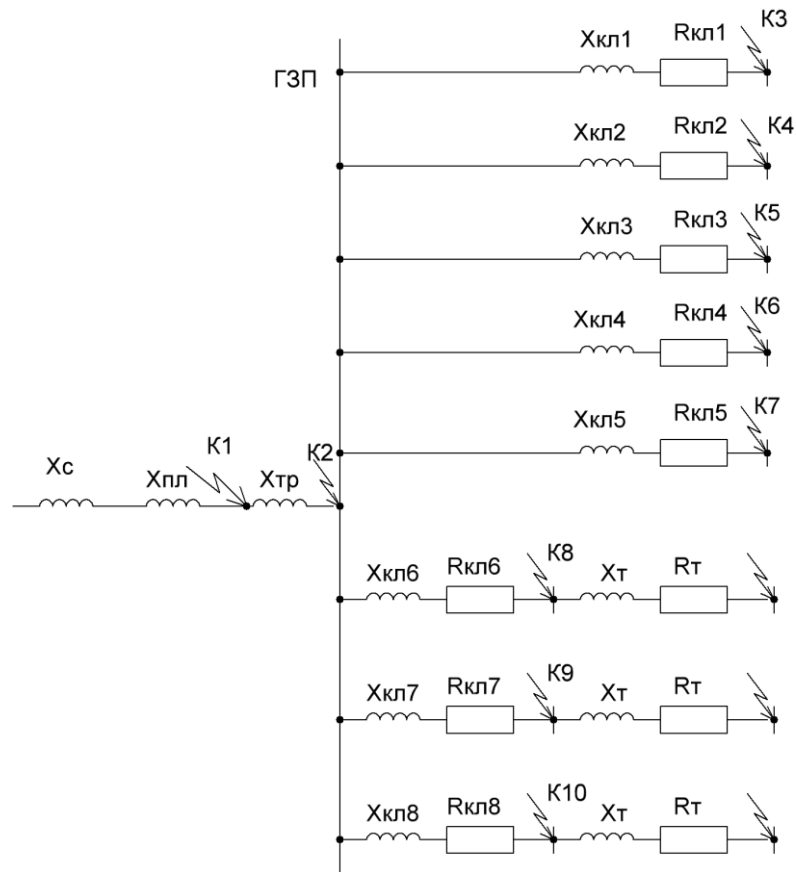


Рис.6.1 – Схема заміщення СЕП для визначення струмів КЗ

Для правильного вибору і перевірки електричних апаратів, струмопровідних систем в межах розрахунку короткого замикання необхідно визначити три основні види струмів КЗ [1,3] :

- надперехідний струм короткого замикання (I'') – діюче значення періодичної складової струму протягом першого періоду після виникнення КЗ, яке визначає навантаження на електрообладнання на початковому етапі аварії;
- ударний струм (i_y) – максимальне миттєве значення повного струму КЗ, що враховує як періодичну, так і аперіодичну складові. Цей параметр критичний для механічної стійкості обладнання;
- усталений струм короткого замикання (I_∞) - діюче значення струму після затухання аперіодичної складової, який характеризує тепловий вплив на апаратуру та кабельні лінії при тривалому КЗ.

Ці параметри є обов'язковими до визначення для забезпечення надійності та безпеки роботи елементів системи електропостачання.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 44 |

6.1 Розрахунок струмів короткого замикання в мережі РЗФ

Для виконання розрахунку струмів короткого замикання використовуються такі вхідні дані:

- по енергосистемі: потужність короткого замикання $S_{кз}=175$ МВА;
- по повітряній лінії електропередачі: застосовується провід АС-95, довжина лінії $L=3,4$ км;
- по трансформатору: тип ТМН-6300/35 (параметри наведено у п'ятому розділі);
- по кабельних лініях: зазначаються тип кабелю та його довжина.

Розрахунок струмів КЗ проводиться у відносних одиницях, приведених до базисної потужності, яку приймаємо $S_б=175$ МВА. На цій основі обчислюються базисне значення струму, опори системи, повітряної та кабельних ліній, трансформатору:

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{б1}} = \frac{175}{\sqrt{3} \cdot 35} = 2,887 \text{ кА};$$

$$I_{б2} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{б2}} = \frac{175}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 9,623 \text{ кА};$$

$$x_{л1} = x_0 \cdot \ell_1 \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0,4 \cdot 3,4 \cdot \frac{175}{35^2} = 0,194;$$

$$r_{л1} = r_0 \cdot \ell_1 \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0,32 \cdot 3,4 \cdot \frac{175}{35^2} = 0,155;$$

$$x_c = \frac{S_б}{S_{кз}} = \frac{175}{175} = 1; \quad x_T = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{175}{6,3} = 2,083.$$

Опори КЛ розраховуємо аналогічно та наводимо їх в таблиці 6.1. Значення результуючого опору до точки K_1 :

$$x_{к1} = x_c + x_{л1} = 1 + 0,1943 = 1,194; \quad r_{к1} = 0,1554;$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 45 |

$$z_{K1} = \sqrt{(x_{K1}^2 + r_{K1}^2)} = \sqrt{1,1943^2 + 0,1554^2} = 1,204.$$

Таблиця 6.1- Розрахунок опорів КЛ -1 – КЛ-8.

| № КЛ | Позначення | l, км | R _о , Ом/км | X _о , Ом/км | R, Ом | X, Ом | R*б | X*б |
|------|------------|-------|------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| КЛ-1 | ГЗП-АД1 | 0,114 | 0,28 | 0,086 | 0,032 | 0,010 | 0,029 | 0,009 |
| КЛ-2 | ГЗП-АД2 | 0,12 | 0,28 | 0,086 | 0,034 | 0,010 | 0,030 | 0,009 |
| КЛ-3 | ГЗП-АД3 | 0,102 | 0,28 | 0,086 | 0,029 | 0,009 | 0,026 | 0,008 |
| КЛ-4 | ГЗП-СД1 | 0,042 | 0,28 | 0,086 | 0,012 | 0,004 | 0,011 | 0,003 |
| КЛ-5 | ГЗП-СД2 | 0,06 | 0,28 | 0,086 | 0,017 | 0,005 | 0,015 | 0,005 |
| КЛ-6 | ГЗП-ТП-1 | 0,082 | 0,28 | 0,086 | 0,023 | 0,007 | 0,021 | 0,006 |
| КЛ-7 | ГЗП-ТП-2 | 0,14 | 0,28 | 0,086 | 0,039 | 0,012 | 0,035 | 0,011 |
| КЛ-8 | ГЗП-ТП-3 | 0,03 | 0,28 | 0,086 | 0,008 | 0,003 | 0,008 | 0,002 |

Визначаємо надперехідні струми в точці K1 без врахування підживлення від високовольтних синхронних двигунів:

$$I_{K1}'' = \frac{I_{б1}}{z_{K1}} = \frac{2,887}{1,204} = 2,397 \text{ кА.}$$

Ударні струми в точках K₁, K₂ без врахування підживлення від високовольтних асинхронних двигунів:

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot I_{K1}'' \cdot \left(1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} \right) = \sqrt{2} \cdot 2,397 \cdot \left(1 + e^{\frac{-0,01}{0,02}} \right) = 5,586 \text{ кА.}$$

Періодичні складові струму КЗ, що генеруються ВД :

- АД 500 кВт:

$$I_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \cdot \eta} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,88 \cdot 0,947} = 32,99 \text{ А.}$$

- періодичної складової струму КЗ (від АД):

$$I_{де} = n \cdot \kappa_n \cdot I_{НОМ} = 3 \cdot 5,7 \cdot 0,033 = 0,752 \text{ кА;}$$

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 46 |

$$i_{yAD} = \kappa_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{AD}'' = 1,56 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,752 = 1,659 \text{ кА.}$$

- АД 630 кВт:

$$I_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \cdot \eta} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,88 \cdot 0,951} = 41,39 \text{ А.}$$

$$I_{\partial e} = n \cdot \kappa_n \cdot I_{НОМ} = 2 \cdot 5,7 \cdot 0,041 = 0,472 \text{ кА};$$

$$i_{yAD} = \kappa_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{AD}'' = 1,56 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,472 = 1,041 \text{ кА.}$$

- СД 630 кВт:

$$I_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ} \cdot \eta} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,956 \cdot 0,89} = 40,714 \text{ А.}$$

$$I_{CD}'' = n \cdot \frac{E_*''}{x_{*d}} \cdot I_H = 2 \cdot \frac{1,1}{0,2} \cdot 0,041 = 0,448 \text{ кА.}$$

$$i_{yCD} = \kappa_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{CD}'' = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,448 = 1,139 \text{ кА.}$$

- загальний струм підживлення (АД та СД):

$$I_{CD,AD}'' = 0,564 + 0,472 + 0,448 = 1,484 \text{ кА};$$

$$i_{y.AD,CD} = 1,245 + 1,041 + 1,139 = 3,426 \text{ кА.}$$

З урахуванням підживлювального струму від високовольтних двигунів, який вважається однаковим у всіх точках, струми короткого замикання набувають наступних значень:

$$I_{\Sigma K2}'' = I_{K2}'' + I_{ВД}'' = 2,933 + 1,484 = 4,416 \text{ кА};$$

$$i_{\Sigma yK2} = i_{yK2} + i_{yВД} = 5,673 + 3,426 = 9,099 \text{ кА.}$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 47 |

Розрахунок струмів КЗ в інших точках виконується аналогічно, результати зведені до таблиці 6.2.

Таблиця 6.2- Результати розрахунків струму КЗ.

| № ТКЗ | $X_{\text{сум}}$ | $R_{\text{сум}}$ | $Z_{\text{сум}}$ | I'' , кА | | $i_{\text{уд}}$, кА | |
|-------|------------------|------------------|------------------|------------|------------------|----------------------|----------------------|
| | | | | без ВД | з урахуванням ВД | I'' , кА | $i_{\text{уд}}$, кА |
| К1 | 1,194 | 0,155 | 1,204 | 2,397 | 5,603 | | |
| К2 | 3,278 | 0,155 | 3,281 | 2,933 | 5,673 | 4,416 | 9,099 |
| К3 | 3,286 | 0,184 | 3,292 | 2,923 | 5,656 | 4,407 | 9,081 |
| К4 | 3,287 | 0,186 | 3,292 | 2,923 | 5,655 | 4,407 | 9,080 |
| К5 | 3,286 | 0,181 | 3,291 | 2,924 | 5,658 | 4,408 | 9,083 |
| К6 | 3,281 | 0,166 | 3,285 | 2,929 | 5,667 | 4,413 | 9,092 |
| К7 | 3,282 | 0,171 | 3,287 | 2,928 | 5,664 | 4,412 | 9,090 |
| К8 | 3,284 | 0,176 | 3,289 | 2,926 | 5,661 | 4,410 | 9,086 |
| К9 | 3,288 | 0,191 | 3,294 | 2,921 | 5,652 | 4,405 | 9,077 |
| К10 | 3,280 | 0,163 | 3,284 | 2,930 | 5,669 | 4,414 | 9,094 |

6.2 Вибір кабелів високовольтної мережі фабрики

Виконуємо вибір КЛ від ГЗП до ТП-1.

$$I_{p.mn-1} = \frac{S_{p.mn-1}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{1447,954}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 39,808 \text{ А}$$

Планується до прокладання КЛ АСБ-10 [7] перерізом 3х35 мм².

Характеристики: $I_{\text{тр.доп.}} = 115 \text{ А}$; $\Delta p_0 = 42 \text{ кВт/км}$.

Виконуємо перевірку в нормальному та аварійному режимах роботи:

$$I_p = 39,808 \text{ А} \leq k_n \cdot I_{\text{тр.доп.}} = 0,9 \cdot 115 = 103,5 \text{ А};$$

$$I_{p.ав.} = 2 \cdot I_p = 2 \cdot 39,808 = 79,616 \text{ А} \leq k_{ав.н} \cdot k'_n \cdot I_{\text{тр.доп.}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 115 = 143,75 \text{ А}.$$

$$k_3 = \frac{I_p}{I_{\text{тр.доп.}}} = \frac{39,808}{115} = 0,346.$$

З цим кабелем завод надійно працює в аварійному режимі.

Мінімальна площа поперечного перерізу кабелю за умовою термічної стійкості:

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 48 |

$$F_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = \frac{\sqrt{19,989 \cdot 10^6}}{94} = 47,562 \text{ мм}^2;$$

$$B_k = I^2 (t_B + t_{P3 \max}) = 4,416^2 \cdot (0,025 + 1) = 19,989 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Тобто, остаточно приймаємо переріз КЛ 50 мм². Вибір кабельних ліній до цехових ТП аналогічний та зведено в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 - Вибір КЛ до цехових ТП, високовольтних АД та СД РЗФ

| КЛ (від-до) | S _р , кВА | n | I _{р.норм} , А | I _{р.ав} , А | F _{ту} , мм ² | K _{пр} | K' _{пр} | K _{ап} |
|-------------|----------------------|---|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| ГЗП-ТП1 | 1447,95 | 2 | 39,808 | 79,617 | 70 | 0,9 | 1 | 1,25 |
| ГЗП-ТП2 | 1416,33 | 2 | 38,939 | 77,878 | 70 | 0,9 | 1 | 1,25 |
| ГЗП-ТП3 | 1416,33 | 2 | 38,939 | 77,878 | 70 | 0,9 | 1 | 1,25 |
| ГЗП-СД1 | 700 | 1 | 38,490 | 38,49 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |
| ГЗП-СД2 | 700 | 1 | 38,490 | 38,49 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |
| ГЗП-СД3 | 700 | 1 | 38,490 | 38,49 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |
| РП1-АД1 | 700 | 1 | 38,490 | 38,49 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |
| РП1-АД2 | 700 | 1 | 38,490 | 38,49 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |
| РП1-АД3 | 543 | 1 | 29,857 | 29,857 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |
| РП1-АД4 | 543 | 1 | 29,857 | 29,857 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |
| РП1-АД5 | 543 | 1 | 29,857 | 29,857 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |
| РП1-АД6 | 543 | 1 | 29,857 | 29,857 | 70 | 1 | 1 | 1,25 |

Продовження таблиці 6.3.

| КЛ (від-до) | I _{доп} , А | K _{пр} ·I _{доп} , А | K' _{пр} ·K _{ап} ·I _{доп} , А | Марка та переріз КЛ |
|-------------|----------------------|---------------------------------------|---|---------------------|
| ГЗП-ТП1 | 165 | 148,5 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| ГЗП-ТП2 | 165 | 148,5 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| ГЗП-ТП3 | 165 | 148,5 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| ГЗП-СД1 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| ГЗП-СД2 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| ГЗП-СД3 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| РП1-АД1 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| РП1-АД2 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| РП1-АД3 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| РП1-АД4 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| РП1-АД5 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |
| РП1-АД6 | 165 | 165 | 185,6 | АСБ-10 (3x70) |

6.3 Вибір високовольтного обладнання

Вибір вимикачів. Вимикачі для мереж з напругою понад 1000 В підбираються з урахуванням номінальних характеристик, типу встановлення, значення робочого струму та здатності до комутації струмів. Додатково проводиться перевірка вимикачів на термічну та електродинамічну стійкість при наскрізних струмах короткого замикання, а також за критеріями дії відновлювальної напруги.

Для сторони 35 кВ обґрунтовано обирається вимикач типу ВБЗЕ-35 з електромагнітним приводом. Детальний вибір наведено у таблиці А1 додатку А.

Для всіх елементів системи електропостачання напругою 10 кВ до встановлення обрано вакуумні вимикачі серії ВР-1. Для ввідного вимикача комплектного розподільчого пристрою (ЗРУ) 10 кВ прийнято тип ВР-1-10-20/1000У2. Параметри вибору наведено у таблиці А2 додатку А.

Для секційного вимикача, електроприводів асинхронних і синхронних двигунів, а також для захисту відхідних ліній на трансформаторних підстанціях доцільно використовуються вимикачі типу ВР-1-10-20/630У2 з номінальним струмом 630 А. Узагальнені дані вибору наведено в таблиці А3 додатку А.

Вибір комплектного розподільчого пристрою. Усі вимикачі на напругу 10 кВ розміщені в стандартних шафах комплектного розподільчого пристрою внутрішньої установки типу КУ-10. Технічні параметри цих КРП наведені в таблиці А4 додатку А.

Вибір роз'єднувачів. Для встановлення обираємо роз'єднувач типу РНД(3)-35/630Т1. Результати вибору роз'єднувачів на напругу 35 кВ подано в таблиці А5 додатку А.

Вибір трансформатора власних потреб у розподільчому пристрої 10 кВ здійснюється з урахуванням фактичного навантаження споживачів власних потреб, а також коефіцієнтів завантаження та одночасності. Щоб визначити необхідну потужність трансформатора, розраховується сумарна потужність усіх споживачів (таблиці А6 додатку А) із урахуванням коефіцієнта попиту $K_c=0,8$, який об'єднує вплив одночасності та рівня завантаження:

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 50 |

$$S_{p,вн} = k_n \cdot \sqrt{P_{вн}^2 + Q_{вн}^2} = 0,8 \cdot \sqrt{28,8^2 + 13,38^2} = 31,76 \text{кВ} \cdot \text{А}.$$

Потім вибір трансформатора здійснюється за спрощеною формулою:

$$S_{тр} \geq S_{розр} / 1,4 = 31,76 / 1,4 = 22,69 \text{кВА}.$$

Остаточню обираємо потужність ТВП:

$$S_{тр.вп.} = 25 \text{кВА} \geq S_{р.вп.потр.} / 2 = 31,76 / 2 = 15,88 \text{кВА}.$$

Вибір обмежувачів перенапруги. Обмежувачі перенапруги використовуються для надійного захисту ізоляції електрообладнання від грозових і комутаційних перенапруг. Їхнє встановлення є обов'язковим на всіх рівнях напруги, щоб запобігти пошкодженню обладнання та забезпечити стабільну роботу системи електропостачання.

На стороні високої напруги (35 кВ) застосовуються полімерні обмежувачі перенапруги типу ОПНп-35/40,5/10/2 УХЛ1, які призначені для захисту апаратури в мережах з ізолюваною або компенсованою нейтраллю змінного струму (50 Гц). Вони ефективно стримують вплив як атмосферних, так і комутаційних перенапруг. Обмежувачі цього типу придатні для зовнішнього використання в умовах помірного і холодного клімату (від -60 до +60 °С).

На стороні 10 кВ для розподільчих пристроїв передбачено встановлення обмежувачів типу ОПНп-10/12/1 УХЛ1, які виконують аналогічну захисну функцію для обладнання нижчого класу напруги.

Вибір запобіжників. У шафах комплектних розподільчих пристроїв (КРП) встановлюються запобіжники типу ПКТ, головне призначення яких здійснювати захист трансформаторів власних потреб від струмів перевантаження та короткого замикання. Завдяки своїй чутливості та здатності швидко реагувати на надструми, ці запобіжники забезпечують надійність і безпечну експлуатацію системи електропостачання.

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | | 51 |

Крім того, для захисту трансформаторів напруги застосовуються запобіжники типу ПКТН, які спеціально розроблені для обмеження наслідків аварійних режимів у колах вторинної напруги.

Вибір трансформаторів струму. З урахуванням вимог ПУЕ, у мережах напругою 10–35 кВ із ізольованою нейтраллю трансформатори струму (ТС) встановлюються у фазах А та С. У мережах класу 35–220 кВ доцільним є використання трансформаторів струму, інтегрованих у високовольтні вводи силових трансформаторів. Для напруги 6–10 кВ рекомендовано обирати ТС, якими комплектуються шафи комплектних розподільчих пристроїв (КРПЗ). Вибір та перевірку ТС виконуємо за методикою, що наведено в [1,6].

На стороні вводу 35 кВ доцільно встановити трансформатори струму типу ТВ-35-100/5, інтегровані у високовольтний ввід силового трансформатора. Список приладів, що підключаються, наведено в таблиці А.7. Перевірку ТС за умовами вибору на ввіді 35 кВ наведено в таблиці А.8.

Для встановлення на ввіді 10 кВ обираємо трансформатори струму типу ТЛК-10-600У3. Список приладів, що підключаються на цьому ввіді, наведено в таблиці А.9.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 52 |

7 АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНЬ ТА ЗАХИСТУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ

7.1 Особливості застосування високовольтних синхронних двигунів на компресорних станціях

Високовольтні синхронні двигуни (ВСД) широко застосовуються як привід компресорів у різних галузях промисловості, оскільки вони забезпечують високу ефективність, стабільність роботи та енергетичну вигідність.

Застосування ВСД у якості приводу компресорного агрегату дає змогу отримати висока потужність та енергоефективність, високий ККД (до 98%), що дозволяє економити електроенергію при тривалій роботі. СД мають постійну швидкість обертання, високий пусковий момент, дозволяють реалізувати керований запуск, зменшуючи механічні навантаження на компресор.

Суттєвою перевагою СД є їх здатність працювати в режимі генерації реактивної потужності, що покращує коефіцієнт потужності та зменшує втрати в мережі. ВСД мають тривалий термін служби (до 30 років і більше) та можливість роботи у важких умовах.

У разі, якщо компресор потребує змінної продуктивності, ВСД можна використовувати з перетворювачами частоти, що забезпечує плавне регулювання швидкості.

Високовольтні синхронні двигуни є оптимальним вибором для компресорних станцій за рахунок їх ефективності, надійності та можливості роботи з випереджаючими коефіцієнтами потужності, що особливо важливо для енергоємних процесів. Варіанти підключення ВСД наведено на рис 7.1.

Стиснене повітря, вироблене компресорами використовується в різних технологічних процесах рудозбагачувальних фабрик:

- пневмотранспорт: переміщення сировини та продуктів збагачення;
- пневмоприводи: керування механізмами, такими як заслінки, клапани та інші виконавчі пристрої;
- очищення обладнання: видалення пилу та залишків матеріалів з поверхонь машин і механізмів;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 53 |

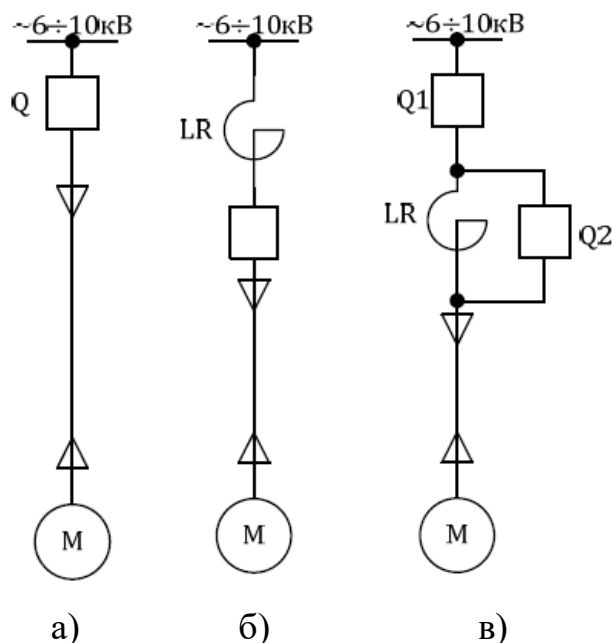


Рис. 7.1 – Варіанти підключення ВСД:

- а) - безпосереднє підключення;
- б) безпосереднє підключення з постійно ввімкненим реактором;
- в) з реакторним пуском.

- пневматичні інструменти: забезпечення роботи інструментів, що використовуються в обслуговуванні та ремонті обладнання.

Таким чином, високовольтні синхронні двигуни є ключовими компонентами в забезпеченні ефективної та безперервної роботи компресорних систем, які, в свою чергу, підтримують основні технологічні процеси рудозбагачувальних фабрик.

У компресорній РЗФ встановлено 3 високовольтні СД типорозміру СДТ-630-2УХЛ4. Їх параметри представлено у розділі 7.4.

7.2 Основні види пошкоджень високовольтних СД

Значний відсоток пошкоджень електрообладнання, зокрема 25–30% усіх аварій у системах високої напруги припадає саме на електродвигуни. Механічні несправності становлять лише 5–15%, здебільшого у випадках роботи з різкими змінами навантаження, в умовах високої вібрації, тряски або низьких температур. Основну загрозу надійності високовольтних двигунів становлять електричні пошкодження.

Найбільш поширений тип дефектів у синхронних двигунах - це порушення ізоляції обмоток, що призводить до міжвиткових замикань, пробойів та інших серйозних відмов. У більшості випадків (приблизно 80–95%) несправність виникає саме в обмотці статора, де понад 70% пошкоджень локалізується в пазовій та лобовій частинах. Решта (близько 25–30%) пов'язана з пробоями ізоляції на вводах та з'єднувальних коробках [14].

Ці ушкодження можуть спричинити раптові відключення, аварійні зупинки обладнання та потребу в дорогому ремонті, а також підвищують ризики пошкодження іншого енергетичного обладнання через вторинні електромагнітні впливи.

Отже, для синхронних двигунів, особливо у відповідальних технологічних процесах, ключовим фактором надійної роботи є якість та стан ізоляції, своєчасне виявлення дефектів за допомогою діагностики, а також дотримання режимів експлуатації.

В таблиці 7.1 наведено основні види несправностей та типи пошкоджень ВСД [14].

Таблиця 7.1 – Основні види дефектів, що приводять до розвитку електричних пошкоджень

| Типи дефектів та можливі причини | Розвиток дефекту та зона ураження: | Вид КЗ, яке розвивається |
|---|---|---------------------------|
| Незадовільне затягування кабельних наконечників живлення або контактів виводів обмотки. | Виникнення міжфазного пробоя ізоляції через повітря в зоні клемної коробки. | $K^{(2)}$, $K^{(3)}$ |
| Порушення фіксації обмотки, зокрема: | | |
| ослаблення кріплення лобових частин; | Пробій ізоляційного шару на бандажне кільце або на корпус у місці виходу обмотки з паза. | $K_B^{(1)}$, $K_3^{(1)}$ |
| недостатнє закріплення секцій обмотки за допомогою пазових клинів; | Прямий пробій ізоляції на корпус всередині паза або поблизу його виходу. | $K_3^{(1)}$ |
| нестійке кріплення виводів обмотки. | Повітряне перекриття ізоляції на корпус у клемній коробці | $K_3^{(1)}$ |
| | Міжфазне перекриття ізоляції через повітря у коробці виводів | $K^{(2)}$, $K^{(3)}$ |
| Попадання сторонніх предметів у повітряний зазор між ротором і статором або між лобовими частинами обмотки. | Розповсюджені численні пошкодження ізоляції з переходом на корпус, які супроводжуються повітряними перекриттями.. | $K_3^{(1)}$, $K_3^{(2)}$ |
| Надмірна вологість усередині корпусу двигуна через тривале зберігання або експлуатацію у вологих умовах. | Міжфазне перекриття або пробій між обмотками різних фаз з подальшим пробоем на корпус. | $K^{(2)}$, $K_3^{(1)}$ |
| Порушення технології виготовлення або неправильно виконане укладання обмотки. | Локалізовані пробої ізоляції на корпус в зоні паза або при виході провідника. | $K_3^{(1)}$ |
| Часте або тривале перевищення допустимого навантаження | Повторювані пробої на корпус в пазу або вихід з паза | $K_3^{(1)}$ |
| Наявність дефектів у магнітопроводі (активній сталі). | Пробій у місці переходу з паза на ділянку обмотки | $K_3^{(1)}$ |

Суттєву частину пошкоджень ізоляції обмоток електродвигунів спричиняють негативні електричні впливи, зокрема перенапруги. Приблизно 25% дефектів пов'язані з неякісним ремонтом, ще 20–25% - із заводськими недоліками та помилками монтажу. Однак найбільшу загрозу становлять експлуатаційні умови, в яких працюють двигуни: понад 55% ізоляційних пошкоджень виникає саме внаслідок дії зовнішніх факторів, з яких перенапруги є одними з найбільш руйнівних.

Найнебезпечнішими вважаються внутрішні перенапруги, що виникають: при дугових замиканнях на землю, у разі резонансних явищ у мережі, а також під час відключення АД невеликої потужності, коли відбувається генерація імпульсних перенапруг.

Ці перенапруги можуть призводити до пробую міжвиткової ізоляції, прискороного старіння ізоляційних матеріалів, а також до локальних пошкоджень у лобовій і пазовій частинах обмотки. Особливо гостро ця проблема проявляється в сучасних автоматизованих технологічних установках, де велика кількість комутацій (вмикань та вимикань) сприяє частішому виникненню імпульсних перенапруг.

Небезпечні перенапруги поділяють на:

- середньочастотні — пов'язані з коливаннями у мережі після комутації;
- хвильові (імпульсні) — виникають миттєво і можуть спричинити пробій навіть у новій ізоляції.

Таким чином, перенапруги є критичним фактором деградації ізоляції обмоток електродвигунів, і боротьба з ними (через обмежувачі перенапруг, правильне заземлення та фільтрацію імпульсів) має бути обов'язковою частиною системи електрозахисту.

Розглянемо характеристику основних типів електричних пошкоджень.

Однофазні замикання на землю (корпус). Причинами виникнення є старіння та деградація ізоляції обмоток, механічні пошкодження ізоляції при монтажі та ремонті, перенапруги в мережі (грозові, комутаційні), підвищена вологість та забруднення обмоток, потрапляння сторонніх металевих предметів.

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 56 |

Внаслідок цих негативних явищ виникає протікання струму через ізоляцію та корпус двигуна, підвищений потенціал на корпусі (небезпека для персоналу), локальний перегрів і подальше руйнування ізоляції, поступовий розвиток у міжфазне КЗ. Виникає необхідність відключення чи обмеженої роботи:

- в мережах з ізольованою нейтраллю при малих струмах замикання (до 5-10 А) допускається обмежена робота (до 2-х годин);
- в мережах з компенсованою нейтраллю можлива робота до виявлення місця пошкодження;
- в мережах з ефективно заземленою нейтраллю потрібне негайне відключення.

Багатофазні та виткові КЗ в обмотці статора. До причин виникнення відносять пробій міжфазної ізоляції, розвиток однофазного замикання на землю, сильні механічні пошкодження обмоток, потужні перенапруги, деградацію ізоляції між витками однієї фази. Внаслідок цього виникають значні струми КЗ (у 10-15 разів вище номінальних), інтенсивне тепловиділення в місці пошкодження, руйнування ізоляції та оплавлення провідників, пошкодження магнітопроводу статора, при виткових КЗ - локальні перегриви, які можуть призвести до пожежі. У всіх випадках потрібне негайне відключення, затримка відключення навіть на частки секунди призводить до серйозних руйнувань.

Нагрівання електродвигунів під час перевантаження. Причинами виникнення є технологічні перевантаження компресора, зниження напруги в мережі живлення, заклинювання механізмів компресора, порушення системи охолодження двигуна, погіршення умов вентиляції. Внаслідок цього відбувається прискорене старіння ізоляції, при тривалому перевантаженні - необоротна деформація обмоток, зниження механічної міцності ізоляційних матеріалів, скорочення терміну служби двигуна, при значних перевантаженнях - термічне руйнування ізоляції.

Обов'язкове відключення потрібне при досягненні граничних температур обмоток, при перевантаженні понад 20% рекомендується відключення двигуна, при перевантаженні 10-20% допускається короткочасна робота (до 1 години), при перевантаженні до 10% допускається робота з контролем температури.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 57 |

Несиметричні режими роботи. Причинами їх виникнення є несиметрія напруги мережі живлення, обрив фази живлення, асиметрія опорів статорних обмоток, несправності в системі збудження, несиметричне навантаження в мережі. Виникають струми зворотної послідовності, додаткове нагрівання ротора та статора, підвищена вібрація через несиметричні електромагнітні сили, зниження обертового моменту, нерівномірне нагрівання обмоток.

Негайне відключення потрібне при обриві фази, рекомендується відключення при несиметрії понад 4%, допускається обмежена за часом робота (до 2 годин) при несиметрії 2-4%, допускається тривала робота При несиметрії напруг до 2%.

Втрата живлення. Причинами виникнення втрати живлення двигунів є аварії в системі електропостачання, спрацювання захистів у мережі, обрив усіх фаз живлення, глибокі провали напруги, спрацювання автоматики АВР та АПВ. Це призводить до зниження швидкості обертання, при відновленні напруги - можливі значні пускові струми, порушення технологічного процесу компресорної станції, гідравлічні удари в компресорних системах, несинхронне включення при самозапуску.

Необхідність відключення спостерігається у випадках, коли самозапуск небезпечний для технології, при тривалій втраті застосовується відключення з наступним контрольованим пуском, при короткочасній втраті (до 0,5 с) можливе збереження в роботі.

Асинхронний режим синхронного електродвигуна. До причин виникнення АР відносять втрату збудження, порушення стійкості при коливаннях напруги, різке зростання навантаження на валу, несправності в системі збудження, КЗ в обмотці збудження. До наслідків відноситься значне зростання споживання реактивної потужності, підвищене нагрівання демпферних обмоток ротора, збільшення струму статора вище номінального, коливання швидкості та моменту, підвищена вібрація.

Негайного відключення вимагає АР у двигунів без демпферної обмотки, при наявності демпферної обмотки допускається короткочасний асинхронний режим (до 5 хв), тривалий асинхронний режим також потребує відключення.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 58 |

Аварійні режими пристроїв збудження. Причинами виникнення аварійних режимів на пристроях збудження є несправності тиристорних перетворювачів, обрив ланцюгів датчиків регулювання, коротке замикання в силових колах збудника, несправності автоматичних регуляторів збудження, пошкодження щіток і контактних кілець (для щіткових систем).

Це призводить до втрати або суттєвого зниження збудження, нестабільності реактивної потужності, переходу в асинхронний режим, нестійкої роботи при змінах навантаження, порушень регулювання коефіцієнта потужності.

Необхідність відключення спостерігається у разі повної втрати збудження (якщо не передбачено автоматичне резервування), негайне відключення потрібне при КЗ в силових колах збудника, при несправностях систем регулювання з резервуванням допускається обмежена за часом робота, а при нестабільному збудженні - робота допускається під контролем режимних параметрів.

7.3 Виконання релейного захисту високовольтних синхронних двигунів

Релейний захист високовольтних синхронних двигунів відіграє ключову роль у забезпеченні їх надійної та безпечної експлуатації. Основна мета цього захисту - вчасно виявляти електричні пошкодження в обмотках двигуна, пусковій апаратурі, а також реагувати на небезпечні відхилення від нормального режиму роботи.

Одним із головних завдань є раннє виявлення дефектів, що дозволяє запобігти їхньому розвитку та мінімізувати шкоду. Релейний захист також формує керувальні сигнали для вимикачів, систем збудження, приводів і пускової апаратури. Це дозволяє зменшити обсяг пошкоджень, відключити аварійний двигун від мережі, не допустити розвитку небезпечного режиму, забезпечити мінімальний простій і якнайшвидше відновлення технологічного процесу.

Відповідно до Правил улаштування електроустановок [4] для синхронних двигунів з напругою понад 1 кВ, передбачаються такі обов'язкові види захисту:

- від 1-фазних замикань фази обмотки статора (ОС) на землю (корпус);
- від багатофазних замикань в обмотці статора;
- від перевантаження та втрати живлення;
- від тривалого або короткочасного зниження напруги;

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 59 |

- від асинхронного режиму;
- від тривалої несиметрії напруги.

Ефективність релейного захисту електродвигунів є критичним чинником для забезпечення безпеки, безперервності та надійності технологічного процесу. Вона визначається трьома ключовими характеристиками: селективністю, швидкодією та чутливістю.

Селективна робота захисту означає, що відключення електродвигуна має відбуватись лише при пошкодженнях безпосередньо в його ланцюзі, а не через зовнішні збої або короткі замикання в суміжних ділянках мережі. Це дозволяє локалізувати несправність і зберегти працездатність інших споживачів, уникнувши масового відключення обладнання. Неселективне спрацювання, особливо під час пуску чи самозапуску двигуна, може не лише зірвати технологічний цикл, а й призвести до глибших пошкоджень самого двигуна.

Швидке виявлення та ліквідація багатофазних коротких замикань є однією з основних вимог. Загальний час дії захисту і вимикача на напругу 6–10 кВ повинен складати не більше 0,15–0,18 секунди. Це мінімізує зону ураження, попереджає перегрів і механічні руйнування. Для однофазних замикань на корпус допустима витримка часу 1–2 секунди, аби уникнути хибного спрацювання при замиканнях на землю поза межами самого електродвигуна.

Чутливість релейного захисту визначається здатністю точно реагувати на мінімальні значення струмів пошкодження, зокрема при міжфазних коротких замиканнях та замиканнях на корпус. Вимоги до рівня спрацювання захисту прописані у ПУЕ і мають бути адаптовані до конкретного типу двигуна та умов його роботи. Занадто високе або низьке значення струму спрацювання може зробити захист або марним, або надто вразливим до перешкод.

Відмова релейного захисту може мати катастрофічні наслідки — від глибокого пошкодження обмотки до пожежі, механічної руйнації, зупинки агрегатів і порушення роботи всієї технологічної лінії. Це зумовлено тим, що захисти на стороні живлення або на збірних шинах часто не в змозі вчасно виявити пошкодження в самому електродвигуні, або працюють із великою затримкою, щоб

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 60 |

забезпечити селективність. Внаслідок цього час реакції збільшується до 1–2 секунд, що є критичним для локалізації аварії.

Для забезпечення ефективного захисту синхронних електродвигунів необхідно:

- використовувати селективні, швидкодійні та чутливі захисти;
- правильно налаштовувати струмові та часові характеристики;
- впроваджувати захист від усіх основних типів пошкоджень та небезпечних режимів (КЗ, перенапруги, втрата збудження, асинхронний режим тощо);
- передбачити простоту обслуговування і надійність, співставну зі строком служби самого двигуна.

Більш детально розглянемо захист від багатофазних КЗ у обмотках статора, які є важким видом пошкодження для двигуна та вимагають його відключення.

7.4 Захист від багатофазних замикань в обмотці статора

Для надійного захисту електродвигунів від багатофазних коротких замикань у статорній обмотці доцільно застосовувати один з двох основних типів захисту: струмову відсічку (максимальний струмовий захист) або диференційний захист. Вибір між ними базується на номінальній потужності двигуна, особливостях його пускового режиму, а також вимогах до чутливості та селективності захисту.

Струмова відсічка, що традиційно використовується у вітчизняній практиці, є простим і надійним способом виявлення короткого замикання. Вона спрацьовує при перевищенні заданого струму у точці встановлення пристрою. При цьому струм спрацювання налаштовується не лише з урахуванням номінального струму двигуна, а й відповідно до струму короткого замикання в конкретній точці мережі. Особливо важливо, щоб налаштування враховувало особливості пуску двигуна, оскільки саме в цей режим часто виникають струмові перевантаження, які не є аварійними.

Згідно з вимогами ПУЕ, вибір типу захисту залежить від потужності:

- для електродвигунів потужністю до 5000 кВт рекомендується застосування струмової відсічки як економічно доцільного і достатньо ефективного методу;

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 61 |

- для двигунів потужністю понад 5000 кВт обов'язковим є встановлення диференційного захисту, зазвичай у двофазному виконанні, оскільки цей тип захисту забезпечує вищу точність та швидкість реагування.

Диференційний захист також доцільно застосовувати для двигунів меншої потужності, якщо струмова відсічка не забезпечує достатню чутливість, особливо в умовах складної мережевої конфігурації чи високого значення пускових струмів.

Вибір між струмовою відсічкою та диференційним захистом має базуватися не лише на номінальній потужності двигуна, а й на реальних умовах його експлуатації. Струмова відсічка є оптимальним рішенням для менш потужних машин, тоді як диференційний захист забезпечує максимальну чутливість і надійність для потужних або відповідальних електроприводів.

Виконання струмової відсічки. Дворелейна схема струмової відсічки все частіше застосовується у сучасних системах захисту електродвигунів, оскільки забезпечує вищу надійність, чутливість і селективність порівняно з традиційною однорелейною схемою.

Раніше для двигунів з номінальною потужністю до 2000 кВт використовували спрощену однорелейну схему, у якій вимірювальне реле підключалось на різницю вторинних струмів трансформаторів струму фаз А і С. Такий підхід був популярним через низьку вартість і простоту реалізації, особливо для найбільш поширених типів електродвигунів.

Однак на практиці однорелейна схема продемонструвала обмежену захисну здатність. Вона часто не забезпечувала вчасне реагування на складні аварійні ситуації, зокрема при одночасному замиканні в обмотці статора і в зовнішній мережі. Внаслідок цього зростала кількість важких аварій, які призводили до серйозних ушкоджень двигунів, тривалих зупинок технологічного обладнання та суттєвих витрат на ремонт.

З огляду на ці недоліки, дворелейна схема струмової відсічки, в якій вимірювальні реле підключаються безпосередньо до фазних струмів трансформаторів струму фаз А і С, набуває все більшого поширення. Така схема забезпечує: незалежне реагування кожного реле на перевищення струму в окремій

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 62 |

фазі, підвищену чутливість і швидкодію, кращу селективність у виявленні багатофазних коротких замикань.

Особливо виправдане застосування дворелейного виконання в системах із пружинними приводами змінного струму (наприклад, типу ППВ), де встановлюються два й більше максимальних струмових розчеплювачі миттєвої дії. У таких випадках дворелейна струмова відсічка значно підвищує рівень захисту, забезпечуючи швидке відключення аварійної ділянки та збереження обладнання.

Перехід до дворелейної схеми струмової відсічки є доцільним і виправданим кроком, який значно покращує ефективність захисту електродвигунів, зменшує ризик аварій та підвищує загальну надійність електропостачання промислових установок.

Виконання диференційного захисту. У системах диференціального захисту електродвигунів (ЕД) ключову роль відіграє правильне розміщення трансформаторів струму, від якого залежить точність роботи захисту та його здатність виявляти внутрішні пошкодження.

Для реалізації таких схем зазвичай використовують два комплекти трансформаторів струму з однаковими коефіцієнтами трансформації. Один комплект встановлюється зі сторони живлення - у шафах вимикачів комплектного розподільчого устаткування (КРУ), тоді як другий - зі сторони виводів обмоток статора, зазвичай у точці нульових з'єднань (рис.7.2).

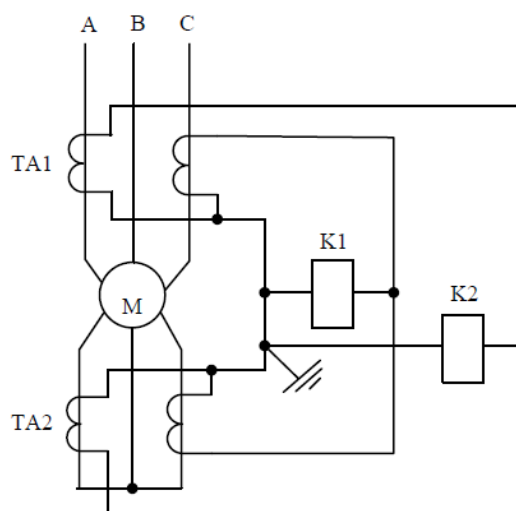


Рис. 7.2 – Принцип здійснення двофазного диференціального захисту електричного двигуна

| | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|------|
| | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | 63 |

Таке просторове розділення трансформаторів струму по обидва боки захищеного об'єкта дозволяє утворити повноцінну диференціальну схему. Вторинні обмотки ТС з однойменних фаз підключаються до спільного контрольного кабелю, що з'єднує їх зі спеціальним диференціальним реле. У нормальних умовах струми в кожній парі ТС мають бути однаковими, тому через реле не протікає струм.

У пускових та перехідних режимах, зокрема під час самозапуску електродвигуна після знеструмлення, можливе короткочасне порушення балансу струмів у вторинних обмотках трансформаторів струму. Це спричиняє появу небалансного струму в ланцюзі диференціального захисту, який, хоч і не свідчить про реальне пошкодження, може спричинити помилкове спрацювання реле. Тому при налаштуванні захисту необхідно враховувати вплив таких небалансів, особливо в перехідних режимах.

Розрахунок струму небалансу здійснюється за формулою:

$$I_{\text{нб}} = K_a \cdot K_{\text{одн}} \cdot \varepsilon \cdot I''_{\text{мах}},$$

де: $K_a = 1$ – значення коефіцієнту, що враховує вплив аперіодичної складової;

$K_{\text{одн}} = 1$ – значення коефіцієнту однотипності трансформаторів струму;

$\varepsilon = 0,1$ – повна розрахункова похибка ТС;

$I''_{\text{мах}}$ – початкове значення періодичної складової струму в момент пуску, самозапуску або зовнішнього короткого замикання.

У більшості випадків отримані значення струмів небалансу не перевищують $(0,7-0,8) I_{\text{ном}}$, що є допустимим рівнем для правильної роботи реле.

Диференціальні захисти електродвигунів поділяються на кілька основних типів залежно від принципу дії.

Диференціальні струмові захисти реагують на різницю струмів між сторонами трансформаторів струму і забезпечують спрацювання при виникненні внутрішніх пошкоджень.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 64 |

Диференціальні струмові захисти з гальмуванням доповнені функцією гальмування, яка запобігає хибним спрацюванням під час пускових або перехідних режимів, враховуючи додаткову інформацію про величину струмів у фазах.

Диференціально-фазні захисти базуються на порівнянні фазових кутів струмів, дозволяючи з високою точністю визначити місце виникнення несправності.

Окрім вказаних типів, застосовуються комбіновані релейні захисти, які поєднують елементи дії з вищенаведених груп, що забезпечує підвищену надійність та чутливість системи захисту.

Диференціальні струмові захисти є однією з найпоширеніших форм релейного захисту електродвигунів. До них належать, зокрема, пристрої типу РНТ-565, які широко експлуатуються завдяки своїй простоті та доступності [13,14].

Реле РНТ-565, встановлене у диференціальному колі (рис. 7.3, а), забезпечує захист шляхом реагування на різницю струмів, що виникає внаслідок пошкодження. Завдяки підвищеній уставці, яка враховує вплив аперіодичної складової при пуску, самозапуску або зовнішньому короткому замиканні, цей захист демонструє вищу стійкість до хибних спрацювань, ніж традиційна диференціальна відсічка на реле РТ-40.

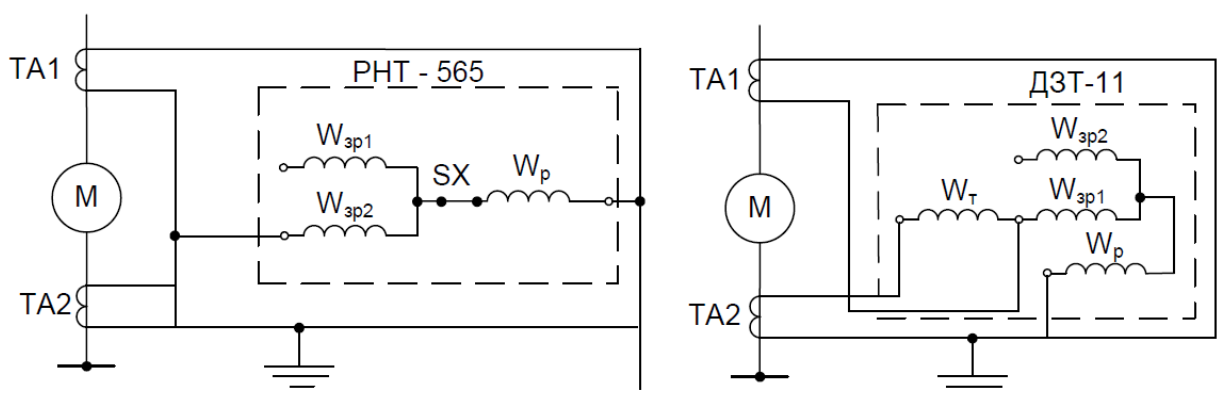


Рис. 7.3 – Схема диференціального струмового захисту: а) для реле типу РНТ – 565; б) для реле типу ДЗТ – 11

Проте для уникнення помилкових спрацювань при значних небалансах в перехідних режимах доводиться встановлювати високі уставки спрацювання на

рівні $1,8 \div 3$ номінального струму, що знижує чутливість захисту до внутрішніх пошкоджень, особливо при КЗ із великим перехідним опором.

З метою підвищення чутливості розроблено низку вдосконалених рішень для диференціального струмового захисту, зокрема:

- застосування стабілізувального опору у диференціальному колі (наприклад, реле ASEA);
- комутаційні диференціальні реле;
- модифіковані пристрої типу РНТ, що реагують на форму підведеного струму;
- введення дроселів у диференціальне коло для зменшення впливу похибок трансформаторів струму.

Ці технічні рішення дозволяють значно покращити надійність і чутливість захисту, зберігаючи його стійкість до пускових і аварійних режимів.

Диференціальний захист із гальмуванням є покращеною формою традиційного струмового диференціального захисту, яка забезпечує вищу стійкість до небажаних спрацювань у перехідних режимах роботи електродвигуна (наприклад, при пуску або самозапуску).

Суть такого захисту полягає в застосуванні гальмівного струму, що надходить з одного плеча захисної схеми, для компенсації впливу періодичних струмів небалансу. Це дозволяє зменшити ймовірність помилкового реагування реле на нормальні, але несиметричні режими роботи, які можуть спостерігатись в електродвигуні.

На схемі (рис. 7.3, б) зображено приклад захисту на базі реле з магнітним гальмуванням типу ДЗТ-11. Відмінністю цієї схеми від звичайної (рис. 7.3, а) є те, що гальмівна обмотка реле підключена до вторинної обмотки трансформатора струму, розташованого біля нульових виводів обмотки статора двигуна. Завдяки цьому реалізується ефект гальмування, що дозволяє точніше розрізняти дійсні аварійні режими від нормальних несиметрій.

Практичний досвід експлуатації таких систем захисту підтвердив їхню високу надійність і чутливість, що робить їх ефективним вибором для електродвигунів, особливо у випадках складних режимів запуску чи відновлення після аварії.

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 66 |

7.5 Розрахунок захисту синхронного двигуна напругою 10 кВ

В кваліфікаційній бакалаврській роботі виконується захист високовольтного СД компресорної станції $P_{\text{ном}} = 630$ кВт. Технічні дані двигуна наведено в таблиці 7.2:

Таблиця 7.2 – Технічна характеристика двигуна СДТ-630-2УХЛ4

| S | $U_{\text{ном}}$ | $\cos \varphi$ | $n_{\text{ном}}$ | η | $\frac{I_n}{I_{\text{ном}}}$ | $\frac{M_n}{M_{\text{ном}}}$ | $\frac{M_{s=0,05}}{M_{\text{ном}}}$ | $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$ |
|-----|------------------|----------------|------------------|--------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|
| кВт | кВ | - | об/хв | % | - | - | - | - |
| 630 | 10 | 0,89 | 500 | 95,6 | 4,4 | 0,6 | 1,0 | 1,87 |

На високовольтних синхронних двигунах передбачено комплекс релейного захисту, який забезпечує виявлення основних пошкоджень і порушень режиму роботи згідно з вимогами ПУЕ. До основних видів захисту, що реалізуються на таких двигунах, належать:

- захист від багатозазних коротких замикань у обмотці статора та на її виводах;
- захист від однофазних замикань на землю;
- захист від перевантаження за струмом;
- захист від асинхронного режиму роботи;
- захист при зниженні напруги живлення нижче допустимого рівня.

Особливу увагу приділяють захисту від багатозазних коротких замикань, який встановлюється на всіх високовольтних синхронних двигунах. Він діє на відключення двигуна та, при наявності, на автоматичне гасіння поля (АГП). Для машин потужністю до 2 МВт зазвичай застосовують струмову відсічку без витримки часу, відлаштовану від пускових струмів. У цьому випадку реле прямої або непрямої дії підключається на різницю струмів двох фаз, а уставка струму спрацювання визначається таким чином, щоб виключити хибне спрацювання при пуску двигуна та зовнішньому КЗ:

$$I_{\text{спр.з1}} = K_n \cdot I_{\text{пуск}} = 2 \cdot 189,58 = 379,28 \text{ А},$$

де $K_n = 2$ - значення коефіцієнту надійності, що приймається для реле РТ-80;

$K_n = 4,4$ - значення кратності пускового струму ВСД;

$I_{пуск}$ - пусковий струм ВСД:

$$I_{пуск} = K_n \cdot I_{ном} = 4,4 \cdot 40,714 = 179,141 \text{ А};$$

$I_{ном}$ - номінальний струм:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,956 \cdot 0,89} = 43,1 \text{ А}.$$

Від зовнішнього К.З.

$$I_{спр.з2} = \frac{E_{дв*}}{X_{дв*}} \cdot I_{ном} = \frac{1,1}{0,12} \cdot 40,714 = 373,211 \text{ А}.$$

На основі аналізу умов 1 та 2 обирається більше з отриманих значень струму спрацювання захисту. Після цього виконується розрахунок струму спрацювання реле та визначається коефіцієнт чутливості:

$$I_{спр.р} = \frac{K_{сх}}{n_{тт}} \cdot I_{спр.з} = \frac{\sqrt{3}}{10} \cdot 373,211 = 64,642 \text{ А};$$

$$K_{ч} = \frac{I_{кз\min}^{(2)}}{I_{спр.з}} = \frac{0,865 \cdot 4968}{373,211} = 11,718.$$

Захист від однофазних замкнень на землю.

Захист електродвигунів потужністю до 2 МВт від однофазних замикань на землю необхідно передбачати в разі, якщо струм замикання перевищує 10 А. Такий захист зазвичай налаштовується на дію без витримки часу з прямим відключенням двигуна та задіюванням пристрою автоматичного гасіння поля (АГП), якщо він передбачений конструкцією. Захисна функція реалізується з використанням реле типу РТЗ-51, яке підключається до трансформатора струму нульової послідовності, а саме ТЗЛМ. Основною вимогою при налаштуванні захисту є правильний вибір уставки спрацювання струму, щоб забезпечити надійне виявлення аварії без помилкових спрацювань.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 68 |

Визначається за виразом:

$$I_{спр.з} = K_H \cdot K_{\delta} \cdot I_C,$$

де $K_H = (1,2-1,3)$ - значення коефіцієнт надійності захисту; $K_{\delta} = (2,0-2,5)$ - коефіцієнт, що враховує імпульсне зростання власного ємнісного струму двигуна у момент виникнення дугового розряду.

Сума ємнісного струму самого електродвигуна та струму, що виникає в лінії електроживлення, яка під'єднана до цього двигуна.

$$I_C = \frac{6 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U_{ном}}{\sqrt{3}} + I_{с.к.} \cdot l \cdot m = \frac{6 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,034 \cdot 10^{-9} \cdot 10}{\sqrt{3}} + 0,11 \cdot 10 \cdot 0,025 = 0,028 A$$

де C - фазова ємність електродвигуна; $I_{с.к.}$ - ємнісний струм КЛ; l - довжина КЛ; m - кількість кабелів лінії.

$$I_{спр.з} = K_H \cdot K_{\delta} \cdot I_C = 1,3 \cdot 2,5 \cdot 0,028 = 0,091 A$$

Обчислене значення $I_{спр.з}$ менше мінімального струму спрацьовування захисту, у цьому випадку приймаємо $I_{спр.з.} = 0,6 A$. Перевіряємо виконання умови:

$$4A \geq I_{спр.з.} \geq 3 \cdot I;$$

$$4A \geq 0,6A \geq 3 \cdot 0,028 = 0,084A.$$

Захисту від перевантаження.

Для реалізації захисту від перевантаження використовують максимальний струмовий захист (МСЗ), що встановлюється в одну з фаз. Струм спрацювання реле визначається за формулою:

$$I_{спр.р} = \frac{K_H}{K_{\delta} \cdot n_{mm}} \cdot I_{ном.дв} = \frac{1,1}{0,8 \cdot 10} \cdot 40,714 = 5,598 A$$

де K_H - значення коефіцієнту надійності, при дії захисту на вимкнення;

K_{δ} - коефіцієнт повернення (для реле типу РТ-80).

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 69 |

Часова витримка захисту встановлюється так, щоб забезпечити його стійкість до спрацювання під час пуску або самозапуску СД:

$$t_{спр.з.} = K'_n \cdot t_n = 1,2 \cdot 10 = 12 \text{ сек.}$$

Захист від асинхронного режиму.

Для синхронних двигунів обов'язковим є встановлення захисту від асинхронного режиму. У випадках, коли двигуни працюють зі "спокійним" навантаженням, доцільно застосовувати захист на основі реле, що реагує на перевищення струму в обмотці статора. У цьому разі перевагу надають захисту з незалежною від струму витримкою часу.

Щоб уникнути помилкових спрацювань такого захисту через пульсації струму, характерні для асинхронного режиму, в схему додатково вводять проміжне реле з уповільненням на повернення. Час його повернення встановлюється відповідно до тривалості асинхронного режиму, наприклад, що виникає внаслідок обриву кола збудження:

$$t_B \geq \frac{1}{2 \cdot S_{ном} \cdot m_{мех}}$$

де $S_{ном}$ - значення ковзання при знятому збудженні та номінальній величині навантаження; $m_{мех}$ - значення моменту навантаження.

Витримка часу реле, що забезпечує захист від роботи синхронного двигуна в асинхронному режимі, повинна перевищувати критичний час виникнення режиму приблизно в 1,5 рази. Проте при надмірно великій витримці часу виникає ризик небажаної затримки спрацювання, що може бути неприпустимим. У такому разі доцільно розділити функції захисту: один контур захисту визначає момент виходу двигуна з синхронізму, а інший фіксує втрату збудження, причому другий працює з витримкою часу у межах 3–5 секунд.

Струм спрацювання захисту від асинхронного режиму визначається за відповідною формулою з урахуванням режиму роботи двигуна:

$$I_{спр.р} = \frac{K_n}{K_v \cdot n_{тт}} \cdot I_{ном.дв} = \frac{1,1}{0,8 \cdot 10} \cdot 40,714 = 5,598 A$$

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 70 |

Струм спрацьовування захисту від втрати збудження:

$$I_{спр.з.втр.зб} = (1,3...1,5) \cdot I_{е.х} = 1,4 \cdot 9,5 = 13,3 А,$$

де $I_{е.х}$ - значення струму збудження (що відповідає параметрам двигуна при номінальній напрузі, холостому ході та мінімальному струмі статора).

Захист синхронного двигуна від асинхронного режиму доцільно реалізовувати у поєднанні з захистом від перевантаження, що дозволяє ефективно виявляти як втрату синхронізму, так і тривалу роботу в ненормованих режимах. Такий комбінований підхід підвищує загальну надійність захисту. Крім того, можуть застосовуватись альтернативні варіанти реалізації захисту з використанням пристроїв, що реагують на змінний струм у роторному колі або на фазовий зсув між струмом статора і напругою, характерний для асинхронного режиму.

Струмові і оперативні кола захисту СД зображено в презентаційній частині бакалаврської кваліфікаційної роботи.

Синхронні двигуни представляють собою складні електромеханічні системи, які потребують багаторівневого захисту для своєчасного реагування на аварійні ситуації. Використання повного набору захисних функцій є обов'язковим для збереження ресурсу двигуна, підтримання технологічного процесу та запобігання зупинкам підприємства.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 71 |

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано розробку системи електропостачання рудозбагачувальної фабрики. При проектуванні враховано вимоги щодо надійності, економічної доцільності, безпеки експлуатації та можливості подальшого розвитку енергосистеми підприємства.

У першому розділі проведено розрахунок силових та освітлювальних електричних навантажень, побудовано графіки навантажень та складено картограму, за якою визначено умовне розташування центру електричних навантажень.

В наступному розділі виконано техніко-економічне обґрунтування зовнішніх схем живлення та обрано оптимальний варіант з установкою головної знижувальної підстанції напругою 35/10 кВ на основі мінімальних приведених витрат.

У блоці, присвяченому компенсації реактивної потужності, розглянуто декілька варіантів використання трансформаторів типу ТМ-1000/10, серед яких найбільш доцільним виявився варіант із шістьма трансформаторами.

Далі проведено вибір силових трансформаторів ГЗП потужністю 2×6300 кВА, а також обґрунтовано установку трьох двотрансформаторних цехових підстанцій із трансформаторами 1000 кВА.

Завершальним етапом є розрахунок струмів короткого замикання, на підставі якого здійснено вибір високовольтного обладнання та повітряних і кабельних ліній електропередач.

У спеціальному розділі бакалаврської роботи розглянуто ключові фактори, що впливають на виникнення пошкоджень ВСД компресорної станції, вказано на характер дефектів і заходи електрозахисту. Встановлено, що головну загрозу надійності таких двигунів становлять саме електричні пошкодження, які виникають переважно через порушення ізоляції обмоток.

Найбільш поширеними є міжвиткові замикання, пробої ізоляції та дугові процеси, які здебільшого виникають в обмотці статора (понад 80–95% усіх

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 72 |

пошкодженень), з особливою концентрацією дефектів у пазовій та лобовій частинах обмотки. Інші порушення пов'язані з ізоляцією вводів і з'єднувальних коробок.

Критичним фактором є якість і стан ізоляційної системи, що вимагає регулярної діагностики, виявлення локальних дефектів і контролю умов експлуатації. Важливим аспектом є також захист від перенапруг, які спричиняють деградацію ізоляції: їх усунення досягається встановленням обмежувачів перенапруг, надійним заземленням та застосуванням імпульсних фільтрів.

До основних видів електричних пошкодженень і аварійних режимів відносяться: однофазні замикання на землю, багатофазні короткі замикання, міжвиткові замикання в обмотці статора, перевантаження та перегрів, робота в умовах несиметричних струмів, зниження або втрата напруги, перехід у асинхронний режим; порушення в роботі системи збудження.

Для синхронного двигуна потужністю 630 кВт, який експлуатується на компресорній станції, виконано повний розрахунок релейного захисту, зокрема визначення уставок спрацьовування захистів та відповідних реле, виходячи з вимог Правил улаштування електроустановок до електродвигунів напругою понад 1 кВ.

Особлива увага приділена захисту від багатофазних КЗ, які становлять найбільшу небезпеку для електродвигуна і потребують миттєвого відключення для уникнення термічних і динамічних пошкодженень. Було виконано детальний аналіз цього виду захисту з визначенням параметрів реле, таких як струм спрацьовування, витримка часу; чутливість; селективність. У результаті обрано оптимальні уставки для реле захисту, які забезпечують високу надійність і швидкодію системи, мінімізуючи ймовірність хибних спрацювань, особливо в умовах пускових або нестабільних режимів.

Таким чином, реалізовані заходи релейного захисту гарантують захист електродвигуна від основних видів пошкодженень, сприяючи безперервності та безпеці технологічного процесу, що є критичним для компресорної станції.

Спроектowana система електропостачання відповідає критеріям економічності та надійності, а також має потенціал для подальшого розширення та модернізації.

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | | | | 73 |

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В.В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А.І., Величко Т.В., Плешков С.П.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т.- Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2021.-209 с.
2. Енергоефективні системи освітлення для промислових та комунально-побутових споживачів / [Плешков П. Г., Орлович А. Ю., Серебренніков С. В., Бегун А. П., Різуненко А. О., Гарасьова Н. Ю., Зінзура В. В] ;– Харків: ТОВ «Цифра Принт», 2018.– 242с.
3. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / Орлович А.Ю., Плешков П.Г., Козловський О.А., Співак О.В., Котиш А.І., Величко Т.В. Навчальний посібник. Видавець Лисенко В.Ф., м.Кропивницький, 2020р. – 272 с.
4. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017 . -617 с.
5. Кваліфікаційна робота бакалавра: метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков та ін.]; Міністерство освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – 80 с.
6. Електропостачання промислових підприємств / Плешков П. Г., Орлович А. Ю., Котиш А.І. Навчальний посібник – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2007р. – 386.
7. Кабельні лінії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukrprovod.com.ua/>
8. Конденсаторні установки 0,4 кВ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electrocontrol.com.ua/ua/elektroshhitovoe-oborudovanie/kondensatornye-ustanovki-aku-04>

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 74 |

9. Конденсаторні установки 10 кВ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electrocontrol.com.ua/ua/vysokovoltnoe-oborudovanie/ustrojstva-kompensacii-reaktivnoj-moshhnosti-tipa-ukm04-i-uk610.html>
10. Трансформатори ТМГ-1000 ЕКОДІЗАЙН [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ktek.com.ua/ua/p1618446293-transformator-tmg-250.html>
11. Трансформатори ТМН-6300/35/10 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://elektro-zavod.com.ua/ua/silovoj-maslyanyj-transformator-tmn-napryazhenie-35-kv-moshn-2>
12. Комплектні трансформаторні підстанції блочного типу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electrocontrol.com.ua/ua/vysokovoltnoe-oborudovanie/komplektnye-transformatornye-podstancii-blochnogo-tipa-ktpb.html>
13. Релейний захист високовольтних електродвигунів. Ч. 1 : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / В. В. Тептя, В. О. Комар, В. О. Лесько, О. Б. Бурикін. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 137 с.
14. Релейний захист високовольтних електродвигунів. Частина 2 : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / В. В. Тептя, В. О. Комар, В. В. Нетребський, О. О. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 136 с.
15. Лагутін В. М., Тептя В. В., Вишневський С. Я. Власні потреби електричних станцій : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2009. 102 с.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата | | 75 |

ДОДАТОК А - ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ НАПРУГОЮ 35 кВ ТА 10 кВ РУДОЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ

Таблиця А.1 - Вибір вимикачів напругою 35 кВ

| Параметри мережі | Розрахункові формули | Параметри вимикача |
|-----------------------|--|-------------------------|
| 35 кВ | $U_{уст} \leq U_{ном}$ | 35кВ |
| 124,98 А | $I_{max} \leq I_{ном}$ | 630 А |
| 2,397 кА | $I'' \leq I_{дин}$ | 20 кА |
| 5,586 кА | $i_{уд} \leq i_{дин}$ | 52 кА |
| 2,397 кА | $I_{пт} \leq I_{отк.ном}$ | 20 кА |
| 11,365 кА | $\sqrt{2} I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2} I_{отк} (1+\beta_H)$ | 28,3 кА |
| 48 кА ² ·с | $B_k \leq I_{терм}^2 t_{терм}$ | 1089 кА ² ·с |

Таблиця А.2- Вибір ввідного вимикача ЗРУ 10 кВ

| Параметри мережі | Розрахункові формули | Параметри вимикача |
|--------------------------|--|-------------------------|
| 10 кВ | $U_{уст} \leq U_{ном}$ | 10 кВ |
| 416,56 А | $I_{max} \leq I_{ном}$ | 630 А |
| 4,416 кА | $I_{пт} \leq I_{отк.ном}$ | 20 кА |
| 8,06 кА | $\sqrt{2} I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2} I_{отк} (1+\beta_H)$ | 39,6 кА |
| 4,416 кА | $I'' \leq I_{дин}$ | 20 кА |
| 9,099 кА | $i_{уд} \leq i_{дин}$ | 52 кА |
| 25,18 кА ² ·с | $B_k \leq I_{терм}^2 t_{терм}$ | 1200 кА ² ·с |

Таблиця А.3 - Вибір лінійних вимикачів 10 кВ

| Параметри мережі | Розрахункові формули | Параметри вимикача |
|--------------------------|--|--|
| 10 кВ | $U_{уст} \leq U_{ном}$ | 10 кВ |
| 79,62 А | $I_{max} \leq I_{ном}$ | 630 А |
| 4,416 кА | $I_{пт} \leq I_{отк.ном}$ | 20 кА |
| 8,06 кА | $\sqrt{2} I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2} I_{отк} (1+\beta_H)$ | $\sqrt{2} \cdot 20(1+0,4)=39,60$ кА |
| 4,416 кА | $I'' \leq I_{дин}$ | 20 кА |
| 9,099 кА | $i_{уд} \leq i_{дин}$ | 52 кА |
| 25,18 кА ² ·с | $B_k \leq I_{терм}^2 t_{терм}$ | $20^2 \cdot 3 = 1200$ кА ² ·с |

Таблиця А.4- Технічна характеристика КРП

| | |
|--|------------------|
| Параметри | Каталожні дані |
| Номинальна напруга | 10 кВ |
| Номинальний струм, А: Збірних шин Шаф | 1000 А 630А |
| Кількість і переріз силових кабелів, мм ² | 4 (3x240) |
| Номинальний струм відключення, кА | 20 |
| Електродинамічна стійкість, кА | 52 |
| Тип привода до вимикача | Електромагнітний |
| Тип вимикача | ВР-1 |

Таблиця А.5 - Вибір роз'єднувачів

| | | |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Параметри мережі | Розрахункові формули | Параметри роз'єднувача |
| 35 кВ | $U_{уст} \leq U_{ном}$ | 35 кВ |
| 124,98 А | $I_{max} \leq I_{ном}$ | 630 А |
| 5,586 кА | $i_{уд} \leq i_{дин}$ | 63 кА |
| 48 кА ² · с | $B_k \leq I_{терм}^2 t_{терм}$ | 2500 кА ² · с |

Таблиця А.6 - Розрахунок потужності споживачів власних потреб

| № п/п | Споживач | n, шт | Встановлена потужність, кВт | | cosφ/tgφ | P _{вст.} | Q _{вст.} |
|----------|-----------------------------------|----------|--------------------------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|
| | | | P _{ном} | P _Σ | | | |
| 1 | Підігрів шаф КРП | 18 | 0,6 | 10,8 | 1/0 | 10,8 | 0 |
| 2 | Опалення та освітлення приміщення | 1 | 6 | 6 | 0,97/0,25 | 6 | 1,5 |
| 3 | Навантаження оперативних ланцюгів | 2 | 3 | 6 | 0,97/0,25 | 6 | 1,5 |
| 4 | Зовнішнє освітлення | 2 | 3 | 6 | 0,5/1,73 | 6 | 10,38 |
| | Ітого | | | | | 28,8 | 13,38 |

Таблиця А.7- Перелік вимірювальних приладів на ввідній лінії на 35 кВ

| Найменування приладу | Тип приладу | Навантаження фази, В·А | | |
|--|-------------|------------------------|--------|--------|
| | | Фаза А | Фаза В | Фаза С |
| Лічильник активної і реактивної енергії NIK 2303 P3.1000.MC.11 | NIK 2303 | 0,003 | – | 0,003 |
| Амперметр | Е 377 | 0,1 | – | – |
| Всього | | 0,103 | – | 0,003 |

Таблиця А.8 - Перевірка ТС за умовами вибору на вводі 35 кВ

| Параметри мережі | Розрахункова формула | Параметри трансформатора |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 35 кВ | $U_{уст} \leq U_{ном}$ | 35 кВ |
| 62,49 А | $I_{max} \leq I_{1 ном}$ | 100 А |
| 0,333 Ом | $Z_2 \leq Z_{2 ном}$ | 0,6 Ом |

Таблиця А.9 - Перелік вимірювальних приладів на вводі від трансформатора ГЗП до КРП 10 кВ

| Найменування приладу | Тип приладу | Навантаження фази, В·А | | |
|--|-------------|------------------------|--------|--------|
| | | Фаза А | Фаза В | Фаза С |
| Амперметр | Е 377 | 0,1 | – | – |
| Ватметр | Д-335 | 0,5 | – | 0,5 |
| Варметр | Д-335 | 0,5 | – | 0,5 |
| Електронний лічильник НІК 2300 Р6Т.2802.МС.11 | НІК 2300 | 0,1 | | 0,1 |
| Всього | | 1,2 | – | 1,1 |

Таблиця А.10 - Перевірка ТС за умовами вибору на вводі від трансформатора ГЗП до КРП 10 кВ.

| Умови вибору | Розрахункові дані | Каталожні дані |
|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | ТЛК 10-У3 |
| $U_{уст} \leq U_{ном}$ | $U_{уст} = 10$ кВ | $U_{ном} = 10$ кВ |
| $I_{роб.форс} \leq I_{ном}$ | $I_{роб.форс} = 416,56$ А | $I_{ном} = 600$ А |
| $i_{уд} \leq i_{дин}$ | $i_{уд} = 9,099$ кА | $i_{дин.см} = 81$ кА |
| $B_k \leq I_{ТН}^2 \cdot t_{ТН}$ | $B_k = 25,61$ кА ² ·с | $I_{ТН}^2 \cdot t_{ТН} = 31,5^2 \cdot 3 = 2977$ кА ² ·с |
| $Z_2 \leq Z_{2ном}$ | $Z_2 = 0,266$ Ом | $Z_{2ном} = 0,4$ Ом |

Таблиця А.11 - Перелік вимірювальних приладів на відхідній лінії від КРУ 10 кВ

| Найменування приладу | Тип приладу | Навантаження фази, В·А | | |
|--|-------------|------------------------|--------|--------|
| | | Фаза А | Фаза В | Фаза С |
| Амперметр | Е 377 | 0,1 | – | – |
| Електронний лічильник НІК 2300 Р6Т.2802.МС.11 | НІК 2303 | 0,1 | | 0,1 |
| Всього | | 0,2 | – | 0,1 |

Таблиця А.12 -Перевірка ТС за умовами вибору на відхідній лінії 10 кВ

| Умова вибору | Розрахункові дані | Каталожні дані ТС типу ТЛК-10-100УЗ |
|-----------------------------|----------------------------------|---|
| $U_{уст} \leq U_{ном}$ | $U_{уст} = 10$ кВ | $U_{ном} = 10$ кВ |
| $I_{роб.форс} \leq I_{ном}$ | $I_{роб.форс} = 79,62$ А | $I_{ном} = 100$ А |
| $i_{уд} \leq i_{дин}$ | $i_{уд} = 9,099$ кА | $i_{дин.см} = 52$ кА |
| $B_k \leq I_{ТН}^2 t_{ТН}$ | $B_k = 25,18$ кА ² ·с | $I_{ТН}^2 t_{ТН} = 20^2 \cdot 1 = 400$ кА ² ·с |
| $Z_2 \leq Z_{2ном}$ | $Z_2 = 0,182$ Ом | $Z_{2ном} = 0,4$ Ом |

Таблиця А.13 - Розрахунок вторинного навантаження ТН 35 кВ

| Прилад | Тип приладу | Кількість | Загальна потужність | | | |
|-----------------------|-------------|-----------|---------------------|---------|---------|----------|
| | | | Р, кВт | ΣР, кВт | Q, кВар | ΣQ, кВар |
| Електронний лічильник | НІК 2303 | 1 | 2 | 2 | 2,99 | 2,99 |
| Вольтметр | Е 377 | 1 | 2 | 2 | – | – |
| Всього | | | | 4 | | 2,99 |

Таблиця А.14 - Розрахунок вторинного навантаження трансформатора напруги секції шин 10 кВ

| Прилад | Тип приладу | Кількість | Загальна потужність | | | |
|--|-------------|-----------|---------------------|----------|---------|----------|
| | | | Р, кВт | Σ Р, кВт | Q, кВар | Σ Q, вар |
| Збірні шини 10 кВ: | | | | | | |
| Вольтметр для вимірювання міжфазних напруг | Е 377 | 1 | 2 | 2 | | |
| Вольтметр для вимірювання фазних напруг | Е 377 | 1 | 2 | 2 | | |
| Ввід від трансформатора ГЗП | | | | | | |
| Ватметр | Д-335 | 1 | 0,5 | 0,5 | 2,16 | 2,16 |
| Варметр | Д-335 | 1 | 0,5 | 0,5 | 2,16 | 2,16 |
| Ввід, приєднання 10 кВ: | | | | | | |
| Електронний лічильник | НІК 2300 | 9 | 3 | 18 | 14,55 | 87,3 |
| Всього | | | | 23 | | 91,62 |