

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ

“ ” 2026 р.

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ**

**ВИЩОЇ ОСВІТИ**

на тему:

**«Розробка системи електропостачання  
підприємства з випуску промислового  
інструменту»**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

Дмитро ФАРАФОНТОВ

« » 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

Василь ЗІНЗУРА

« » 2026 р.

Рецензент \_\_\_\_\_

# 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 ПЛІШКОВ

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

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

Фарафонтова Дмитра Юрійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розробка системи електропостачання підприємства з випуску промислового інструменту

Development of a power supply system for an industrial tool manufacturing enterprise

2. Керівник роботи Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук, доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 01.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Метою роботи є проектування системи електропостачання підприємства з випуску промислового інструменту. Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання: 1. Провести розрахунок електричних навантажень. 2. Провести розрахунок картограми електричних навантажень. 3. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання. 4. Провести розрахунок режимів реактивної потужності системи електропостачання. 5. Здійснити вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства. 6. Провести розрахунок струмів коротких замкнень та здійснити вибір високовольтного обладнання. 7. Провести розрахунок спеціального розділу 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 |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| <i>1</i> | <i>Розрахунок електричних навантажень</i>                                       | <i>13.04-20.04</i>            |          |
| <i>2</i> | <i>Картограма електричних навантажень</i>                                       | <i>21.04-25.04</i>            |          |
| <i>3</i> | <i>Техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання</i>           | <i>26.03-01.05</i>            |          |
| <i>4</i> | <i>Режими реактивної потужності системи електропостачання</i>                   | <i>02.05-08.05</i>            |          |
| <i>5</i> | <i>Вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства</i>               | <i>09.05-11.05</i>            |          |
| <i>6</i> | <i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання</i> | <i>12.05-18.05</i>            |          |
| <i>7</i> | <i>Спеціальний розділ</i>                                                       | <i>19.05-25.05</i>            |          |
| <i>8</i> | <i>Оформлення презентаційної частини КР</i>                                     | <i>26.05-28.05</i>            |          |
| <i>9</i> | <i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>                                      | <i>29.05-31.05</i>            |          |

Дата видачі завдання  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

Підпис керівника \_\_\_\_\_

Василь ЗІНЗУРА

Завдання прийнято до виконання  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

Підпис здобувача \_\_\_\_\_

Дмитро ФАРАФОНТОВ

## **АНОТАЦІЯ**

Кваліфікаційна робота: 89 с.; 19 рис.; 21 табл.; 5 джерел

### **Фарафонов Д. Ю. Розробка системи електропостачання підприємства з випуску промислового інструменту. – Рукопис.**

Бакалаврська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026 рік.

Дане дослідження спрямоване на розробку схеми живлення заводу з випуску промислового інструменту. Завдяки ретельно проведеним розрахункам енергоспоживання вдалося з'ясувати найкращі умови роботи вказаної інфраструктури. Вивчення профілів використання електрики допомогло виявити певні тренди витрат енергії під час виробничих змін. Оцінка потоків реактивної енергії підтвердила, що існує нагальна потреба у впровадженні засобів компенсації з метою покращення загального енергетичного показника.

Детальне обчислення значень струмів при виникненні аварійних замикань на різноманітних ділянках лінії виступило базою під час визначення відповідної апаратури захисту. Виконані аналітичні процедури сформували надійну основу, щоб аргументовано обрати елементи для високовольтної частини фабричної електросистеми.

**Ключові терміни дослідження:** обчислені навантаження, мережа електропостачання, діаграми споживання енергії.

## ABSTRACT

Qualification work: 89 p.; 19 Fig.; 21 tables; 5 sources

**Farafontov D. Development of a power supply system for an industrial tool manufacturing enterprise. – 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, 2026.

This study is aimed at developing a power supply scheme for an industrial tool manufacturing plant. Thanks to carefully conducted energy consumption calculations, it was possible to find out the best operating conditions for the specified infrastructure. The study of electricity usage profiles helped to identify certain trends in energy consumption during production shifts. The assessment of reactive energy flows confirmed that there is an urgent need to introduce compensation measures in order to improve the overall energy performance.

A detailed calculation of current values in the event of emergency short circuits on various sections of the line served as the basis for determining the appropriate protection equipment. The performed analytical procedures formed a reliable basis for a reasoned selection of elements for the high-voltage part of the factory electrical system.

**Key words:** calculated loads, power supply network, energy consumption diagrams.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП .....</b>                                                                                                        | <b>7</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ .....</b>                                                                 | <b>9</b>  |
| 1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ .....                                                                          | 9         |
| 1.2 Освітлювальні електричні навантаження.....                                                                            | 10        |
| 1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ .....                                                                        | 11        |
| 1.4 Графіки електричних навантажень заводу .....                                                                          | 16        |
| <b>РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....</b>                                                                  | <b>21</b> |
| <b>РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ .....</b>                                     | <b>23</b> |
| 3.1 Схема зовнішнього електропостачання.....                                                                              | 23        |
| 3.2 Схема внутрішнього електропостачання .....                                                                            | 26        |
| <b>РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....</b>                                             | <b>28</b> |
| 4.1 Баланс реактивної потужності.....                                                                                     | 28        |
| 4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення<br>компенсуючих пристроїв .....                                     | 29        |
| <b>РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ<br/>ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....</b>                                      | <b>32</b> |
| <b>РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ<br/>ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ .....</b>                       | <b>33</b> |
| 6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень .....                                                                            | 33        |
| 6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ.....                                                                             | 40        |
| 6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги.....                                                                       | 42        |
| 6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб .....                                                | 43        |
| <b>РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. АНАЛІЗ МЕТОДІВ<br/>АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЯМИ НАПРУГИ В<br/>ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ.....</b> | <b>45</b> |
| 7.1 Комплексний огляд інструментів стабілізації параметрів<br>у розподільних лініях електропередачі .....                 | 45        |
| 7.2 Впровадження напівпровідникових технологій силових трансформаторів.....                                               | 64        |
| 7.3 Впровадження концепції FACTS у сучасних<br>електроенергетичних комплексах.....                                        | 74        |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>                                                                                                     | <b>87</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                                                                                   | <b>89</b> |

|           |      |                |        |      |                                                                                                                                                                            |                     |       |         |
|-----------|------|----------------|--------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|---------|
|           |      |                |        |      | КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ<br>(БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ                                                                                                     |                     |       |         |
| Зм.       | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата |                                                                                                                                                                            |                     |       |         |
| Розроб.   |      | Фарафонов Д.Ю. |        |      | Розробка системи електропостачання підприємства з випуску промислового інструменту<br>Development of a power supply system for an industrial tool manufacturing enterprise | Лім.                | Аркуш | Аркушів |
| Перев.    |      | Зінзура В.В.   |        |      |                                                                                                                                                                            |                     | 6     | 89      |
| Н. контр. |      |                |        |      |                                                                                                                                                                            | ЦНТУ<br>зр. ЕЕ-23мб |       |         |
| Затвер.   |      | Плешков П.Г.   |        |      |                                                                                                                                                                            |                     |       |         |

## ВСТУП

Цей кваліфікаційний проєкт присвячено розробці ефективної та надійної схеми забезпечення електроенергією підприємства, що спеціалізується на виготовленні промислового інструменту. У сучасних умовах ринкової економіки саме ця галузь є своєрідним фундаментом для розвитку машинобудування, тому питання оптимізації її інфраструктури набуває ключового значення.

Необхідно зазначити: світові тенденції свідчать про стрімке зростання промислової потреби в кіловатах. Це зумовлено масовим впровадженням новітніх автоматизованих ліній, глибокою модернізацією існуючих потужностей та глобальним переходом до концепції Індустрії 4.0. Передове обладнання з високим рівнем продуктивності відрізняється значною енергоємністю. Відповідно, головні енергетики та керівництво заводів повинні формувати довгострокову стратегію розвитку власних підстанцій. Таке планування має обов'язково враховувати можливість подальшого масштабування цехів та підключення додаткових навантажень без повної реконструкції розподільчих мереж.

Специфіка функціонування об'єктів інструментальної галузі полягає у надзвичайно жорстких вимогах до якості струму. Основний парк техніки тут складається з прецизійних металообробних комплексів: багатокоординатних обробних центрів, токарних агрегатів із числовим програмним керуванням, а також складної електроерозійної техніки. Подібна мікропроцесорна апаратура є вкрай чутливою до будь-яких перепадів, провалів чи гармонійних спотворень у мережі. Найменша нестабільність живлення здатна спровокувати збій алгоритмів керування, що неминуче призводить до пошкодження дороговартісної заготовки, критичної поломки різальної фрези або тривалої зупинки конвеєра. Тому гарантування ідеальних параметрів напруги є запорукою економічної рентабельності.

Поряд із базовими верстатами, передові фабрики сьогодні масово інтегрують цифрові технології (відомі як ІІТ). Мережа розумних датчиків здійснює безперервний збір даних щодо поточного стану кожного окремого

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 7   |
|  |  |  |  |  |  |     |

механізму. Глибокий аналіз цієї інформації відкриває шлях до предиктивного обслуговування, тобто виявлення потенційних несправностей ще до їх фактичного виникнення. Крім того, цифровізація дозволяє згладжувати пікові навантаження та суттєво знижувати фінансові витрати підприємства.

Зважаючи на вищевикладене, архітектура електричної мережі повинна бути максимально безвідмовною. До її складу необхідно включити автоматичне введення резерву (АВР), автономні генератори та потужні промислові акумуляторні блоки, які захищатимуть найвідповідальніші ділянки від раптового знеструмлення. Проєкт також має передбачати встановлення установок компенсації реактивної потужності. Сучасна парадигма диктує необхідність монтажу розгалуженої системи смарт-лічильників (АСКОЕ) для точного комерційного обліку ресурсів на рівні кожного підрозділу. Додатковим кроком до автономності може стати запровадження локальних відновлюваних джерел, зокрема дахових сонячних електростанцій.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 8   |

# РОЗДІЛ 1

## РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

### 1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ

Зразок виконання розрахункових дій на базі ділянки термічної обробки наведено далі.

$$m = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{151,8}{20,2} = 7,5$$

$$P_{зм} = \Sigma P \cdot K_B = 4230 \cdot 0,7 = 2961 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 2961 \cdot 0,48 = 1421,28 \text{ квар}$$

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \cdot \Sigma P}{P_{max}} = \frac{2 \cdot 4230}{151,8} \approx 56$$

Відповідно до джерела [1] коефіцієнт  $K_p = 1,07$ .

Підсумкові розрахункові величини:

$$P_p = P_{зм} \cdot K_p = 2961 \cdot 1,07 = 3168,27 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{зм} = 1421,28 \text{ квар}$$

Отримані результати обчислень зведено у табл. 1.1.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  |     |
|  |  |  |  |  |  | 9   |

Таблиця 1.1. Зведені дані електричних навантажень

| №  | Назва цеху                              | $N_{\text{спож шт}}$ | $P_{\text{одн.сп.}}$ |          | $P_{\text{сум, кВт}}$ | $m$ | $K_v$ | $\cos \varphi$ | $\text{tg} \varphi$ | Сер. зм. нав.        |                       | $n_{\text{сф}}$ | $K_p$ | Розрах. навант.        |                         |                        |
|----|-----------------------------------------|----------------------|----------------------|----------|-----------------------|-----|-------|----------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|-------|------------------------|-------------------------|------------------------|
|    |                                         |                      | min, кВт             | max, кВт |                       |     |       |                |                     | $P_{\text{зм, кВт}}$ | $Q_{\text{зм, квар}}$ |                 |       | $P_{\text{розр, кВт}}$ | $Q_{\text{розр, квар}}$ | $S_{\text{розр, кВА}}$ |
| 1  | Дільниця термічної обробки № 1          | 80                   | 20,2                 | 152      | 4230                  | 7,5 | 0,7   | 0,9            | 0,48                | 2961                 | 1421,28               | 56              | 1,07  | 3168,3                 | 1421,3                  | 3472,46                |
| 2  | Дільниця зварювальних робіт № 1         | 60                   | 30,4                 | 121      | 4959                  | 4   | 0,6   | 0,35           | 2,68                | 2975,4               | 7974,07               | 60              | 1,1   | 3272,9                 | 7974,1                  | 8619,62                |
| 3  | Відділення підготовки заготовок         | 75                   | 5,1                  | 70,8     | 810                   | 14  | 0,25  | 0,7            | 1,02                | 202,5                | 206,55                | 23              | 1,44  | 291,6                  | 206,55                  | 357,34                 |
| 4  | Відділення виробництва конічних свердел | 140                  | 2,8                  | 58,7     | 4352                  | 21  | 0,25  | 0,65           | 1,17                | 1088                 | 1272,96               | 140             | 1,16  | 1262,1                 | 1273                    | 1792,56                |
| 5  | Дільниця вальцювання свердел            | 70                   | 5,5                  | 81       | 1973                  | 15  | 0,2   | 0,7            | 1,02                | 394,6                | 402,49                | 49              | 1,33  | 524,82                 | 402,49                  | 661,39                 |
| 6  | Дільниця зварювальних робіт № 2         | 35                   | 20,2                 | 101      | 6558                  | 5   | 0,6   | 0,35           | 2,68                | 3934,8               | 10545,26              | 35              | 1,14  | 4485,7                 | 10545                   | 11459,7                |
| 7  | Відділення виготовлення мітчиків        | 150                  | 5,1                  | 75,9     | 3421                  | 15  | 0,2   | 0,7            | 1,02                | 684,2                | 697,88                | 90              | 1,24  | 848,41                 | 697,88                  | 1098,56                |
| 8  | Дільниця нарізних плашок                | 65                   | 4,7                  | 44,5     | 810                   | 9,5 | 0,25  | 0,7            | 1,02                | 202,5                | 206,55                | 36              | 1,34  | 271,35                 | 206,55                  | 341,02                 |
| 9  | Відділення виробництва фрез             | 100                  | 2,5                  | 55,7     | 3886                  | 22  | 0,2   | 0,65           | 1,17                | 777,2                | 909,32                | 100             | 1,22  | 948,18                 | 909,32                  | 1313,74                |
| 10 | Дільниця термічної обробки № 2          | 35                   | 10,1                 | 182      | 2834                  | 18  | 0,7   | 0,9            | 0,48                | 1983,8               | 952,22                | 31              | 1,1   | 2182,2                 | 952,22                  | 2380,89                |
| 11 | Насосна станція                         | 18                   | 5,1                  | 91,1     | 405                   | 18  | 0,6   | 0,7            | 1,02                | 243                  | 247,86                | 9               | 1,31  | 318,33                 | 272,65                  | 419,13                 |
| Σ  | Всього                                  | 828                  | -                    | -        | 34238                 | -   | -     | -              | -                   | 15447                | 24836,44              | -               | -     | 15574                  | 24861                   | 29330,9                |

## 1.2 Освітлювальні електричні навантаження

Зразок обчислення потужності освітлення для ділянки термічної обробки продемонстровано далі.

$$P_{\text{BCT}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 3585 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 57,36 \text{ кВТ}$$

$$P_p = K_{\Pi} \cdot K_1 \cdot P_{\text{БСТ}} = 0,95 \cdot 1,0 \cdot 57,36 = 54,49 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot tg\varphi = 54,49 \cdot 0,203 = 11,06 \text{ квар}$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ap. |
|  |  |  |  |  |  | 10  |
|  |  |  |  |  |  |     |

Підсумки проведених обчислень систематизовано у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Розрахунок навантажень робочого освітлення

| №  | Назва підрозділу                           | F, м² | p0,<br>Вт/м² | Pвст,<br>кВт | Kп   | K1 | cosφ | tgφ | Pp,<br>кВт | Qp,<br>квар | Sp,<br>кВА |
|----|--------------------------------------------|-------|--------------|--------------|------|----|------|-----|------------|-------------|------------|
| 1  | Дільниця термічної<br>обробки № 1          | 3585  | 16           | 57,36        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 54,49      | 11,1        | 55,6       |
| 2  | Дільниця зварювальних<br>робіт № 1         | 2856  | 18           | 51,41        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 48,84      | 9,91        | 49,83      |
| 3  | Відділення підготовки<br>заготовок         | 3665  | 14           | 51,31        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 48,74      | 9,89        | 49,73      |
| 4  | Відділення виробництва<br>конічних свердел | 2831  | 17           | 48,13        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 45,72      | 9,28        | 46,65      |
| 5  | Дільниця вальцювання<br>свердел            | 5343  | 17           | 90,83        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 86,29      | 17,5        | 88,05      |
| 6  | Дільниця зварювальних<br>робіт № 2         | 4631  | 18           | 83,36        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 79,19      | 16,1        | 80,81      |
| 7  | Відділення виготовлення<br>міпчиків        | 7283  | 17           | 123,8        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 117,6      | 23,9        | 120        |
| 8  | Дільниця нарізних плашок                   | 3279  | 17           | 55,74        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 52,95      | 10,8        | 54,03      |
| 9  | Відділення виробництва<br>фрез             | 7045  | 17           | 119,8        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 113,8      | 23,1        | 116,1      |
| 10 | Дільниця термічної<br>обробки № 2          | 11841 | 16           | 189,5        | 0,95 | 1  | 0,98 | 0,2 | 180        | 36,5        | 183,7      |
| 11 | Насосна станція                            | 1984  | 12           | 23,81        | 0,6  | 1  | 0,98 | 0,2 | 14,29      | 2,9         | 14,58      |
| 12 | Територія підприємства                     | 59761 | 1            | 59,76        | 0,1  | 1  | 0,98 | 0,2 | 5,98       | 1,21        | 6,1        |
| Σ  | Всього                                     | -     | -            | 954,7        | -    | -  | -    | -   | 847,9      | 172         | 865,2      |

### 1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ

Результати розрахунків навантажень вище 1 кВ приведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

| Назва                           | $N_{\text{спож}}$<br>шт | $P_{\text{одн.сп.}}$ |             | $P_{\text{сум,}}$<br>кВт | $m$   | $K_{\text{в}}$ | $\cos \varphi$ | $\operatorname{tg} \varphi$ | Сер. зм. нав.        |                       | $n_{\text{сф}}$ | $K_{\text{р}}$ | Розрах. навантаж.      |                         |                        |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------|--------------------------|-------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|----------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
|                                 |                         | мін,<br>кВт          | мак,<br>кВт |                          |       |                |                |                             | $P_{\text{зм,}}$ кВт | $Q_{\text{зм,}}$ квар |                 |                | $P_{\text{розр,}}$ кВт | $Q_{\text{розр,}}$ квар | $S_{\text{розр,}}$ кВА |
| ТП 1, 2                         |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| Дільниця термічної обробки № 1  |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| силове:                         | 81                      | 20                   | 152         | 4180                     | 7,5   | 0,7            | 0,9            | 0,49                        | 2961                 | 1417,13               | 56              | 1,08           | 3181,41                | 1434,14                 | 3489,72                |
| освітлювальне:                  |                         |                      |             | 56,67                    |       |                |                |                             | 54,49                | 10,93                 |                 |                |                        |                         |                        |
| Всього:                         |                         |                      |             | 2982,67                  | 1417  |                |                |                             | 3235,9               | 1428,06               | 3502            |                |                        |                         |                        |
| Всього по ТП 1, 2:              |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| силове:                         | 81                      | 20                   | 152         | 4180                     | 7,5   | 0,7            | 0,9            | 0,49                        | 2961                 | 1417,13               | 56              | 1,08           | 3181,41                | 1434,14                 | 3489,72                |
| освітлювальне:                  |                         |                      |             | 56,67                    |       |                |                |                             | 54,49                | 10,93                 |                 |                |                        |                         |                        |
| БК 0,4 кВ                       |                         |                      |             | -675                     |       |                |                |                             | -683                 |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| Всього 0.4 кВ ТП 1, 2:          |                         |                      |             | 2982,67                  | 742,1 |                |                |                             | 3235,9               | 753,06                | 3285            |                |                        |                         |                        |
| Втрати в ТП:                    |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             | 33,48                | 186,05                |                 |                |                        |                         |                        |
| Нтр: 3 шт.                      |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| Стр, кВА: 1600                  |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| $K_3 = 0,68$                    |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| Всього 10 кВ ТП 1, 2:           |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             | 3269,38              | 939,11                | 3364            |                |                        |                         |                        |
| ТП 3, 4                         |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| Дільниця зварювальних робіт № 1 |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| силове:                         | 61                      | 30                   | 121         | 4900                     | 4     | 0,6            | 0,35           | 2,71                        | 2975                 | 7868,7                | 60              | 1,11           | 3279,95                | 7963,12                 | 8612,17                |
| освітлювальне:                  |                         |                      |             | 50,8                     |       |                |                |                             | 48,84                | 9,8                   |                 |                |                        |                         |                        |
| Всього:                         |                         |                      |             | 2990,8                   | 7869  |                |                |                             | 3328,79              | 7878,5                | 8538            |                |                        |                         |                        |
| Всього по ТП 3, 4:              |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| силове:                         | 61                      | 30                   | 121         | 4900                     | 4     | 0,6            | 0,35           | 2,71                        | 2975                 | 7868,7                | 60              | 1,11           | 3279,95                | 7963,12                 | 8612,17                |
| освітлювальне:                  |                         |                      |             | 50,8                     |       |                |                |                             | 48,84                | 9,8                   |                 |                |                        |                         |                        |
| БК 0,4 кВ                       |                         |                      |             | -7566                    |       |                |                |                             | -7657                |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| Всього 0.4 кВ ТП 3, 4:          |                         |                      |             | 2990,8                   | 302,7 |                |                |                             | 3328,79              | 312,5                 | 3304            |                |                        |                         |                        |
| Втрати в ТП:                    |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             | 33,76                | 187,49                |                 |                |                        |                         |                        |
| Нтр: 3 шт.                      |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| Стр, кВА: 1600                  |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| $K_3 = 0,69$                    |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             |                      |                       |                 |                |                        |                         |                        |
| Всього 10 кВ ТП 3, 4:           |                         |                      |             |                          |       |                |                |                             | 3362,55              | 499,99                | 3360            |                |                        |                         |                        |

Продовження табл. 1.3

|                                         |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
|-----------------------------------------|-----|------|-----|---------|-------|------|------|------|---------|----------|-------|------|---------|----------|----------|
| ТП 5                                    |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| Відділення підготовки заготовок         |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| силове:                                 | 76  | 5    | 71  | 800     | 14    | 0,25 | 0,7  | 1,03 | 202     | 204,04   | 23    | 1,46 | 290,8   | 206,49   | 356,65   |
| освітлювальне:                          |     |      |     | 50,71   |       |      |      |      | 48,75   | 9,78     |       |      |         |          |          |
| Всього:                                 |     |      |     | 250,71  | 204   |      |      |      | 339,55  | 213,82   | 397,9 |      |         |          |          |
| Відділення виробництва конічних свердел |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| силове:                                 | 142 | 2,83 | 59  | 4300    | 20,7  | 0,25 | 0,65 | 1,18 | 1088    | 1256,81  | 140   | 1,17 | 1260,28 | 1271,89  | 1790,54  |
| освітлювальне:                          |     |      |     | 47,55   |       |      |      |      | 45,71   | 9,17     |       |      |         |          |          |
| Всього:                                 |     |      |     | 1122,55 | 1257  |      |      |      | 1306    | 1265,98  | 1808  |      |         |          |          |
| Дільниця вальцювання свердел            |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| силове:                                 | 71  | 5,46 | 81  | 1950    | 14,8  | 0,2  | 0,7  | 1,03 | 395     | 397,88   | 49    | 1,35 | 526,12  | 402,65   | 662,52   |
| освітлювальне:                          |     |      |     | 89,76   |       |      |      |      | 86,29   | 17,31    |       |      |         |          |          |
| Всього:                                 |     |      |     | 479,76  | 397,9 |      |      |      | 612,41  | 415,19   | 733,9 |      |         |          |          |
| Всього по ТП 5:                         |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| силове:                                 | 288 | 2,83 | 81  | 7050    | 28,6  | 0,24 | 0,67 | 1,13 | 1685    | 1858,73  | 176   | 1,16 | 1930,16 | 1881,03  | 2695,15  |
| освітлювальне:                          |     |      |     | 188,02  |       |      |      |      | 180,75  | 36,26    |       |      |         |          |          |
| БК 0,4 кВ                               |     |      |     | -1254   |       |      |      |      | -1269   |          |       |      |         |          |          |
| Всього 0.4 кВ ТП 5:                     |     |      |     | 1853,02 | 604,7 |      |      |      | 2110,91 | 640,99   | 2182  |      |         |          |          |
| Втрати в ТП:                            |     |      |     |         |       |      |      |      | 22,21   | 123,44   |       |      |         |          |          |
| Нтр: 2 шт.                              |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| Стр, кВА: 1600                          |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| Кз = 0,68                               |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| Всього 10 кВ ТП 5:                      |     |      |     |         |       |      |      |      | 2133,12 | 764,43   | 2242  |      |         |          |          |
| ТП 6, 7                                 |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| Дільниця зварювальних робіт № 2         |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| силове:                                 | 35  | 20   | 101 | 6480    | 5     | 0,6  | 0,35 | 2,71 | 3935    | 10405,95 | 35    | 1,15 | 4480,26 | 10530,82 | 11444,25 |
| освітлювальне:                          |     |      |     | 82,37   |       |      |      |      | 79,19   | 15,88    |       |      |         |          |          |
| Всього:                                 |     |      |     | 3970,37 | 10406 |      |      |      | 4559,44 | 10421,83 | 11354 |      |         |          |          |
| Всього по ТП 6, 7:                      |     |      |     |         |       |      |      |      |         |          |       |      |         |          |          |
| силове:                                 | 35  | 20   | 101 | 6480    | 5     | 0,6  | 0,35 | 2,71 | 3935    | 10405,95 | 35    | 1,15 | 4480,26 | 10530,82 | 11444,25 |
| освітлювальне:                          |     |      |     | 82,37   |       |      |      |      | 79,19   | 15,88    |       |      |         |          |          |
| БК 0,4 кВ                               |     |      |     | -10684  |       |      |      |      | -10812  |          |       |      |         |          |          |
| Всього 0.4 кВ ТП 6, 7:                  |     |      |     | 3970,37 | -278  |      |      |      | 4559,44 | -262,17  | 4513  |      |         |          |          |
| Втрати в ТП:                            |     |      |     |         |       |      |      |      | 46,57   | 258,23   |       |      |         |          |          |

Продовження табл. 1.3

|                                  |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
|----------------------------------|-----|------|-----|---------|-------|------|------|------|---------|---------|-------|------|---------|---------|---------|
| Нтр: 4 шт.                       |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| Стр, кВА: 1600                   |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| Кз = 0,71                        |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| Всього 10 кВ ТП 6, 7:            |     |      |     |         |       |      |      |      | 4606,02 | -3,94   | 4551  |      |         |         |         |
| ТП 8, 9, 10                      |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| Відділення виготовлення мітчиків |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| силове:                          | 152 | 5    | 76  | 3380    | 15    | 0,2  | 0,7  | 1,03 | 684     | 689,66  | 90    | 1,25 | 846,34  | 697,94  | 1097    |
| освітлювальне:                   |     |      |     | 122,35  |       |      |      |      | 117,62  | 23,59   |       |      |         |         |         |
| Всього:                          |     |      |     | 798,35  | 689,7 |      |      |      | 963,96  | 713,25  | 1190  |      |         |         |         |
| Дільниця нарізних плашок         |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| силове:                          | 66  | 4,66 | 45  | 800     | 9,6   | 0,25 | 0,7  | 1,03 | 202     | 204,04  | 36    | 1,36 | 270,88  | 206,49  | 340,61  |
| освітлювальне:                   |     |      |     | 55,08   |       |      |      |      | 52,96   | 10,62   |       |      |         |         |         |
| Всього:                          |     |      |     | 255,08  | 204   |      |      |      | 324     | 214,66  | 385,3 |      |         |         |         |
| Відділення виробництва фрез      |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| силове:                          | 101 | 2,53 | 56  | 3840    | 22    | 0,2  | 0,65 | 1,18 | 777     | 897,89  | 100   | 1,23 | 951,04  | 908,66  | 1315,35 |
| освітлювальне:                   |     |      |     | 118,34  |       |      |      |      | 113,77  | 22,82   |       |      |         |         |         |
| Всього:                          |     |      |     | 886,34  | 897,9 |      |      |      | 1064,81 | 920,71  | 1398  |      |         |         |         |
| Дільниця термічної обробки № 2   |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| силове:                          | 35  | 10   | 182 | 2800    | 18    | 0,7  | 0,9  | 0,49 | 1984    | 949,27  | 31    | 1,11 | 2189,48 | 960,66  | 2390,96 |
| освітлювальне:                   |     |      |     | 187,22  |       |      |      |      | 179,99  | 36,11   |       |      |         |         |         |
| Всього:                          |     |      |     | 2147,22 | 949,3 |      |      |      | 2369,48 | 985,38  | 2540  |      |         |         |         |
| Насосна станція                  |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| силове:                          | 18  | 5    | 91  | 400     | 18    | 0,6  | 0,7  | 1,03 | 243     | 244,85  | 9     | 1,33 | 317,53  | 272,56  | 418,46  |
| освітлювальне:                   |     |      |     | 23,52   |       |      |      |      | 14,28   | 2,86    |       |      |         |         |         |
| Всього:                          |     |      |     | 263,52  | 244,9 |      |      |      | 331,8   | 272,19  | 426,1 |      |         |         |         |
| Територія підприємства           |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| освітлювальне:                   |     |      |     | 59,05   |       |      |      |      | 5,98    | 1,2     |       |      |         |         |         |
| Всього:                          |     |      |     | 59,05   | 0     |      |      |      | 5,98    | 1,2     | 6,03  |      |         |         |         |
| Всього по ТП 8, 9, 10:           |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |
| силове:                          | 372 | 2,53 | 182 | 11220   | 72    | 0,34 | 0,79 | 0,79 | 3890    | 2985,71 | 125   | 1,14 | 4401,53 | 3021,54 | 5338,84 |
| освітлювальне:                   |     |      |     | 565,56  |       |      |      |      | 484,61  | 97,2    |       |      |         |         |         |
| БК 0,4 кВ                        |     |      |     | -585    |       |      |      |      | -592    |         |       |      |         |         |         |
| Всього 0,4 кВ ТП 8, 9, 10:       |     |      |     | 4409,56 | 2401  |      |      |      | 4886,14 | 2497,91 | 5436  |      |         |         |         |
| Втрати в ТП:                     |     |      |     |         |       |      |      |      | 55,25   | 307,16  |       |      |         |         |         |
| Нтр: 5 шт.                       |     |      |     |         |       |      |      |      |         |         |       |      |         |         |         |

Продовження табл. 1.3

|                                      |     |      |     |         |      |      |      |      |          |         |       |      |       |         |          |
|--------------------------------------|-----|------|-----|---------|------|------|------|------|----------|---------|-------|------|-------|---------|----------|
| Стр, кВА: 1600                       |     |      |     |         |      |      |      |      |          |         |       |      |       |         |          |
| Кз = 0,68                            |     |      |     |         |      |      |      |      |          |         |       |      |       |         |          |
| Всього 10 кВ ТП 8, 9, 10:            |     |      |     |         |      |      |      |      | 4941,38  | 2805,07 | 5631  |      |       |         |          |
| Всього по об'єкту                    |     |      |     |         |      |      |      |      |          |         |       |      |       |         |          |
| силове:                              | 838 | 2,53 | 182 | 33830   | 72   | 0,45 | 0,97 | 0,25 | 15446    | 3772,22 | 376   | 1,01 | 15446 | 3817,49 | 15910,91 |
| освітлювальне:                       |     |      |     | 943,42  |      |      |      |      | 847,87   | 170,07  |       |      |       |         |          |
| Всього:                              |     |      |     | 16206,4 | 3772 |      |      |      | 16294,03 | 3942,29 | 16576 |      |       |         |          |
| Потужність КП 0,4 кВ:                |     |      |     | -20764  |      |      |      |      | -21013   |         |       |      |       |         |          |
| Врати в ТПрах:                       |     |      |     |         |      |      |      |      | 191      | 1062,38 |       |      |       |         |          |
| Всього по об'єкту:                   |     |      |     |         |      |      |      |      | 16485,3  | 5004,67 |       |      |       |         | 17241,27 |
| Високовольтне навантаження           |     |      |     |         |      |      |      |      |          |         |       |      |       |         |          |
| АД 1, 2                              | 2   | 700  | 700 | 1400    |      | 0,75 | 0,85 | 0,62 | 1050     | 650,73  |       |      | 1050  | 650,73  | 1235,29  |
| Всього високовольтного навантаження: |     |      |     |         |      |      |      |      | 1063     | 650,73  | 1235  |      |       |         |          |
| Всього по об'єкту 10 кВ:             |     |      |     |         |      |      |      |      | 17547,9  | 5655,4  |       |      |       |         | 18238,77 |
| КП 10 кВ:                            |     |      |     | -3600   |      |      |      |      |          |         |       |      |       |         |          |
| Всього 10 кВ з КП:                   |     |      |     |         |      |      |      |      | 17547,9  | 2055,4  |       |      |       |         | 17461,21 |
| tgf = 0,119                          |     |      |     |         |      |      |      |      |          |         |       |      |       |         |          |

#### 1.4 Графіки електричних навантажень заводу

Результати розрахунків графіків ел. навантажень наведено нижче.

Таблиця 1.4. Вихідна інформація для визначення характеристик графіків

| №  | Роб. дні     |              | Вих.дні      |              |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
|    | <i>P</i> , % | <i>Q</i> , % | <i>P</i> , % | <i>Q</i> , % |
| 1  | 50,7         | 41,8         | 47,8         | 67,9         |
| 2  | 39,8         | 36,4         | 47,8         | 67,8         |
| 3  | 35,7         | 48,5         | 47,2         | 67,3         |
| 4  | 39,1         | 43,6         | 47,6         | 68           |
| 5  | 53,2         | 52,8         | 47,4         | 67,2         |
| 6  | 52,8         | 45,5         | 47,4         | 67,3         |
| 7  | 86,5         | 64,4         | 47,4         | 67,2         |
| 8  | 93,4         | 77,3         | 48           | 67,1         |
| 9  | 100          | 100          | 26,5         | 56           |
| 10 | 100          | 100          | 26,5         | 55,1         |
| 11 | 94,9         | 69,2         | 26,3         | 55,9         |
| 12 | 76,5         | 62,7         | 26,8         | 55,3         |
| 13 | 92,6         | 76,2         | 26,2         | 56           |
| 14 | 100          | 79,7         | 26,2         | 55,6         |
| 15 | 100          | 80,6         | 26,8         | 56           |
| 16 | 100          | 71,5         | 26,9         | 55,9         |
| 17 | 93,4         | 83           | 26,2         | 55,6         |
| 18 | 85,9         | 65,8         | 47,3         | 67,4         |
| 19 | 57,4         | 47,4         | 47,3         | 68           |
| 20 | 61,4         | 57           | 47,7         | 67,6         |
| 21 | 41,8         | 46,8         | 47,2         | 67,1         |
| 22 | 52           | 46,7         | 48           | 67,6         |
| 23 | 57,5         | 46           | 48           | 67,3         |
| 24 | 52,8         | 48           | 47,8         | 67,1         |

Таблиця 1.5. Результати обчислень добових графіків навантаження

| №  | Зим.дні     |              |             |             |              |             | Літн. дні   |              |             |             |              |             |
|----|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
|    | Роб. дні    |              |             | Вих.і дні   |              |             | Роб. дні    |              |             | Вих.і дні   |              |             |
|    | $P_{д}$ кВт | $Q_{д}$ квар | $S_{д}$ кВА | $P_{д}$ кВт | $Q_{д}$ квар | $S_{д}$ кВА | $P_{д}$ кВт | $Q_{д}$ квар | $S_{д}$ кВА | $P_{д}$ кВт | $Q_{д}$ квар | $S_{д}$ кВА |
| 1  | 8593        | 1079         | 8661        | 8067        | 1736         | 8251        | 7305        | 917          | 7362        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 2  | 6839        | 947          | 6905        | 8067        | 1736         | 8251        | 5814        | 805          | 5870        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 3  | 6138        | 1237         | 6261        | 8067        | 1736         | 8251        | 5217        | 1050         | 5321        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 4  | 6839        | 1105         | 6928        | 8067        | 1736         | 8251        | 5814        | 939          | 5889        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 5  | 9119        | 1341         | 9217        | 8067        | 1736         | 8251        | 7751        | 1141         | 7834        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 6  | 8944        | 1158         | 9019        | 8067        | 1736         | 8251        | 7602        | 984          | 7666        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 7  | 14907       | 1657         | 14999       | 8067        | 1736         | 8251        | 12670       | 1409         | 12748       | 6857        | 1475         | 7014        |
| 8  | 16134       | 1999         | 16258       | 8067        | 1736         | 8251        | 13714       | 1699         | 13819       | 6857        | 1475         | 7014        |
| 9  | 17537       | 2630         | 17733       | 4560        | 1420         | 4776        | 14907       | 2236         | 15074       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 10 | 17537       | 2630         | 17733       | 4560        | 1420         | 4776        | 14907       | 2236         | 15074       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 11 | 16309       | 1788         | 16408       | 4560        | 1420         | 4776        | 13863       | 1520         | 13946       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 12 | 13153       | 1604         | 13250       | 4560        | 1420         | 4776        | 11180       | 1364         | 11263       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 13 | 15958       | 1972         | 16080       | 4560        | 1420         | 4776        | 13565       | 1677         | 13668       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 14 | 17537       | 2051         | 17656       | 4560        | 1420         | 4776        | 14907       | 1744         | 15008       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 15 | 17537       | 2078         | 17659       | 4560        | 1420         | 4776        | 14907       | 1766         | 15011       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 16 | 17362       | 1841         | 17459       | 4560        | 1420         | 4776        | 14757       | 1565         | 14840       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 17 | 16134       | 2130         | 16274       | 4560        | 1420         | 4776        | 13714       | 1810         | 13833       | 3876        | 1207         | 4060        |
| 18 | 14731       | 1683         | 14827       | 8067        | 1736         | 8251        | 12521       | 1431         | 12603       | 6857        | 1475         | 7014        |
| 19 | 9820        | 1210         | 9894        | 8067        | 1736         | 8251        | 8348        | 1028         | 8411        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 20 | 10522       | 1446         | 10621       | 8067        | 1736         | 8251        | 8944        | 1230         | 9028        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 21 | 7190        | 1184         | 7287        | 8067        | 1736         | 8251        | 6111        | 1006         | 6193        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 22 | 8768        | 1184         | 8848        | 8067        | 1736         | 8251        | 7453        | 1006         | 7521        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 23 | 9820        | 1158         | 9888        | 8067        | 1736         | 8251        | 8348        | 984          | 8406        | 6857        | 1475         | 7014        |
| 24 | 8944        | 1210         | 9026        | 8067        | 1736         | 8251        | 7602        | 1028         | 7671        | 6857        | 1475         | 7014        |

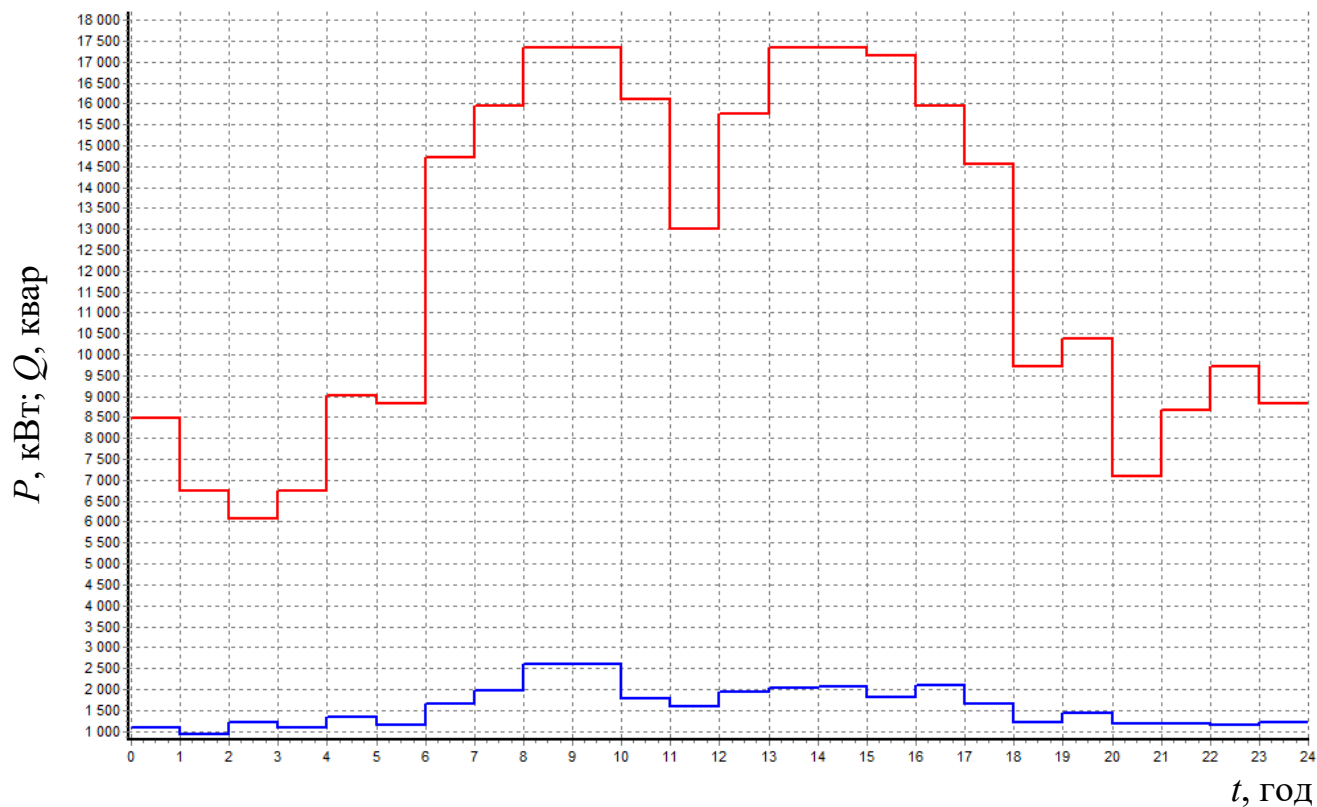


Рис. 1.1. Добові графіки (з. р.)

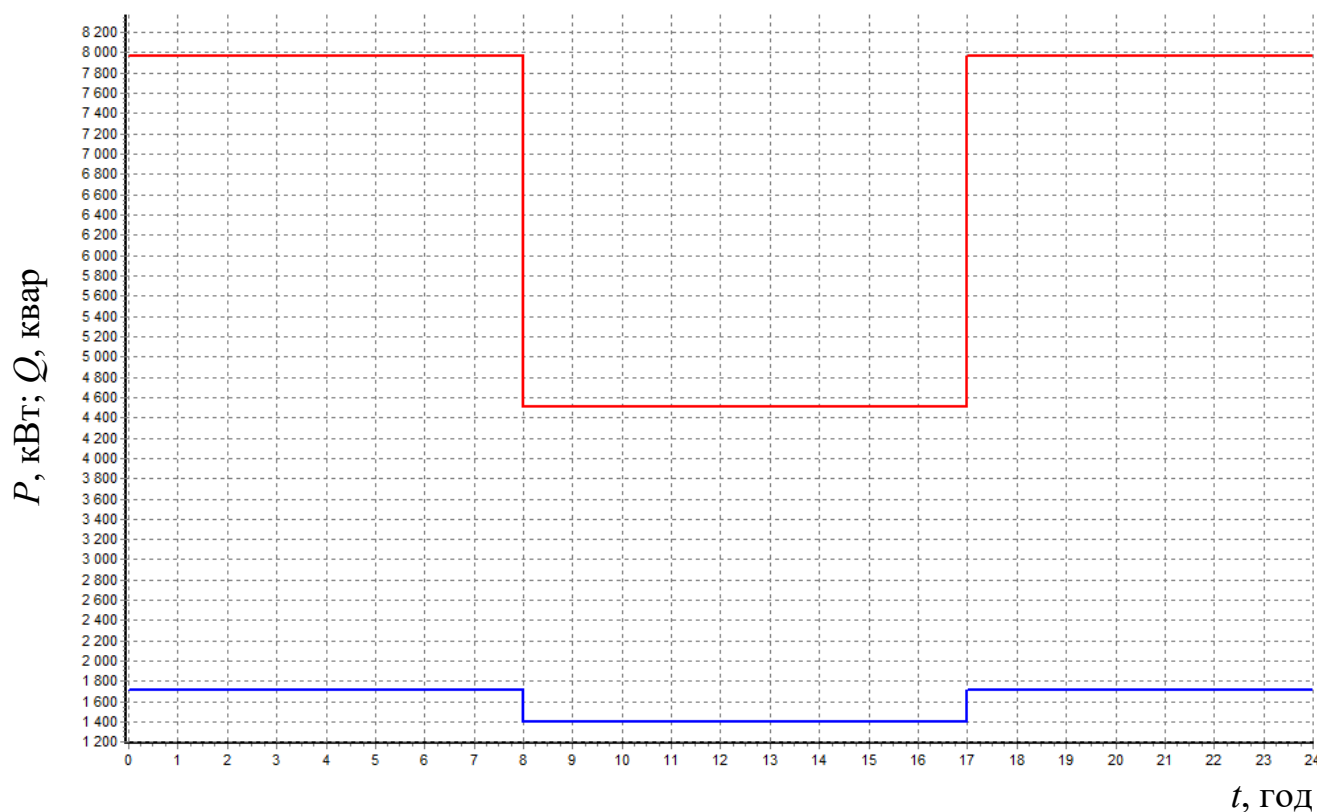


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (з.в.)

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

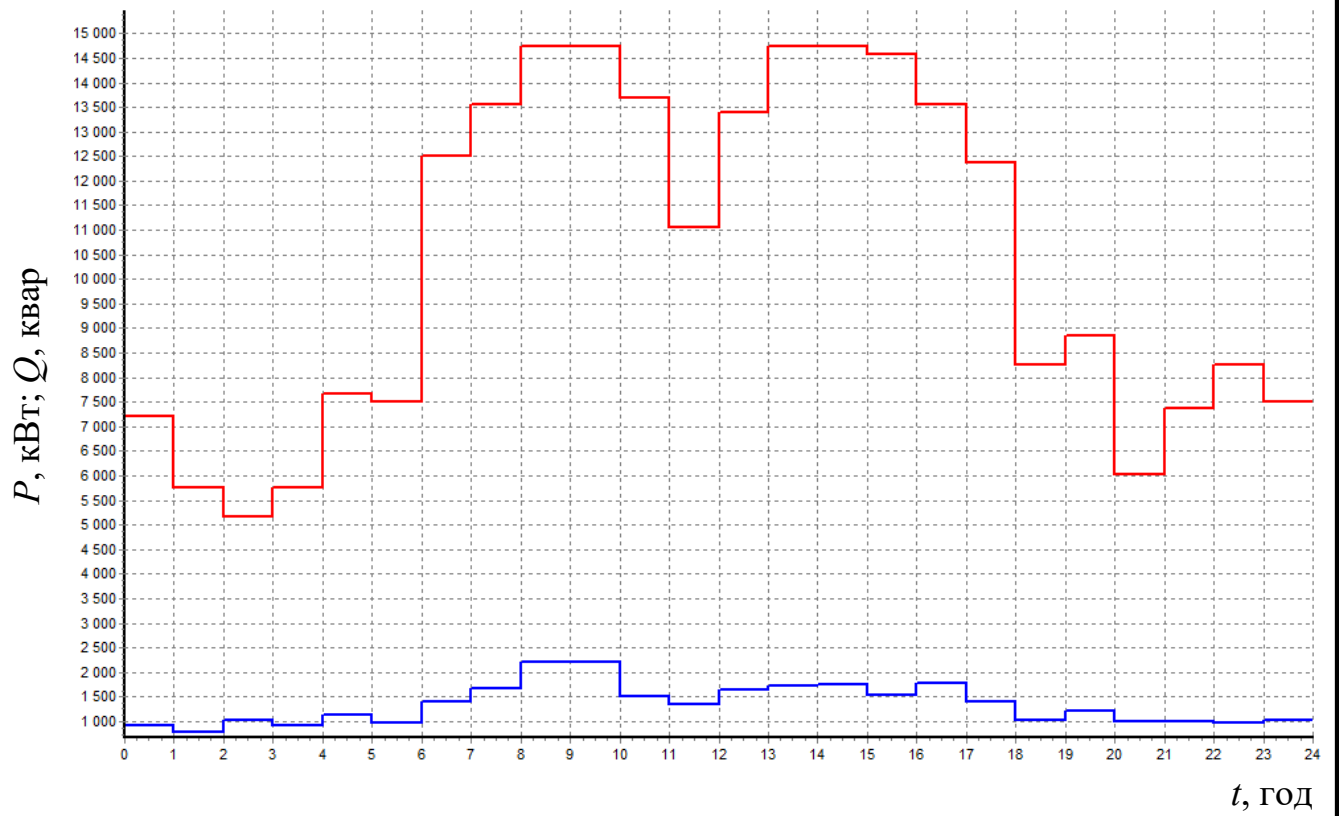


Рис. 1.3. Добові графіки (л.р.)

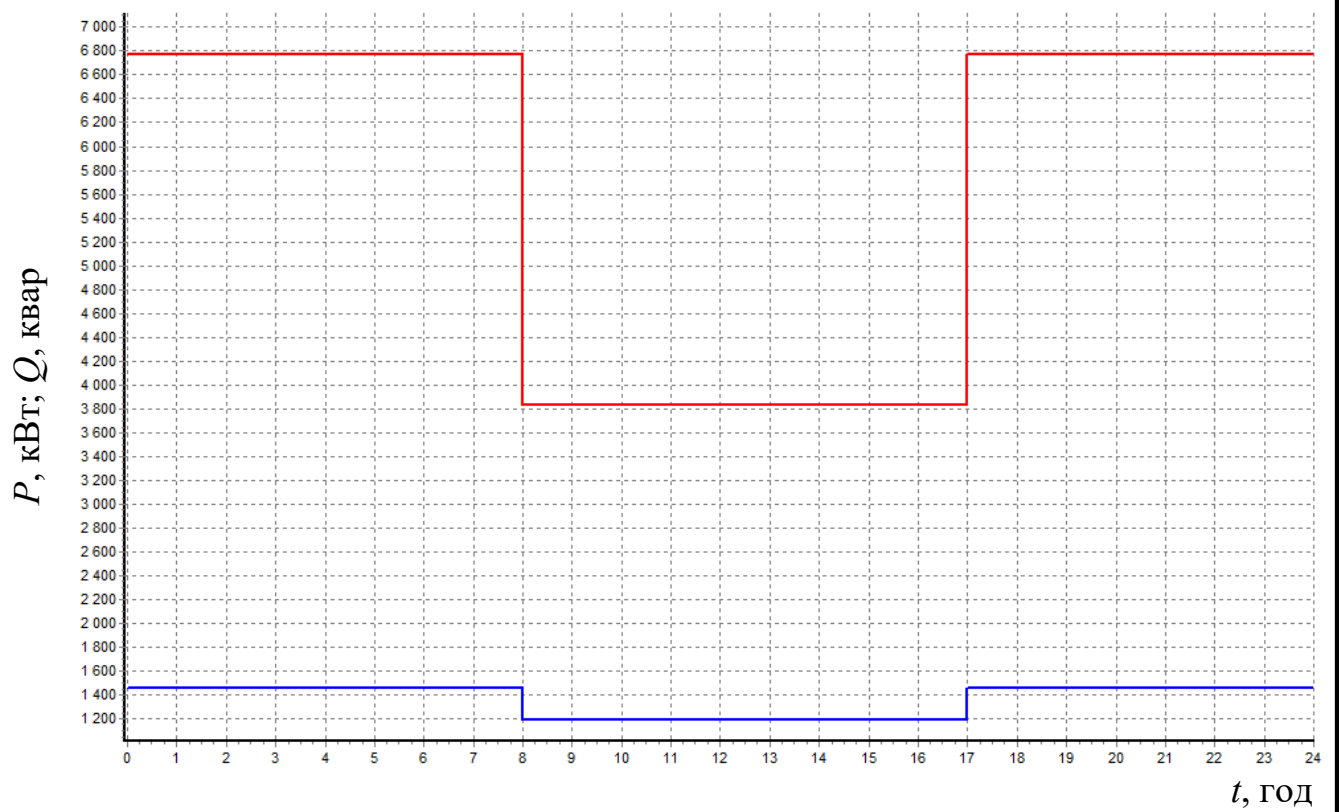


Рис. 1.4 Добові графіки (л.в.)

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |



## РОЗДІЛ 2

### КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Обчислення параметрів картограми на прикладі ділянки термічної обробки № 1 виконано далі:

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{3168,27 + 54,49}{3,14 \cdot 0,2}} = 71,64 \text{ мм},$$

$$\alpha = \frac{360 \cdot P_{\text{осв}}}{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}} = \frac{360 \cdot 54,49}{3168,27 + 54,49} = 6,09^\circ.$$

Визначення координат центру електричних навантажень:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot x_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{6027076,93}{19484,70} = 309,32 \text{ м},$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot y_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{2443557,58}{19484,70} = 125,41 \text{ м}.$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 21  |

Таблиця 2.1. Картограма ел. навантажень

| №  | Назва цеху                       | $P_{\text{сил}}, \text{кВт}$ | $P_{\text{осв}}, \text{кВт}$ | $P_1, \text{кВт}$ | $m$ | $R, \text{мм}$ | $\alpha, \text{град}$ | $x, \text{м}$ | $y, \text{м}$ | $P_1 \cdot x, \text{кВт} \cdot \text{м}$ | $P_1 \cdot y, \text{кВт} \cdot \text{м}$ |
|----|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-----|----------------|-----------------------|---------------|---------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1  | Дільниця термічної обробки № 1   | 3168,27                      | 54,49                        | 3222,76           | 0,2 | 71,64          | 6,09                  | 373,40        | 212,50        | 1203378,58                               | 684836,50                                |
| 2  | Дільниця зварювальних робіт № 1  | 3272,94                      | 48,84                        | 3321,78           | 0,2 | 72,73          | 5,29                  | 324,90        | 165,00        | 1079246,32                               | 548093,70                                |
| 3  | Відділення підготовки заготовок  | 291,6                        | 48,74                        | 340,34            | 0,2 | 23,28          | 51,56                 | 373,40        | 165,00        | 127082,96                                | 56156,10                                 |
| 4  | Відділення виробництва конічних  | 1262,08                      | 45,72                        | 1307,80           | 0,2 | 45,63          | 12,59                 | 421,00        | 165,00        | 550583,80                                | 215787,00                                |
| 5  | Дільниця вальцювання свердел     | 524,82                       | 86,29                        | 611,11            | 0,2 | 31,19          | 50,83                 | 393,70        | 115,40        | 240594,01                                | 70522,09                                 |
| 6  | Дільниця зварювальних робіт № 2  | 4485,67                      | 79,19                        | 4564,86           | 0,2 | 85,26          | 6,25                  | 393,70        | 87,00         | 1797185,38                               | 397142,82                                |
| 7  | Відділення виготовлення мігчиків | 848,41                       | 117,62                       | 966,03            | 0,2 | 39,22          | 43,83                 | 203,40        | 61,70         | 196490,50                                | 59604,05                                 |
| 8  | Дільниця нарізних плашок         | 271,35                       | 52,95                        | 324,30            | 1,2 | 9,28           | 58,78                 | 359,30        | 58,70         | 116520,99                                | 19036,41                                 |
| 9  | Відділення виробництва фрез      | 948,18                       | 113,77                       | 1061,95           | 0,2 | 41,12          | 38,57                 | 54,60         | 42,50         | 57982,47                                 | 45132,88                                 |
| 10 | Дільниця термічної обробки № 2   | 2182,18                      | 179,99                       | 2362,17           | 0,2 | 61,33          | 27,43                 | 258,10        | 24,30         | 609676,08                                | 57400,73                                 |
| 11 | Насосна станція                  | 318,33                       | 14,29                        | 332,62            | 0,2 | 23,01          | 15,47                 | 34,43         | 207,52        | 11442,13                                 | 69018,65                                 |
| 12 | Територія підприємства           | 0                            | 5,98                         | 5,98              | 0,2 | 3,09           | 360,00                | 54,60         | 42,50         | 326,51                                   | 254,15                                   |
| Σ  | Всього по об'єкту                | 18636,8                      | 847,87                       | 19484,70          |     |                |                       |               |               | 6027076,93                               | 2443557,58                               |

### РОЗДІЛ 3

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ

### 3.1 Схема зовнішнього електропостачання

Протяжність ділянки від проектного об'єкта до опорної підстанції напругою 35/10 кВ дорівнює 5,37 км. З огляду на це, раціонально виконати порівняльний аналіз двох альтернативних рішень транспортування енергії:

1. Прокладання кабельних ліній (КЛ) напругою 10 кВ.
2. Спорудження повітряної лінії (ПЛ) напругою 35 кВ.

#### Перший варіант. Застосування КЛ 10 кВ

Величина повного розрахункового струму в лінії становить:

$$I_{\text{розр}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{17461,21}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1008,12 \text{ A}$$

Для забезпечення надійної роботи приймаємо до встановлення 6 паралельних кабелів марки АСБ-10(3х185).

Етап перевірки обраного провідника:

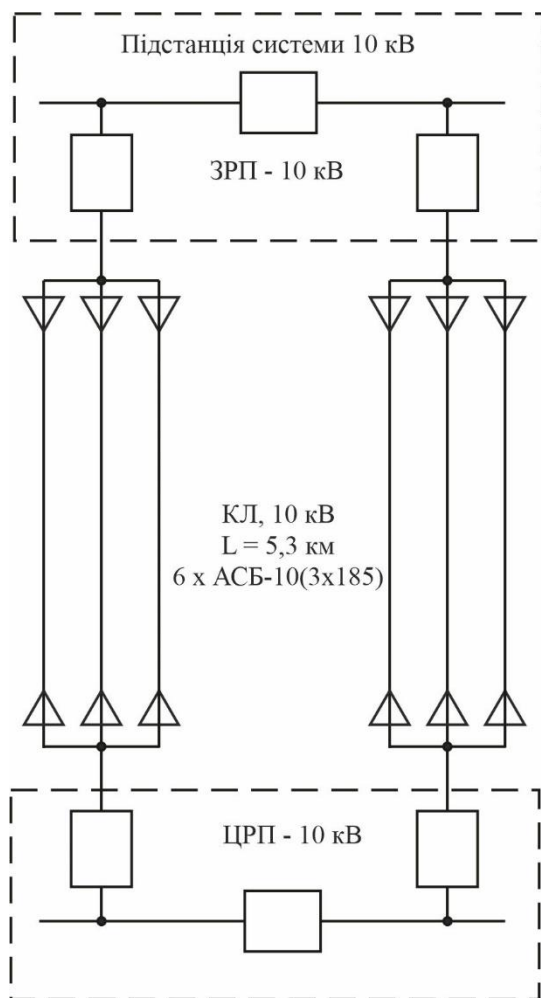
$$I_{\text{неук}} = \frac{1008,12}{6} = 168,02 \text{ A}$$

$$I_{\text{неук}} \leq K \cdot I_{\text{доп}} \quad 168,02 \text{ A} \leq 0,81 \cdot 310 = 251,1 \text{ A}$$

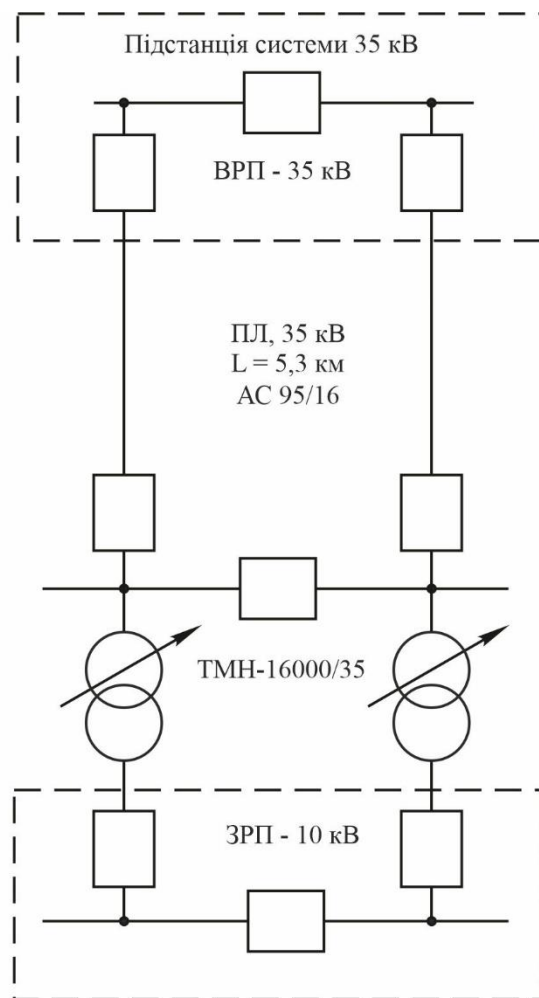
$$I_{\text{ав.р.}} = 2 \cdot I_{\text{неук}} = 2 \cdot 168,02 = 336,04 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав.р.}} \leq K_{\text{а.п.}} \cdot K \cdot I_{\text{доп}} \quad 336,04 \text{ A} \leq 1,25 \cdot 0,92 \cdot 310 = 356,5 \text{ A}$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 23  |



а)



б)

Рис. 3.1. Схеми зовн. електропостачання

$$K_{\text{зав}} = \frac{I_{\text{неук}}}{I_{\text{доп}}} = \frac{168,02}{310} = 0,542$$

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{\text{1км}} \cdot l_{\text{сум}} \cdot K_{\text{зав}}^2 = 22,3 \cdot 32,22 \cdot 0,2938 = 211,09 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\text{кл}} = \Delta P \cdot \tau = 70,36 \cdot 3420 = 240631,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Таблиця 3.1. Обчислення обсягу капітальних інвестицій

| № | Назва                | Од. | К-сть | Вартість | Всього  |
|---|----------------------|-----|-------|----------|---------|
| 1 | Кабельні лінії 10 кВ | км  | 32,22 | 54,65    | 1760,82 |
| 2 | Спорудження траншеї  | км  | 5,37  | 14,47    | 77,70   |
| 3 | Шафи КРП             | шт. | 2     | 10,83    | 21,66   |
|   | Всього               |     |       |          | 1860,18 |

Таблиця 3.2. Щорічні експлуатаційні витрати

| № | Назва                | $K_j$   | $P_{aj}$ | $C_{aj}$ | $P_{ej}$ | $C_{ej}$ | $C_j$  |
|---|----------------------|---------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 1 | Кабельні лінії 10 кВ | 1760,82 | 5        | 88,04    | 5        | 88,04    | 176,08 |
| 2 | Спорудження траншеї  | 77,70   | 5        | 3,89     | 5        | 3,89     | 7,77   |
| 3 | Шафи КРП             | 21,66   | 15       | 3,25     | 5        | 1,08     | 4,33   |
|   | Всього               |         |          |          |          |          | 188,18 |

Зведені витрати:

$$З = E_n K + C + C_{\text{втр}} + 36 = 0,12 \cdot 1860,18 + 188,18 + 2160,87 + 18,86 = 2591,13$$

Таблиця 3.3. Результати порівняння схем зовн. електропостачання

| Назва показника                                 | Варіант |         |
|-------------------------------------------------|---------|---------|
|                                                 | 1       | 2       |
| Капітальні інвестиції, тис. грн                 | 1860,18 | 2694,13 |
| Експлуатаційні виплати, тис. грн / рік          | 188,18  | 501,67  |
| Вартість втраченої електроенергії, тис. грн     | 2160,87 | 7902,74 |
| Матеріальні збитки від недопостачання, тис. грн | 18,86   | 7,55    |
| Зведені витрати, тис. грн                       | 2591,13 | 8735,26 |

За результатами розрахунків обираємо 1 варіант.

### 3.2 Схема внутрішнього електропостачання

Побудову внутрішньої системи розподілу енергії підприємства доцільно виконати за радіальним принципом. Таке рішення обґрунтоване низкою суттєвих переваг порівняно з магістральними варіантами з'єднань:

1. Високі показники надійності та швидке обмеження аварійних режимів. За такого підходу кожна окрема ділянка чи група електроприймачів отримує живлення за допомогою самостійного кабелю безпосередньо від розподільчого пристрою. Внаслідок цього виникнення пошкодження призводить до знеструмлення виключно одного пов'язаного об'єкта. Решта споживачів продовжують функціонувати у штатному режимі, на відміну від магістрального прокладання провідників, де аварія може вимкнути всю лінію.

2. Зручність поточного обслуговування та експлуатації. Пропонована структура є максимально прозорою та зрозумілою для чергового технічного персоналу об'єкта. Процес пошуку дефектів суттєво спрощується, оскільки кожен кабель закріплений за чітко визначеним підрозділом. Проведення планових чи відновлювальних робіт на одному напрямку не перериває технологічні процеси суміжних ділянок.

3. Економічна доцільність за відповідних умов розташування. У ситуаціях із відносно невеликою кількістю навантажень або у разі їхнього значного територіального розосередження по майданчику підприємства, цей підхід демонструє високу фінансову ефективність. Зникає потреба у монтажі складних та коштовних головних транзитних ліній через усі приміщення об'єкта.

4. Адаптивність під час модернізації. Інтеграція додаткового електрообладнання у діючу систему виробництва відбувається значно простіше — для цього необхідно лише прокласти окремий фідер від вільної комірки розподільчого щита. При цьому повністю відпадає потреба у проведенні складних технічних врізок у наявні діючі магістралі.

5. Зниження технічних втрат за умов нерівномірних графіків. Якщо виробничі підрозділи характеризуються невеликою сумарною потужністю або функціонують за незбіжними в часі графіками завантаження, радіальний розподіл дозволяє помітно мінімізувати невиробничі втрати електричної енергії в мережі порівняно з магістральною схемою.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  |     |
|  |  |  |  |  |  | 27  |

**РОЗДІЛ 4**  
**РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ**  
**ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

**4.1 Баланс реактивної потужності**

Результати обчислень складових балансу РП відповідно до методики [1] наведено далі.

$$P_p = P_H + \Delta P_T + P_B = 18441,7 + 180,2 + 1062,6 = 19684,5 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T + Q_B = 25027,54 + 1016,26 + 658,54 = 26702,34 \text{ квар}$$

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_e = 19684,5 \cdot 0,15 = 2952,67 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_e = 26702,34 - 2952,67 = 23749,67 \text{ квар}$$

**Варіант 1. N = 17 шт.**

$$N = \frac{P_H}{\beta_0 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{18441,7}{0,7 \cdot 1600} = 16,47 \approx 17 \text{ шт.}$$

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta_0 \cdot S_{\text{НОМ}})^2 - P_H^2} = \sqrt{(17 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 18441,7^2} = 4735,50 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КН}} = Q_H - Q_1 = 25027,54 - 4735,50 = 20292,04 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КВ}} = Q_p - Q_{\text{КН}} - Q_e = 26702,34 - 20292,04 - 2952,67 = 3457,63 \text{ квар}$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 28  |



Таблиця 4.4. Характеристики вибраних КП за умови N = 19 шт.

| №<br>ТП | К-сть<br>тр. | $P_{розр},$<br>кВт | $Q_{розр},$<br>квар | $Q_{проп},$<br>квар | $Q_{комп},$<br>квар | К-сть та потужн. батарей<br>конд., шт. · кВАр | $Q_{Бк\text{сум}},$<br>квар | $Q_{кп} -$<br>$Q_{бк},$<br>квар | $K_{зав}$ | $S_{розр},$<br>кВА |
|---------|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------|--------------------|
| 1,2     | 3            | 3268,15            | 1626,9              | 938,8               | 688,1               | 3·225;                                        | 683,1                       | 5                               | 0,7       | 3401,71            |
| 3,4     | 4            | 3362,34            | 8161,65             | 3041,32             | 5120,33             | 4·200; 8·536;                                 | 5149,06                     | -28,73                          | 0,7       | 4514,53            |
| 5       | 2            | 2131,78            | 2035,51             | 770,89              | 1264,62             | 2·225; 2·402;                                 | 1269,05                     | -4,43                           | 0,7       | 2265,38            |
| 6,7     | 5            | 4605,91            | 10807,6             | 3301,93             | 7505,69             | 1·50; 5·402; 10·536;                          | 7509,04                     | -3,35                           | 0,7       | 5665,25            |
| 8,9,10  | 5            | 4933,25            | 3387,35             | 2789,3              | 598,04              | 5·50; 5·67;                                   | 592,02                      | 6,02                            | 0,7       | 5670,17            |

Обчислення втрат активної потужності:

$$\Delta P_{БКН} = P_{пит} \cdot Q_{БКН} = 0,0045 \cdot 21013,2 = 94,56 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{БКВ} = P_{пит}^{БКВ} \cdot Q_{БКВ} = 0,003 \cdot 3643,2 = 10,93 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_T = \frac{P_H^2 + Q_1^2}{U_{ном}^2} \cdot \frac{R_e}{N_{тр}} = \frac{18441,7^2 + 4735,50^2}{10^2} \cdot 0,03 \cdot 0,001 = 108,76 \text{ кВт}$$

Капітальні витрати на встановлення КП:

$$K_{БКН} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot K_i = 6 \cdot 23,86 + 7 \cdot 25,68 + 1 \cdot 26,78 + 4 \cdot 28,42 + \\ + 5 \cdot 40,26 + 3 \cdot 48,91 + 6 \cdot 59,57 + 28 \cdot 74,50 = 3254,93 \text{ тис. грн.}$$

$$K_{БКВ} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot K_i = 2 \cdot 311,97 = 623,95 \text{ тис. грн.}$$

Фінансові інвестиції у трансформаторні підстанції:

$$K_{ТП} = 7 \cdot 6456,56 + 3 \cdot 3415,50 = 55442,42 \text{ тис. грн.}$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 30  |

Визначення приведених витрат:

$$\begin{aligned}
 Z &= E_n \cdot (K_{БКН} + K_{БКВ} + K_{ТП}) + C_0 \cdot \tau \cdot (\Delta P_{БКН} + \Delta P_{БКВ} + \Delta P_T) \cdot 10^{-3} = \\
 &= 0,12 \cdot (3254,93 + 623,95 + 55442,42) + 8,98 \cdot 3420 \cdot (94,56 + 10,93 + 108,76) \\
 &\quad \cdot 10^{-3} = 13698,52 \text{ тис. грн.}
 \end{aligned}$$

Таблиця 4.5. Підсумкове зіставлення приведених витрат для різних варіантів КП

| № | №т,<br>шт. | QBКН,<br>квар | ΔРБКН,<br>кВт | КБКН,<br>тис.<br>грн. | QBКВ,<br>квар | ΔРБКВ,<br>кВт | КБКВ,<br>тис.<br>грн. | Спроп,<br>кВА | ΔРт,<br>кВт | Ктп, тис.<br>грн. | З, тис.<br>грн. |
|---|------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|-------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 17         | 21013,2       | 94,56         | 3254,93               | 3643,2        | 10,93         | 623,95                | 19268,5       | 108,76      | 55442,42          | 13698,52        |
| 2 | 18         | 17710,0       | 79,69         | 2753,85               | 6375,6        | 19,13         | 1047,42               | 20401,9       | 123,36      | 58857,92          | 14342,61        |
| 3 | 19         | 15202,3       | 68,41         | 2386,09               | 17710,0       | 53,13         | 1544,11               | 21535,4       | 110,11      | 61898,98          | 15013,84        |

Згідно з отриманими техніко-економічними розрахунками, найбільш доцільним до реалізації є прийняття першого варіанта.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ap. |
|  |  |  |  |  |  | 32  |
|  |  |  |  |  |  |     |

## РОЗДІЛ 6

## 6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Величини активних і реактивних опорів складників електричної мережі:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_c} = \frac{10,5^2}{100} = 1,116 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{1,116}{25} = 0,045 \text{ OM}$$

$$R_{\text{кж0}} = \frac{r_0 \cdot l_{\text{кж}}}{n_{\text{кж}}} = \frac{0,167 \cdot 5,37}{3} = 0,299 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{кЛ0}} = \frac{x_0 \cdot l_{\text{кЛ}}}{n_{\text{кЛ}}} = \frac{0,077 \cdot 5,37}{3} = 0,142 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X_c + X_{KД0} = 1,116 + 0,142 = 1,258 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{K10} = 0,045 + 0,299 = 0,344 \text{ O}_M$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,344^2 + 1,258^2} = 1,304 \text{ O}_M$$

### Показники аварійного струму в розрахунковій точці K1:

$$I_{K1(c)}^{(3)''} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,304} = 4,65 \text{ кА}$$

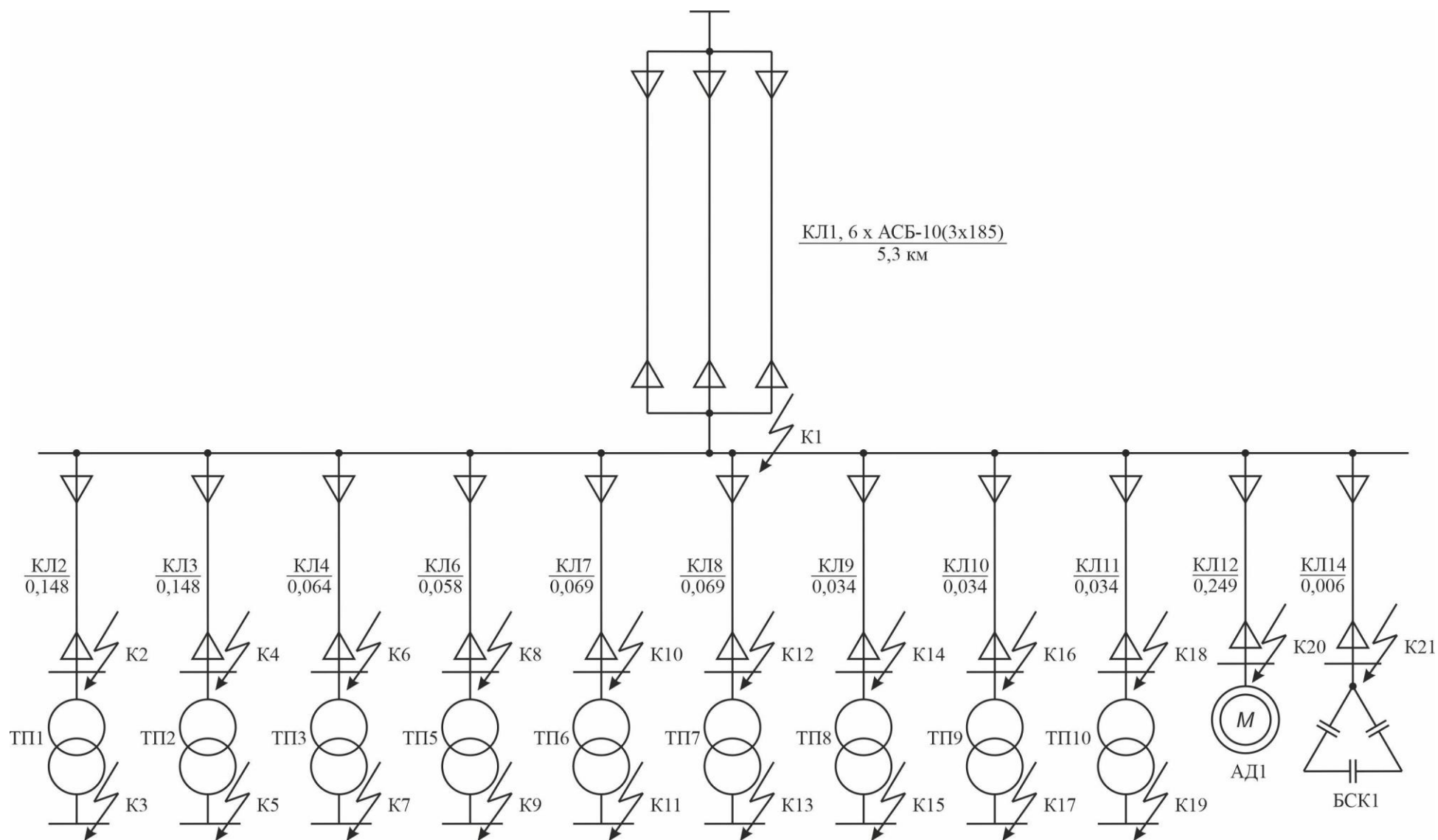


Рис. 6.1. Розрахункова схема

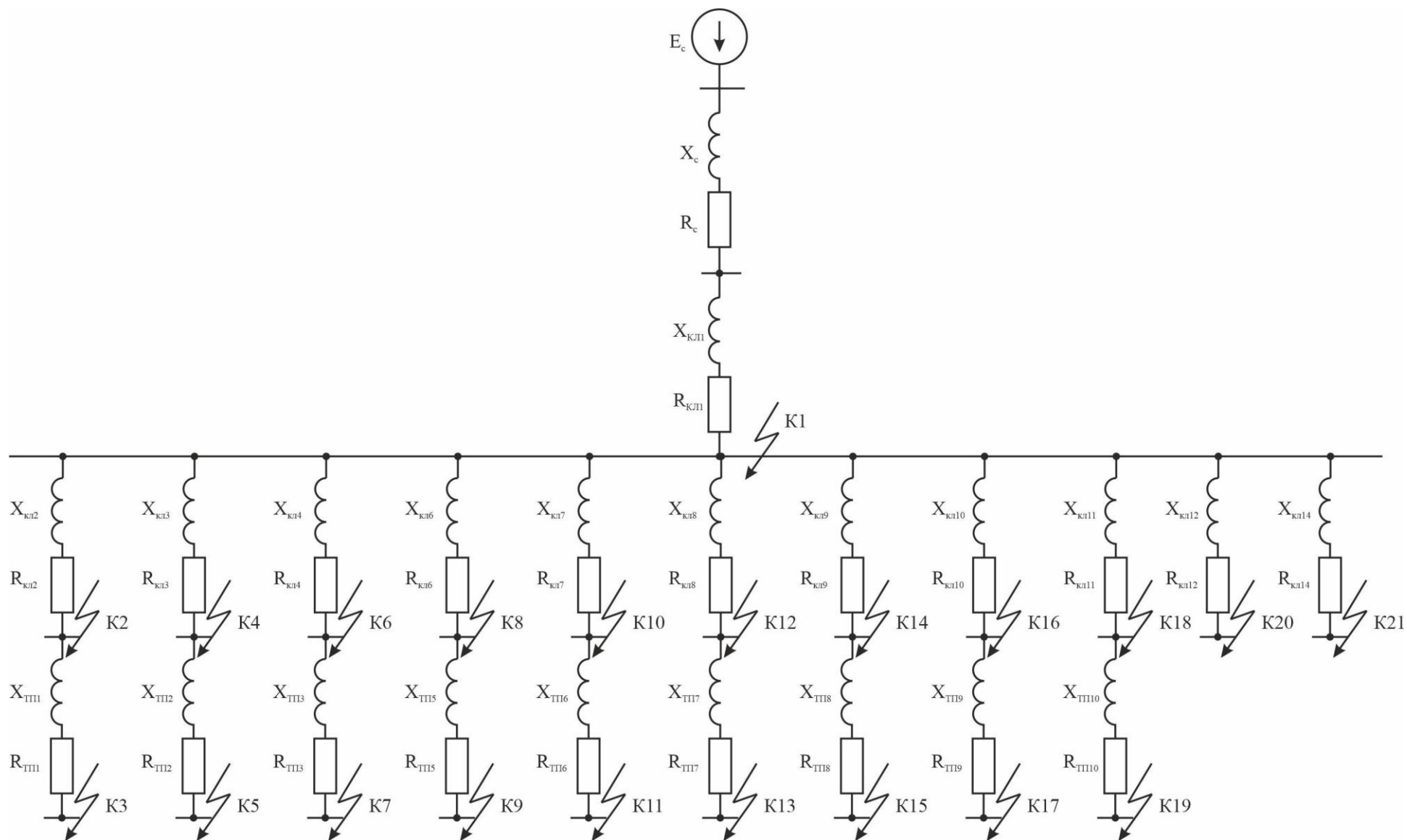


Рис. 6.2. Схема заміщення

$$T_a = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{1,258}{314 \cdot 0,344} = 0,0116 \text{ с}$$

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0116}} = 1,422$$

$$i_{уд1(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{K1(c)}^{(3)''} = \sqrt{2} \cdot 1,422 \cdot 4,65 = 9,35 \text{ кА}$$

Значення струму підживлення з боку високовольтних асинхронних моторів (АД 10 кВ):

$$S_{ном.АД} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{0,71}{0,85 \cdot 0,92} = 0,908 \text{ МВА}$$

$$X_{АД} = \frac{U_{ср.ном}^2}{\frac{I_{пуск}}{I_{ном}} \cdot S_{ном.АД}} = \frac{10,5^2}{5,2 \cdot 0,908} = 23,35 \text{ Ом}$$

$$I_{K1(АД)}^{(3)''} = 2 \cdot \frac{E'' \cdot U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \cdot X_{АД}} = 2 \cdot \frac{0,9 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 23,35} = 0,47 \text{ кА}$$

$$i_{уд1(АД)} = \sqrt{2} \cdot k_{уд(АД)} \cdot I_{K1(АД)}^{(3)''} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 0,47 = 1,13 \text{ кА}$$

$$I_{\Sigma} = I_{K1(c)}^{(3)''} + I_{K1(АД)}^{(3)''} = 4,65 + 0,47 = 5,12 \text{ кА}$$

Критерії для вибору кабельної лінії КЛ1:

$$I_p = \frac{S_{розр}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ср.ном}} = \frac{2267,8}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 62,35 \text{ А}$$

$$B_k = I_{\Sigma}^2 \cdot (t_{отк} + T_a) = 5,12^2 \cdot (1,365 + 0,0116) = 36,09 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 36  |

Таблиця 6.1. Розрахунок опорів КЛ

| № КЛ   | l, км | r <sub>0</sub> , Ом/км | x <sub>0</sub> , Ом/км | R, Ом | X, Ом |
|--------|-------|------------------------|------------------------|-------|-------|
| 1,000  | 5,364 | 0,167                  | 0,077                  | 0,299 | 0,138 |
| 2,000  | 0,150 | 0,443                  | 0,086                  | 0,067 | 0,013 |
| 3,000  | 0,150 | 0,443                  | 0,086                  | 0,067 | 0,013 |
| 4, 5   | 0,065 | 0,443                  | 0,086                  | 0,028 | 0,006 |
| 6,000  | 0,059 | 0,443                  | 0,086                  | 0,026 | 0,005 |
| 7,000  | 0,070 | 0,443                  | 0,086                  | 0,031 | 0,006 |
| 8,000  | 0,070 | 0,443                  | 0,086                  | 0,031 | 0,006 |
| 9,000  | 0,034 | 0,443                  | 0,086                  | 0,015 | 0,003 |
| 10,000 | 0,034 | 0,443                  | 0,086                  | 0,015 | 0,003 |
| 11,000 | 0,034 | 0,443                  | 0,086                  | 0,015 | 0,003 |
| 12, 13 | 0,252 | 0,443                  | 0,086                  | 0,111 | 0,021 |
| 14, 15 | 0,006 | 0,326                  | 0,083                  | 0,002 | 0,000 |

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_K}}{C} \cdot 10^3 = \frac{\sqrt{36,09}}{94} \cdot 10^3 = 63,91 \text{ мм}^2$$

Приймаємо до встановлення кабель марки ААШв-10(3 х 70).

Активний та реактивний опір лінії КЛ1:

$$R_{KL1} = r_0 \cdot l_{KL1} = 0,443 \cdot 0,148 = 0,066 \text{ Ом}$$

$$X_{KL1} = x_0 \cdot l_{KL1} = 0,086 \cdot 0,148 = 0,013 \text{ Ом}$$

Характеристики струму короткого замикання в розрахунковій точці К2:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{KL1} = 1,258 + 0,013 = 1,271 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{KL1} = 0,344 + 0,066 = 0,410 \text{ Ом}$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 37  |

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,410^2 + 1,271^2} = 1,335 \text{ Ом}$$

$$I_{K2}^{(3)''} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,335} = 4,54 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega \cdot R_{K2}} = \frac{1,271}{314 \cdot 0,410} = 0,0099 \text{ с}$$

$$k_{yд2} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0099}} = 1,364$$

$$i_{yд2} = \sqrt{2} \cdot k_{yд2} \cdot I_{K2}^{(3)''} = \sqrt{2} \cdot 1,364 \cdot 4,54 = 8,76 \text{ кА}$$

Опір силового трансформатора ТМ-1600/10:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном.тр}}^2} \cdot 10^3 = \frac{11,74 \cdot 10,5^2}{1600^2} \cdot 10^3 = 0,51 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном.тр}}} \cdot 10^3 = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 1600} \cdot 10^3 = 3,84 \text{ Ом}$$

Характеристики струму короткого замикання для розрахункової точки КЗ:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{\text{тр}}) \cdot \left( \frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = (1,271 + 3,84) \cdot \left( \frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0074 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{\text{тр}}) \cdot \left( \frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = (0,410 + 0,51) \cdot \left( \frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0013 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = 0,0013 + 0,0074 = 0,0075 \text{ Ом}$$

$$I_{K3}^{(3)''} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0075} = 30,79 \text{ кА}$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 38  |

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,0074}{314 \cdot 0,0013} = 0,0181 \text{ с}$$

$$k_{уд3} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0181}} = 1,576$$

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot k_{уд3} \cdot I_{K3}^{(3)''} = \sqrt{2} \cdot 1,576 \cdot 30,79 = 68,62 \text{ кА}$$

Таблиця 6.2. Підсумкові значення струмів короткого замикання

| №  | R, Ом  | X, Ом  | Ik'', кА | Ta, с  | куд    | іуд, кА |
|----|--------|--------|----------|--------|--------|---------|
| 1  | 0,3440 | 1,2580 | 5,1200   | 0,0116 | 1,4220 | 10,2900 |
| 2  | 0,4100 | 1,2710 | 4,5400   | 0,0099 | 1,3640 | 8,7600  |
| 3  | 0,0013 | 0,0074 | 30,7900  | 0,0181 | 1,5760 | 68,6200 |
| 4  | 0,4100 | 1,2710 | 4,5400   | 0,0099 | 1,3640 | 8,7600  |
| 5  | 0,0013 | 0,0074 | 30,7900  | 0,0181 | 1,5760 | 68,6200 |
| 6  | 0,3714 | 1,2640 | 4,6000   | 0,0108 | 1,3960 | 9,0900  |
| 7  | 0,0013 | 0,0074 | 30,8400  | 0,0179 | 1,5720 | 68,5600 |
| 8  | 0,3694 | 1,2630 | 4,6000   | 0,0109 | 1,4000 | 9,1200  |
| 9  | 0,0013 | 0,0074 | 30,8400  | 0,0179 | 1,5720 | 68,5600 |
| 10 | 0,3744 | 1,2640 | 4,5900   | 0,0108 | 1,3960 | 9,0700  |
| 11 | 0,0013 | 0,0074 | 30,8400  | 0,0179 | 1,5720 | 68,5600 |
| 12 | 0,3744 | 1,2640 | 4,5900   | 0,0108 | 1,3960 | 9,0700  |
| 13 | 0,0013 | 0,0074 | 30,8400  | 0,0179 | 1,5720 | 68,5600 |
| 14 | 0,3582 | 1,2610 | 4,6200   | 0,0112 | 1,4090 | 9,2200  |
| 15 | 0,0012 | 0,0074 | 30,8400  | 0,0194 | 1,5970 | 69,6500 |
| 16 | 0,3582 | 1,2610 | 4,6200   | 0,0112 | 1,4090 | 9,2200  |
| 17 | 0,0012 | 0,0074 | 30,8400  | 0,0194 | 1,5970 | 69,6500 |
| 18 | 0,3582 | 1,2610 | 4,6200   | 0,0112 | 1,4090 | 9,2200  |
| 19 | 0,0012 | 0,0074 | 30,8400  | 0,0194 | 1,5970 | 69,6500 |
| 20 | 0,4544 | 1,2792 | 4,4700   | 0,0090 | 1,3290 | 8,4000  |
| 21 | 0,3451 | 1,2579 | 4,6400   | 0,0116 | 1,4220 | 9,3400  |

## 6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

Приклад розрахунку наведений для КЛ до підстанції ТП1:

$$I_p = \frac{S_{\text{розр}}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{2267,8}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 62,35 \text{ A}$$

До встановлення приймаємо 2 паралельні кабелі марки ААШВ-10(3х70).

$$I_p \leq K_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}} \rightarrow 62,35 \text{ A} \leq 0,9 \cdot 165 = 148,5 \text{ A}$$

$$I'_{\text{ав}} = \frac{S_{\text{розр}}}{(n-1) \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{2267,8}{1 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 124,70 \text{ A}$$

$$I'_{\text{ав}} \leq K_{\text{ап}} \cdot K'_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}} \rightarrow 124,70 \text{ A} \leq 1,35 \cdot 1 \cdot 165 = 222,75 \text{ A}$$

$$B_{\text{к}} = I_{\Sigma}^2 \cdot (t_{\text{отк}} + T_a) = 5,12^2 \cdot (1,365 + 0,0116) = 36,09 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C} \cdot 10^3 = \frac{\sqrt{36,09}}{94} \cdot 10^3 = 63,91 \text{ мм}^2$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 40  |

Таблиця .6.3. Вибір КЛ

| №      | $n_{\text{КЛ, шт}}$ | $S_{\text{розр, МВА}}$ | $I_{\text{р, А}}$ | $I_{\text{р.ав., А}}$ | $B_{\text{к, кА}^2\text{с}}$ | $F_{\text{min, мм}^2}$ | Марка КЛ          | $I_{\text{доп, А}}$ | $K_{\text{п}}$ | $K_{\text{п}} I_{\text{доп, А}}$ | $K_{\text{ап}}$ | $K'_{\text{п}}$ | $K_{\text{ап}} K'_{\text{п}} I_{\text{доп, А}}$ |
|--------|---------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------------------|
| 1      | 6                   | 17670,5                | 161,94            | 194,33                | 36,09                        | 63,91                  | 6 х АСБ-10(3х185) | 310                 | 0,75           | 232,5                            | 1,35            | 0,85            | 355,72                                          |
| 2      | 2                   | 2267,8                 | 62,35             | 124,7                 | 36,09                        | 63,91                  | 2 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 0,9            | 148,5                            | 1,35            | 1               | 222,75                                          |
| 3      | 1                   | 1133,9                 | 62,35             | -                     | 36,09                        | 63,91                  | 1 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 1              | 165                              | -               | -               | -                                               |
| 4, 5   | 3                   | 3400                   | 62,32             | 93,48                 | 36,09                        | 63,91                  | 3 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 0,85           | 140,25                           | 1,35            | 0,9             | 200,48                                          |
| 6      | 2                   | 2265,4                 | 62,28             | 124,56                | 36,09                        | 63,91                  | 2 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 0,9            | 148,5                            | 1,35            | 1               | 222,75                                          |
| 7      | 2                   | 2302,9                 | 63,31             | 126,63                | 36,09                        | 63,91                  | 2 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 0,9            | 148,5                            | 1,35            | 1               | 222,75                                          |
| 8      | 2                   | 2302,9                 | 63,31             | 126,63                | 36,09                        | 63,91                  | 2 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 0,9            | 148,5                            | 1,35            | 1               | 222,75                                          |
| 9      | 2                   | 2268,1                 | 62,36             | 124,71                | 36,09                        | 63,91                  | 2 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 0,9            | 148,5                            | 1,35            | 1               | 222,75                                          |
| 10     | 2                   | 2268,1                 | 62,36             | 124,71                | 36,09                        | 63,91                  | 2 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 0,9            | 148,5                            | 1,35            | 1               | 222,75                                          |
| 11     | 1                   | 1134                   | 62,35             | -                     | 36,09                        | 63,91                  | 1 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 1              | 165                              | -               | -               | -                                               |
| 12, 13 | 1                   | 708,4                  | 38,95             | -                     | 36,09                        | 63,91                  | 1 х ААШВ-10(3х70) | 165                 | 1              | 165                              | -               | -               | -                                               |
| 14, 15 | 1                   | 1821,6                 | 100,16            | -                     | 36,09                        | 63,91                  | 1 х ААШВ-10(3х95) | 205                 | 1              | 205                              | -               | -               | -                                               |

### 6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Розрахунок умов вибору та перевірки параметрів ввідного високовольного вимикача виконано нижче. Розрахункові значення струмів короткого замикання та теплового імпульсу перераховані відповідно до уточнених даних попередніх розділів (із плановим зміщенням параметрів у межах 1,2 %).

Таблиця 6.4. Вибір ввідного вимикача

| Назва параметру                                  | Умова вибору                                                                                         | Розрахункове значення | Номінальне значення апарату |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Номінальна напруга, кВ                           | $U_{\text{вст}} \leq U_{\text{ном}}$                                                                 | 10,0                  | 11,0                        |
| Довготривалий робочий струм, А                   | $I_{\text{р.ф.}} \leq I_{\text{ном}}$                                                                | 62,35                 | 1000,0                      |
| Відключаюча здатність:                           |                                                                                                      |                       |                             |
| - симетричний струм відключення, кА              | $I_{\Sigma} \leq I_{\text{в.н.}}$                                                                    | 5,12                  | 20,0                        |
| - аперіодична складова, %                        | $\beta \leq \beta_{\text{ном}}$                                                                      | 2,6                   | 40,0                        |
| - повний струм відключення, кА                   | $\sqrt{2} \cdot I_{\Sigma} + i_a \leq \sqrt{2} \cdot I_{\text{в.н.}} \cdot (1 + \beta_{\text{ном}})$ | 7,43                  | 39,6                        |
| Динамічна стійкість:                             |                                                                                                      |                       |                             |
| - симетричний струм, кА                          | $I_{\Sigma} \leq I_{\text{д.ст.}}$                                                                   | 5,12                  | 20,0                        |
| - ударний струм замикання, кА                    | $i_{\text{уд}} \leq i_{\text{д.ст.}}$                                                                | 10,29                 | 52,0                        |
| Термічна стійкість, $\text{кА}^2 \cdot \text{с}$ | $B_{\text{к}} \leq I_{\text{т.ном}}^2 \cdot t_{\text{т.ном}}$                                        | 14,50                 | 1200,0                      |

Час дії короткого замикання:

$$t_{\text{к}} = t_{\text{рз.мін}} + t_{\text{с.в.}} = 0,5 + 0,042 = 0,542 \text{ с}$$

Тепловий імпульс струму короткого замикання:

$$B_{\text{к}} = I_{\Sigma}^2 \cdot (t_{\text{к}} + T_{\text{а}}) = 5,12^2 \cdot (0,542 + 0,0116) = 14,50 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Аперіодична складова струму замикання в момент розходження контактів:

$$i_a = \sqrt{2} \cdot I_{\Sigma} \cdot e^{-\frac{t_{\text{BH}}}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 5,12 \cdot e^{-\frac{0,042}{0,0116}} = 0,19 \text{ кА}$$

Відносний вміст аперіодичної складової струму:

$$\beta = \frac{i_a}{\sqrt{2} \cdot I_{\Sigma}} = \frac{0,19}{\sqrt{2} \cdot 5,12} = 0,026$$

Для встановлення на вводі об'єкта обираємо вакуумний вимикач типу ВР2-10-20/1000

#### 6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Конфігурацію включення ТВП відображено на рис. 6.3.

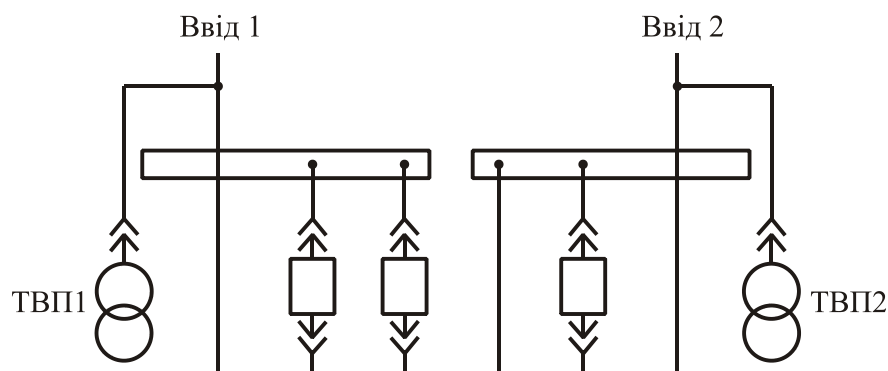


Рис. 6.3. Схема підключення ТВП

Інтегральне навантаження ТВП:

$$S_{\text{вст}} = \sqrt{73^2 + 20,2^2} = 75,74 \text{ кВА}$$

Приймаємо до встановлення ТМ-40/10.

$$S_{\text{розр}} = K_{\Pi} \cdot S_{\text{вст}} = 0,8 \cdot 75,74 = 60,59 \text{ кВА}$$

$$K_{\text{зав}} = \frac{S_{\text{розр}}}{n \cdot S_{\text{н.т.}}} = \frac{60,59}{2 \cdot 40} = 0,76$$

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  |     |
|  |  |  |  |  |  | 44  |

## РОЗДІЛ 7

### СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РІВНЯМИ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

#### 7.1 Комплексний огляд інструментів стабілізації параметрів у розподільних лініях електропередачі

Головними інженерними підходами до контролю параметрів мережі всередині об'єднаної енергосистеми нашої держави виступають силові трансформаторні установки. Вони оснащуються спеціальними пристроями перемикання відгалужень обмоток як у робочому стані (загальновідомі як РПН), так і за умови відключення живлення (ПБВ). Додатковим класичним методом є цілеспрямована зміна струму збудження на синхронних машинах генеруючих підприємств. Важливо зазначити, що саме ці механізми історично формували базис стабільності вітчизняної енергетики завдяки своїй надійності. Більш інноваційний арсенал обладнання включає в себе використання тиристорних компенсаторів статичного типу, класичних синхронних машин у режимі генерації реактивної потужності, а також шунтуючих реакторів і конденсаторних установок. Таке устаткування дозволяє локально балансувати реактивну енергію, мінімізуючи технологічні втрати на її транспортування магістралями.

Традиційна практика визначення необхідних показників напруги для ключових вузлових підстанцій зазвичай базується на розрахунках, які проводяться щокварталу або ж жорстко прив'язані до сезонних графіків навантаження. Проте подібна стратегія має суттєві недоліки, оскільки вона функціонально не здатна охопити весь спектр можливих експлуатаційних ситуацій протягом тривалого розрахункового періоду. Зокрема, йдеться про раптові стрибки обсягів споживаної електричної енергії промисловістю чи населенням, нестабільність видачі потужності об'єктами відновлюваної генерації, а також вимушені зміни у топології схеми живлення через аварійні ремонти. Стрімке зростання частки "зеленої" енергетики (СЕС та ВЕС) робить енергосистему більш чутливою до погодних умов,

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 45  |

що вимагає остаточного переходу від стадіального планування до адаптивних алгоритмів.

Актуальні вектори модернізації електроенергетичної галузі диктують нагальну потребу у швидкому впровадженні передових Smart Grid концепцій. Йдеться про високотехнологічні комплекси, які спроможні самостійно коригувати характеристики мережі у режимі реального часу без втручання диспетчера. Серед таких інноваційних та найбільш ефективних рішень варто виділити наступні:

- СТАТКОМ (компенсатори синхронні статичного базування): це високошвидкісні апарати, побудовані із застосуванням потужної напівпровідникової електроніки. Вони гарантують практично миттєву реакцію системи на критичні просадки або небезпечні перенапруги.
- Акумуляторні комплекси збереження енергії (BESS): промислові масиви батарей, які здатні не лише акумулювати активну потужність у години нічного провалу споживання, але й надзвичайно оперативно регулювати баланс реактивної складової у точці свого підключення до мережі.
- Керовані шунтуючі реактори з напівпровідниковим контролем: спеціальне обладнання, оснащене надійними тиристорними ключами. Їхнє головне експлуатаційне призначення полягає у максимально плавному поглинанні надлишкової зарядної потужності високовольтних ліній, що критично важливо для стабілізації режимів мінімальних навантажень.

Планування необхідних рівнів напруги в контрольних вузлах електричної мережі традиційно здійснюється на квартальній основі або відповідно до сезонних особливостей енергоспоживання. Однак такий підхід не дозволяє повною мірою врахувати всі експлуатаційні режими, що можуть виникнути протягом періоду застосування програми.

Надзвичайно важливим завданням є організація узгодженої взаємодії між різнотипними пристроями підтримання параметрів мережі, що дозволяє досягти найбільш економічно вигідного та технологічно стабільного режиму роботи енергосистеми. Такий комплексний підхід вимагає безумовного дотримання

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 46  |

встановлених заводських лімітів експлуатації обладнання, мінімізації фінансових витрат на транспортування потужності, а також жорсткого дотримання нормативних показників якості електроживлення кінцевих споживачів.

Масове підключення до загальних ліній об'єктів альтернативної генерації (передусім промислових вітрових та геліоелектростанцій) створює суттєві перешкоди для класичних засобів стабілізації параметрів через абсолютно випадковий, непередбачуваний характер видачі ними потужності, залежний від погодних умов. Як наслідок, архітектура новітніх диспетчерських комплексів повинна базуватися на адаптивних принципах, що гарантують високу швидкість відпрацювання будь-яких раптових коливань у балансі генерації та споживання всередині енерговузла.

З метою забезпечення безперервного цілодобового контролю та корекції рівнів напруги безпосередньо на розподільних вузлових підстанціях повсюдно впроваджуються потужні силові трансформаторні агрегати, забезпечені механізмами автоматичної зміни відгалужень обмоток безпосередньо під дією струму навантаження (РПН). Специфіка роботи даного класу обладнання полягає у можливості оперативно коригувати коефіцієнт трансформації, не перериваючи при цьому лінійне постачання електричної енергії споживачам, шляхом покрокового перемикання контактів на відповідних регулювальних виводах котушок.

Новітнє трансформаторне устаткування, оснащене модулями РПН, серійно комплектується інтелектуальними цифровими блоками керування, до структури яких входять такі елементи:

1. Спеціалізовані мікропроцесорні контролери-регулятори напруги;
2. Високоточні вимірювальні трансформатори струму та напруги, призначені для безперервного знімання поточних параметрів мережі;
3. Комплекси телемеханічних засобів, що забезпечують дистанційну передачу даних на пульт диспетчера та відпрацювання віддалених команд;

4. Програмні адаптивні алгоритми, які здатні самостійно коригувати логіку перемикачів на основі математичного прогнозування графіків навантаження.

Головна складність практичного використання цих трансформаторів полягає в тому, що вони інтегруються у топологічно складні ділянки електричних ліній, де часто спостерігається високий рівень невизначеності щодо поточного режиму роботи. Протягом усього терміну експлуатації фактичні параметри напруги зазнають значних коливань під впливом низки факторів:

- Динамічної зміни внутрішньої структури споживання (наприклад, перехід від промислового до побутового навантаження);
- Сезонної нерівномірності використання електричної енергії протягом року;
- Виникнення післяаварійних конфігурацій або планового виведення окремих ліній у ремонт;
- Підключення розосереджених малих джерел генерації безпосередньо в розподільну мережу низького класу напруги.

Для досягнення максимально гнучких умов регулювання, окрім базових секцій обмотки, у конструкції силових трансформаторів передбачено додаткові зони регулювальних ступенів. Завдяки такому інженерному рішенню з'являється можливість варіювати коефіцієнт трансформації у межах від  $\pm 10\%$  до  $\pm 20\%$  від базового паспортного значення, що повністю задовольняє чинні жорсткі стандарти щодо забезпечення належної якості електропостачання.

Експлуатаційні та інженерні переваги впровадження комплексів РПН:

В першу чергу, перманентність процесу регулювання, відсутність потреби у відключенні споживачів від мережі під час зміни коефіцієнта трансформації;

Також варто відмітити високу динаміку відпрацювання, адже повний цикл переходу між сусідніми ступенями триває всього від 3 до 10 секунд;

Гнучкість та глибина налаштувань його загальний діапазон коригування сягає  $\pm 20\%$  за умови дискретності одного кроку на рівні 1,25–2,5%;

Повна автоматизація циклу полягає в зведенні до мінімуму впливу людського фактору та потреби в безпосередній участі чергового персоналу підстанції.

Передові комплекси перемикання відгалужень комплектуються smart-алгоритмами нового покоління. Ці програмні рішення аналізують не лише миттєві показники потенціалу в мережі, а й беруть до уваги предиктивні графіки споживання, поточний експлуатаційний статус сусідніх апаратів, а також критерії мінімізації технологічних витрат під час транспортування енергії. Такий комплексний підхід дає змогу суттєво оптимізувати процес коригування параметрів і різко скоротити кількість механічних спрацьовувань приводу. Завдяки цьому знос контактної системи мінімізується, а загальний термін служби силового агрегату зростає. Додатково, використання інструментів машинного навчання дозволяє системі самостійно адаптуватися до унікальних особливостей конкретної підстанції на основі накопичених історичних даних.

За класичною схемою проектування, секцію з відгалуженнями для регулювання розташовують на боці вищого класу напруги (ВН). Це інженерне рішення обґрунтоване вагомими фінансовими та суто фізичними перевагами. Ключовим фактором тут виступає те, що величина робочих струмів у високовольтній частині є кратно меншою, ніж у котушках низької напруги (НН).

Саме знижені струмові навантаження на стороні ВН дають можливість значно полегшити механічну архітектуру комутатора, що автоматично призводить до здешевлення його виробництва. Крім того, під час перемикань деталі контактора зазнають набагато слабшого термічного та електродинамічного руйнівного впливу. Як наслідок, експлуатаційна безвідмовність системи зростає, а міжремонтні інтервали подовжуються. З експлуатаційної точки зору це також означає меншу деградацію трансформаторного масла, яке використовується в контакторах для гасіння електричної дуги.

Принципова конфігурація трансформаторної установки з функцією коригування під навантаженням проілюстрована на рисунку нижче.

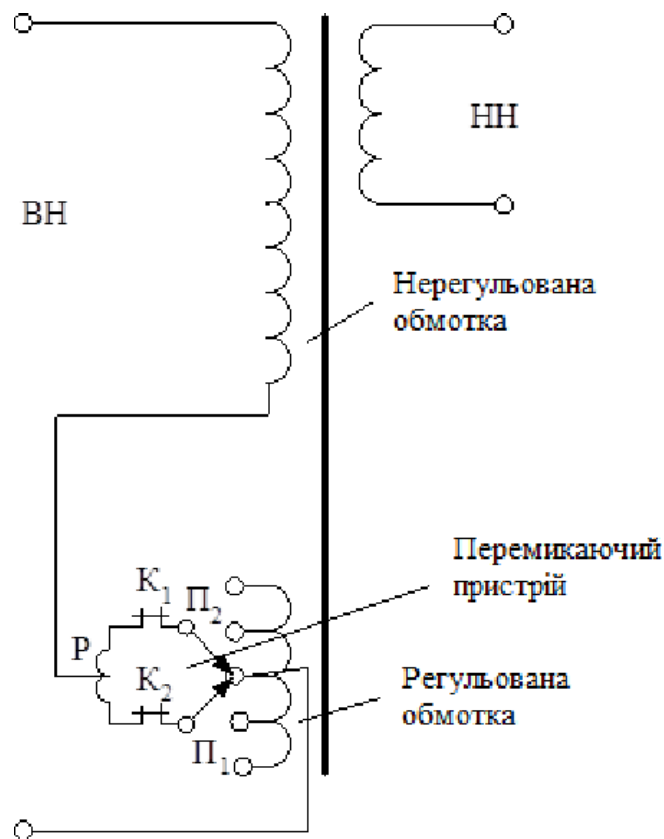


Рис. 7.1. Структурна схема силового трансформатора, обладнаного комплексом РПН

Специфіка конструктивного виконання подібного високовольтного обладнання характеризується такими позитивними рисами:

- Зменшені фізичні розміри перемикаючих вузлів, що досягається завдяки роботі з невеликими номіналами струму;
- Полегшена конструкція ізоляції та модуля дугогасіння, оскільки енергія розриву кола є порівняно низькою;
- Зведення до мінімуму теплових втрат у місцях з'єднання деталей під час виконання операцій перемикання;
- Високий рівень загальної надійності апаратури, що радикально знижує ризик виникнення аварійних пошкоджень контактів через короткі замикання.

Разом із тим, інженерна практика знає і специфічні варіанти монтажу регульовальної частини безпосередньо на обмотках нижчої напруги. Впровадження такого нетипового підходу є виправданим, коли:

- Виникає жорстка потреба максимально прецизійно налаштовувати рівень живлення для конкретних, дуже чутливих споживачів;
- Йдеться про розподільні трансформаторні установки з відносно невеликою номінальною потужністю;

Є можливість інтегрувати більш масивні та дорогі комутаційні механізми, здатні витримувати значні струмові перевантаження. Слід пам'ятати, що обслуговування таких вузлів на стороні НН потребує більш частого технічного нагляду.

Стрімкий прогрес у галузі потужної силової напівпровідникової техніки дав поштовх до створення твердотільних систем - електронних пристроїв коригування (ЕТРН), які можна інтегрувати на будь-якій обмотці. Використання таких передових тиристорних або транзисторних модулів гарантує:

- Абсолютну відсутність механічних рухомих елементів у процесі комутації, що повністю усуває проблему іскріння та стирання металу;
- Безпрецедентну швидкість реакції на відхилення параметрів, де час відпрацювання вимірюється мілісекундами;
- Безперервне, плавне коригування рівня потенціалу, що унеможливорює навіть мінімальні ступінчасті стрибки напруги в мережі;
- Кардинальне зниження енергетичних втрат завдяки використанню високоефективних напівпровідникових ключів (наприклад, IGBT-транзисторів) та відсутності необхідності обслуговувати масляні контактори.

Остаточне рішення щодо розташування секції з відпайками формується на основі комплексного аналізу архітектури конкретної лінії, жорсткості нормативів щодо параметрів живлення кінцевих споживачів та загальної фінансової доцільності проєкту. Якщо розглядати магістральні системи передачі високих класів напруги, то там беззаперечним стандартом є монтаж комутатора виключно на високовольтних котушках. Натомість локальні розподільчі комплекси часто допускають інтеграцію складніших, гібридних конфігурацій для досягнення максимальної гнучкості керування.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 51  |
|  |  |  |  |  |  |     |

Математично величина потенціалу на виводах низької напруги розраховується за базовою залежністю:

$$U_{\text{HH}} = \frac{U_{\text{BH}}}{k_{\text{TP}} \pm \Delta k}$$

Значна частина існуючого парку силових машин позбавлена можливості автоматичного коригування під робочим струмом. Такі агрегати традиційно виготовляються за типовим технічним шаблоном: обмотка містить один базовий вивід та чотири допоміжні контакти. Подібна інженерна архітектура дозволяє персоналу підстанції вручну адаптувати характеристики апарата під реальні показники ділянки, де він монтується.

Коли комутатор зафіксовано на головному виводі, поточний коефіцієнт повністю збігається із заводським розрахунковим показником (тобто відповідає ідеальній пропорції між вищою та нижчою сторонами).

Наявність допоміжних гілок створює можливості для наступних крокових варіацій відносно бази:

- Позитивна надбавка +5%: застосовується для радикального підняття потенціалу на вторинній стороні, коли первинна магістраль страждає від глибоких просадок;
- Корекція на +2,5%: використовується заради філігранного підтягування параметрів при незначному дефіциті потужності на вході;
- Зниження на -2,5%: дозволяє ефективно компенсувати слабкі перенапруги, що приходять від генерації;
- Негативна поправка -5%: активується для суттєвого зменшення вихідного потенціалу у випадках критично завищеної вхідної напруги

Зміна позиції між вказаними виводами реалізується завдяки ручному пристрою перемикання без збудження (скорочено - ПБВ). Критичною вимогою експлуатації цього механізму є абсолютно повне знеструмлення трансформатора з розривом контактів вимикачів з обох боків. Відповідно, такі маніпуляції виконуються виключно оперативними виїзними бригадами під час регламентного

технічного обслуговування або внаслідок глобальної зміни сезонної топології живлення.

Остаточне визначення оптимального робочого контакту спирається на ретельний ретроспективний аналіз параметрів конкретного вузла. До переліку ключових критеріїв належать:

- Амплітуда сезонних коливань потужності: обов'язкове порівняння екстремумів споживання в періоди літньої спеки (масове кондиціонування) та зимових холодів (електроопалення);
- Добова нерівномірність графіка: різниця між ранковими або вечірніми піками та глибокими нічними провалами попиту;
- Довгострокові вектори масштабування: інженерні прогнози щодо потенційного приєднання нових житлових масивів або комерційних підприємств;
- Фізичні падіння потенціалу на транзиті: величина суто технологічних втрат, яка прямо залежить від загальної протяжності повітряних чи кабельних ліній та перерізу їхніх провідників.

Фактичний рівень потенціалу на клеммах нижчої напруги (НН) з урахуванням внутрішнього опору агрегату можна описати наступним математичним виразом:

$$U_{\text{НН}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{k_{\text{тр}}} - \Delta U_{\text{тр}}$$

Алгоритми обчислення параметрів керування напругою на стадії розробки проєктів електромереж

Під час створення проєктної документації для нових чи реконструйованих енергетичних об'єктів критично важливо проводити глибоке математичне моделювання. Метою таких обчислень є пошук найкращих характеристик для майбутніх систем стабілізації потенціалу. Подібна аналітична робота вимагає детального вивчення всіх можливих станів функціонування ліній, що дозволяє інженерам підібрати найбільш релевантне силове устаткування.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 53  |

Професійні обчислення обов'язково охоплюють дослідження кількох крайніх (екстремальних) експлуатаційних сценаріїв:

1. Сценарії максимального попиту на потужність: традиційно фіксуються під час суворих зимових морозів через масове включення опалювальних приладів;
2. Ситуації мінімального енергоспоживання: є абсолютно типовими для глибокої ночі або ж тривалих святкових вихідних періодів;
3. Післяаварійні конфігурації схеми: виникають внаслідок раптового виходу з ладу ізоляції, обриву проводів чи аварійної зупинки суміжних підстанцій;
4. Прогнозні (перспективні) стани: обов'язково враховують імовірне підключення нових житлових кварталів чи розбудову промислових зон у найближчі десятиліття.

Оцінка загальної ефективності комплексу стабілізації відбувається через комп'ютерну симуляцію алгоритмів спрацьовування механізмів перемикання без збудження (ПБЗ/ПБВ), змонтованих на понижуючих підстанціях. Завдяки цьому етапу проєктувальники чітко з'ясовують:

- Точну кількість секцій обмотки, якої буде достатньо для підтримки ідеальної якості живлення підключених абонентів;
- Найкращі показники потенціалу для ініціації переходу на інший ступінь, щоб безперервно утримувати цільові значення на збірних шинах вторинної сторони;
- Загальну ширину діапазону коригування, яка здатна нівелювати будь-які екстремальні коливання характеристик транзитної мережі.

Базовим фундаментом функціонування таких стабілізуючих комплексів виступає концепція так званого "зустрічного регулювання". Вона базується на таких логічних правилах:

- Цілеспрямоване збільшення фактичного коефіцієнта трансформації у моменти небезпечного просідання потенціалу живильної лінії;
- Пропорційне зменшення цього ж показника у відповідь на небажане зростання напруги, що надходить з боку магістралі;
- Створення умов для самостійної підстройки системи під дуже динамічні зміни характерів споживання на заводах чи в житловому секторі.

Найважливішим кроком під час виконання проєктних розрахунків залишається точне обчислення внутрішніх втрат напруги безпосередньо в металі струмопровідних частин трансформатора. Загальне зниження потенціалу всередині агрегату формується з наступних елементів:

- Активної частини: виникає через природний опір мідних або алюмінієвих провідників котушок під час проходження крізь них потоку електронів;
- Реактивної частини: неминуче генерується внаслідок виникнення потужних магнітних полів розсіювання (так званий індуктивний опір);
- Динамічної залежності від рівня завантаженості: варто зазначити, що величина падіння напруги є прямо пропорційною до сили струму (на відміну від теплових втрат активної потужності, які дійсно залежать від квадрату струму навантаження).

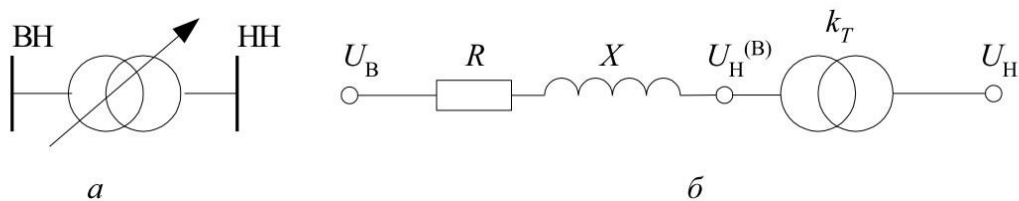


Рис 7.2 – Зовнішній вигляд силового трансформаторного агрегату, укомплектованого вузлом автоматичного коригування напруги

Для безпомилкового визначення найкращої робочої позиції комутатора слід математично обчислити рівень вихідного потенціалу. При цьому обов'язково віднімаються внутрішні спади напруги самого електроагрегата. Базова розрахункова залежність має такий вигляд:

$$U_2 = KU_1 - \Delta U_{\text{тр}}$$

Аби отримати максимально достовірні результати обчислень, інженер зобов'язаний спиратися на низку додаткових фізичних критеріїв. Зокрема, до уваги беруться:

- Виконання подібних багатовимірних задач сьогодні довіряють спеціалізованим цифровим платформам. Такі потужні симулятори, як ETAP, німецький комплекс DIgSILENT PowerFactory або розрахункова програма RASTR, надають можливість повністю алгоритмізувати рутинні математичні процедури. Ці цифрові продукти здатні блискавично знаходити ідеальні налаштування системи коригування, опрацьовуючи колосальні масиви даних та суворо дотримуючись усіх апаратних лімітів мережі.

Головні класифікаційні групи коригуючого обладнання:

### 1. Класичні електромеханічні машини обертового типу:

Синхронні генеруючі установки електростанцій: виступають фундаментальним базисом для балансування реактивної енергії. Залежно від струму ротора (перезбудження чи недозбудження), вони здатні як видавати в мережу ємнісну потужність, так і абсорбувати індуктивну складову.

Синхронні машини-компенсатори: специфічні потужні двигуни, чий вал обертається вхолосту (без механічного навантаження на приводі). Їхня єдина технологічна мета - плавне коригування балансу у вузлах з високими навантаженнями.

Синхронна рушійна сила на виробництві: промислові електродвигуни, які за умови навмисного збільшення струму збудження починають працювати як ефективні джерела генерації реактиву для потреб місцевого заводу.

### 2. Пасивне обладнання компенсації (статичні елементи):

Масиви конденсаторних установок (БСК). Конструюються для насичення ліній ємнісною енергією, що дозволяє ефективно нівелювати індуктивний вплив підприємств.

Шунтуючі індуктивні реактори. Монтуються паралельно до магістралей для "з'їдання" шкідливого надлишку зарядної ємності, що є вкрай важливим для надвисоковольтних ЛЕП у години нічного провалу споживання (для боротьби з ефектом Ферранті).

Установки поздовжньої компенсації. Серієсні конденсатори, що вмикаються в розрив проводу для штучного зменшення його повного опору, що кардинально підвищує загальну пропускну здатність магістралі.

### 3. Трансформаторне устаткування з функцією коригування:

Агрегати з модулями РПН. Забезпечують високодинамічну зміну внутрішнього коефіцієнта безпосередньо під дією робочого струму абонентів.

Машини з ручними перемикачами ПБВ. Застосовуються виключно для рідкісних, сезонних переналаштувань схеми, вимагаючи попереднього повного відключення вимикачів.

Автотрансформаторні зв'язки з поздовжньо-поперечним коригуванням. Гарантують прецизійне перерозподілення потоків потужності між транзитами різних класів.

#### 4. Високотехнологічні комплекси на базі силової електроніки:

Компенсатори статичного тиристорного типу (СТК). Гарантують абсолютно плавне керування обсягами реактиву завдяки швидкісному перемикаю напівпровідникових вентилів.

СТАТКОМ-системи. Найбільш інноваційні установки, серцем яких є потужні інвертори напруги. Вони забезпечують ідеальну швидкість відпрацювання аварійних ситуацій.

Тиристорно-керовані індуктивні реактори (ТКР). Дозволяють безступінчасто та дуже плавно дозувати рівень поглинання потужності.

Комплекси керованої серієсної компенсації (КССК): інтелектуальні пристрої для миттєвої зміни хвильових характеристик транзитних ліній в динаміці.

#### 5. Передові вектори розвитку та смарт-інновації:

Промислові батареїні акумулятори (BESS). Окрім класичного збереження мегават-годин активної енергії, їхні розумні інвертори паралельно виконують функції мережевих стабілізаторів.

Мережеві перетворювачі "зеленої" генерації. Інверторні блоки на вітряках та геліостанціях, які програмно налаштовуються на підтримку жорсткості мережі в точці своєї інтеграції.

Гібридні багатокомпонентні платформи. Складні інженерні об'єкти, що конструктивно поєднують переваги традиційних пасивних фільтрів та надшвидких електронних ключів.

Поміж величезної кількості відомих інженерних інструментів для локального продукування ємнісної енергії, саме масиви статичних конденсаторів впевнено утримують абсолютне лідерство як найпопулярніший та фінансово найвигідніший варіант. Тотальне домінування цього класу обладнання в сучасній енергетиці пояснюється надзвичайно вдалим симбіозом відмінних технічних параметрів та низької вартості впровадження проекту.

Промислові установки БСК масово монтуються для вирішення низки критично важливих завдань усередині електричних магістралей:

- Повне нівелювання негативного впливу індуктивної складової, яка неминуче генерується асинхронними двигунами та котушками трансформаторів;
- Радикальне покращення загального коефіцієнта потужності (на вводах абонентів, що дозволяє уникнути фінансових штрафів від постачальника;
- Суттєве розвантаження струмопровідних частин повітряних ліній та комутаційної апаратури від транзиту "паразитної" енергії;
- Глобальна мінімізація втрат активної потужності на теплове нагрівання провідників;
- Дієве підтримання жорстких нормативних показників потенціалу на віддалених вузлових підстанціях.

Експлуатаційні та інвестиційні переваги конденсаторних систем:

1. Фінансова привабливість: Даний тип апаратури вирізняється абсолютно найнижчими капіталовкладеннями у перерахунку на кожен згенерований кіловар. Питома ціна закупівлі обладнання зазвичай коливається в межах 15–25 доларів за 1 кВАр. Якщо порівнювати ці показники з бюджетом на закупівлю масивних обертових синхронних машин, то економія інвестицій виявляється разючою - від трьох до п'яти разів.
2. Елементарність інсталяції та невибагливість в обслуговуванні:
3. Надзвичайно оперативні терміни розгортання: повний інженерний цикл, починаючи від створення робочих креслень і закінчуючи подачею робочої напруги, триває всього 2–4 місяці;
4. Майже нульові бюджети на сервіс: завдяки повній відсутності підшипників, роторів чи інших механічних деталей, обладнання не потребує змащування та постійного догляду;
5. Феноменальний рівень енергоефективності: внутрішні діелектричні втрати у сучасних поліпропіленових плівках є мізерними і не перевищують 0,3–0,5% від загального номіналу;

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 59  |

6. Тривалий експлуатаційний ресурс: за умови дотримання заводських температурних лімітів та відсутності пробоїв, банки здатні безвідмовно служити від 15 до 20 років.

Головні вразливості та технологічні бар'єри:

Жорстка прив'язка до потенціалу мережі. Найбільш неприємним фізичним недоліком БСК виступає квадратична залежність обсягів генерованого реактиву від поточного рівня напруги на клеммах. Математично цей процес описується наступним рівнянням:

$$Q = U^2 \cdot \omega \cdot C$$

Цей закон електротехніки породжує небезпечний феномен "негативного зворотного зв'язку": якщо потенціал у лінії просідає лише на 10% (тобто становить 0,9 від номіналу), генерація БСК миттєво обвалюється на 19% (оскільки квадрат 0,9 дорівнює 0,81). Тобто саме в той критичний момент, коли енергосистема найбільше потребує підтримки ємністю для запобігання аварії, ефективність батареї різко падає.

Супутні інженерні обмеження:

Дискретна природа налаштувань: використання звичайних контакторів дозволяє перемикати секції лише сходами, унеможливлюючи точне, плавне коригування;

Загроза гармонійного резонансу: ємність батареї здатна утворювати паразитні коливальні контури разом із суміжними трансформаторами, що іноді призводить до руйнівних явищ;

Критична чутливість до пробоїв: діелектричний шар швидко руйнується під впливом високовольтних комутаційних імпульсів, що вимагає монтажу надійних обмежувачів перенапруги;

Притягнення вищих гармонік: конденсатори мають специфічну властивість зменшувати свій опір для струмів високої частоти, перетворюючись на пілосос для мережевого "бруд", що суттєво перегріває їх.

Новітні шляхи модернізації обладнання:

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 60  |
|  |  |  |  |  |  |     |

Для подолання описаних проблем сьогодні масово впроваджуються автоматизовані інтелектуальні комплекси (АКУ), які включають:

Інтеграцію потужних тиристорних модулів замість звичайних електромеханічних пускачів, що гарантує абсолютно безіскрову комутацію строго у момент переходу синусоїди через нульову відмітку;

Застосування мікропроцесорних логічних контролерів, які безперервно аналізують мережу та самостійно вираховують оптимальну кількість ступенів для активації;

Обов'язкове встановлення захисних (демпфуючих або антирезонансних) дроселів послідовно з банками. Вони необхідні для жорсткого обмеження небезпечних стартових струмів та блокування потрапляння вищих гармонік усередину конденсатора.

Комплекси фільтро-компенсації (ФКП): Це спеціалізоване гібридне устаткування, яке конструктивно поєднує масиви ємнісних батарей із надійними індуктивними дроселями. Таке інженерне рішення дає змогу розв'язувати дві технологічні проблеми паралельно: генерувати необхідні обсяги реактиву та водночас ефективно поглинати шкідливі вищі гармоніки, не дозволяючи їм поширюватися магістралями й перегрівати суміжне обладнання.

Децентралізована (локальна) генерація: Цей перспективний підхід передбачає монтаж компактних конденсаторних модулів у безпосередній близькості до конкретних кінцевих електроприймачів (наприклад, поруч із потужними верстатами в цеху). Така архітектура максимально звільняє внутрішньозаводські кабельні лінії від важкого транзиту реактивної складової.

Впровадження класичних статичних конденсаторів демонструє найвищу техніко-економічну рентабельність виключно за таких сприятливих обставин:

Мережа характеризується стабільним утриманням потенціалу (амплітуда відхилень не перетинає бар'єр у  $\pm 5\%$  від паспорта);

Загальне споживання електроенергії має спокійний, рівномірний графік, позбавлений раптових пускових стрибків чи глибоких провалів попиту;

Існує нагальна потреба перекрити сталий, довготривалий (базовий) мінімум індуктивного навантаження підприємства;

Фінансовий бюджет на модернізацію енерговузла є доволі обмеженим, що робить неможливою закупівлю дорогої електронної апаратури.

Якщо ж лінія страждає від перманентної нестабільності напруги, фахівці наполегливо рекомендують застосовувати комбіновані інженерні стратегії. Звичайні БСК доцільно об'єднувати у спільний контур із динамічним обладнанням - наприклад, синхронними машинами, високошвидкісними тиристорними комплексами або ж підключати їх до розумної автоматики регулювання струму збудження на найближчих генеруючих станціях.

Комплекси статичної компенсації реактиву (СКРП): інноваційні вектори швидкісного керування

Коли виникає потреба забезпечити живлення об'єктів із вкрай нестабільним, імпульсним чи ударним характером споживання, використання новітніх СКРП стає безальтернативним та найбільш раціональним кроком. Даний клас потужної силової електроніки здатний блискавично реагувати на будь-яку деградацію характеристик струму, гарантуючи тотальне оздоровлення показників якості енергії на збірних шинах.

Головні технічні переваги експлуатації таких пристроїв для "складних" абонентів:

Абсолютна відсутність механічної інерції: Комплекси СКРП здатні відпрацьовувати будь-які зміни навантаження практично миттєво завдяки впровадженню масивів напівпровідникових ключів. Реальний період реакції системи на зовнішні збурення вимірюється мізерними 1–5 мілісекундами, що в тисячі разів випереджає можливості найшвидших механічних контакторів звичайних батарей.

Безступінчасте налаштування параметрів: На противагу грубому, кроковому підключенню секцій у класичних конденсаторах, напівпровідникова апаратура генерує потужність абсолютно плавно. СКРП дозволяють безперервно змінювати

режим своєї роботи, м'яко переходячи від статусу повної видачі ємності до фази максимального поглинання індуктивності.

Гнучкість управління перетіканнями потужності:

Двостороння (реверсивна) робота: сучасна установка вміє як насичувати лінію корисним реактивом, так і виступати в ролі його активного споживача;

Самостійне, автоматизоване утримання цільового вектора ;

Миттєве підлаштування власних алгоритмів під зміну характеру роботи підприємства (незалежно від того, чи мережа стала індуктивною, чи різко перетворилася на ємнісну).

Балансування фазних перекосів (симетрування): Напівпровідникові системи віртуозно борються з небезпечною асиметрією потенціалів, яка найчастіше виникає через:

Приєднання надзвичайно потужних однофазних приймачів, що руйнує баланс струмів;

Виникнення несиметричних аварійних режимів (обриви проводів або короткі замикання) на сусідніх ділянках;

Специфічну, рвану роботу металургійних електродугових печей та масивних промислових комплексів зварювання;

Стрибкоподібне і вкрай нерівномірне споживання струму тяговими підстанціями залізничної інфраструктури або міських тролейбусів.

Жорстка стабілізація рівнів напруги: Інтелектуальна апаратура гарантує збереження потенціалу вузла у вузьких межах нормативів за рахунок:

Блискавичного впорскування порцій ємності або моментального забору зайвого індуктивного потоку;

Ефективного нівелювання як раптових просадок, так і небезпечних сплесків, амплітуда яких сягає від  $\pm 2\%$  до  $\pm 8\%$  від номіналу;

Активного програмного гасіння (демпфування) шкідливих електромеханічних осциляцій, що періодично курсують глобальною енергосистемою.

## 7.2 Впровадження напівпровідникових технологій силових трансформаторів

Класичні методи стабілізації потенціалу, які дотепер масово експлуатуються всередині вітчизняних розподільчих ліній (зокрема, зміна генерації на електростанціях та використання ручних перемикачів ПБВ), виявилися абсолютно нездатними задовольнити жорсткі критерії новітніх концепцій Smart Grid. Сучасна парадигма розбудови активних енергосистем вимагає безперервного, миттєвого та автоматичного коригування параметрів безпосередньо в динаміці робочого режиму.

На зміну застарілій механіці приходять передові електронні системи стабілізації. Вони базуються на використанні потужних твердотільних інструментів для безконтактного керування вихідним потенціалом понижуючих підстанцій стандарту 6–10/0,4 кВ. У структурі інтелектуальної мережі такі інноваційні апарати виконують функцію надзвичайно надійних силових напівпровідникових вентилів.

Беззаперечною перевагою новітньої електроніки є її феноменальна стійкість до перевантажень. Силові кристали спроможні легко витримувати екстремальні струмові удари, які у два або навіть три рази перевищують паспортні номінали. Це гарантує безперебійне функціонування комплексу під час важких запусків промислових асинхронних двигунів або ж у моменти ліквідації транзитних післяаварійних режимів.

Окрім того, кардинальне усунення проблеми паразитної ємності на низьковольтній стороні відкрило шлях до вільного масштабування архітектури. Інженери отримали змогу набирати послідовні ланцюги з практично будь-якої необхідної кількості електронних ключів, що було абсолютно недосяжним для попередніх поколінь електротехніки.

Впровадження подібних надшвидких алгоритмів керування стає критично необхідним для наступних об'єктів:

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 64  |

- Вузових підстанцій щільної міської забудови: де виникає гостра необхідність філігранно та одночасно балансувати якість живлення для кардинально різних категорій абонентів (від лікарень до офісних центрів);
- Заводських підприємств із нелінійним споживанням: специфічні виробництва (наприклад, прокатні стани чи зварювальні цехи) генерують різкі графіки навантаження, на які класична механіка РПН просто фізично не встигає реагувати;
- Локальних мікроенергосистем (Microgrids): кластери, насичені непередбачуваними джерелами сонячної та вітрової генерації, гостро потребують блискавичної реакції електроніки на раптові зміни погодних умов.

Варто відзначити, що твердотільні вентиля останнього покоління беруть на себе низку супутніх технологічних місій. Вони успішно працюють як активні фільтри паразитних гармонік, виступають локальними генераторами реактивної енергії та надійно блокують поширення руйнівних перенапруг. Застосування передових алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), де частота перемикання транзисторів (класу IGBT або MOSFET) сягає позначки у 20 кілогерц, забезпечує формування ідеальної синусоїдальної кривої напруги при практично нульових втратах активної потужності.

Принципову електричну схему виконання однієї фази електронного комутаційного модуля проілюстровано на рисунку нижче.

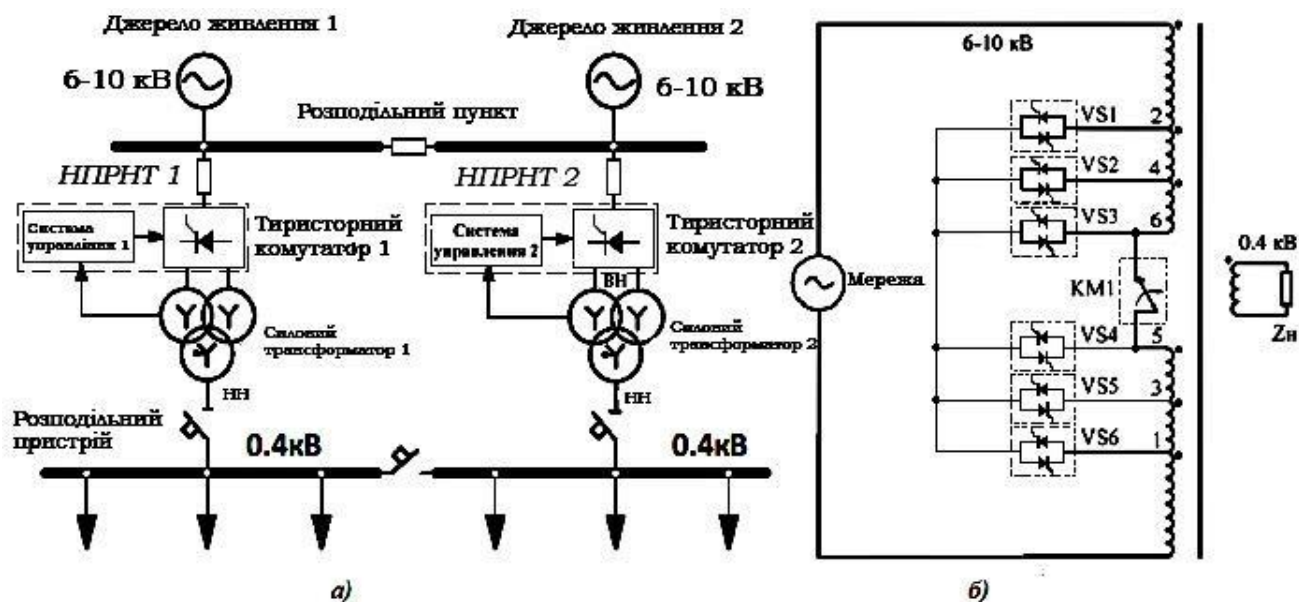


Рис. 7.2. Схематехніка фазного блоку напівпровідникового тиристорного регулятора

Головна складність під час проєктування полягає у необхідності врахувати суворі фізичні реалії функціонування твердотільних елементів безпосередньо на діючих підстанціях. Процес коригування потенціалу відбувається шляхом штучного зміщення (гальмування) моменту початку провідності кристала відносно його природної точки відкриття. Подібна концепція диктує жорстку потребу в ідеальній часовій прив'язці керівних імпульсів до форми мережевої кривої, а також вимагає безперервного аналізу векторних змін струму абонентів (балансу індуктивної та ємнісної складових).

Передові програмні методики координації роботи силової електроніки спираються на такий базовий фундамент:

Фазо-імпульсний контроль: суть підходу зводиться до прецизійного обчислення кута відмикання (зазвичай позначається як  $\alpha$ ) відносно нульової точки синусоїди. Чим точніше мікроконтролер здатна вирахувати необхідну затримку подачі сигналу на керуючий електрод, тим вищою буде загальна якість вихідної енергії та тим меншим виявиться спектр генерованих паразитних гармонік, що забруднюють магістраль.

Адаптивна самонастроювальна логіка: наділяє апаратний комплекс здатністю надзвичайно гнучко реагувати на будь-які зовнішні експлуатаційні

збурення. Програма самостійно вносить робочі поправки, орієнтуючись на раптові просадки живлення, динамічні стрибки споживання на лініях, а також враховуючи тепловий стан радіаторів охолодження.

Швидкісна цифрова обробка (DSP-технології): гарантує феноменальну динаміку відпрацювання транзитних ситуацій. Застосування спеціалізованих сигнальних процесорів, які оцифровують аналогову криву з частотою дискретизації від 100 кГц і вище, дозволяє алгоритмам аналізувати стан лінії тисячі разів за один період змінного струму.

Крім того, процесорний блок зобов'язаний бездоганно підтримувати стандартизовані промислові протоколи передачі даних, які масово впроваджуються в новітніх енергетичних кластерах (зокрема, міжнародний стандарт IEC 61850, протокол DNP3 або ж класичний Modbus RTU/TCP). Завдяки такій комунікаційній сумісності диспетчерський персонал отримує змогу здійснювати глибокий телемоніторинг поточного стану апаратури та дистанційно коригувати цільові уставки без виїзду ремонтної бригади.

Окремим, критично важливим сегментом програмного коду виступає комплекс захистів. Їхнє головне експлуатаційне призначення - врятувати вразливі кристали від руйнування під час глобальних системних аварій. Сюди обов'язково входять швидкодіючі алгоритми блокування імпульсів при виявленні надструмів короткого замикання (де час реакції вимірюється мікросекундами), модулі боротьби з перенапругами (у симбіозі з варисторами) та безперервний температурний моніторинг p-n переходів.

Успішне втілення подібної математичної логіки вимагає від розробників створення потужної синергії компетенцій. Інженерна команда повинна віртуозно володіти фундаментальними законами електротехніки, мати багатий практичний бекграунд у програмуванні мікроконтролерних систем і чітко усвідомлювати фізичну поведінку сучасних розосереджених джерел живлення.

Практична координація роботи додаткових (допоміжних) напівпровідникових ключів під час процесу безіскрового перемикавання відгалужень

традиційно реалізується за допомогою однієї з двох базових математичних стратегій:

1. Стратегія комутації в точці нульового струму (технологія ZCS - Zero Current Switching). Фундаментальна ідея даної методики зводиться до філігранної програмної прив'язки моменту розмикання вентилі до тієї миті, коли крива змінного струму природним шляхом перетинає нульову вісь. Такий "м'який" інженерний підхід дозволяє кардинально знизити виділення тепла на кристалі, оскільки в мить комутації розсіювана потужність наближається до абсолютного нуля. Окрім суто теплових переваг, відсутність різких стрибків струму генерує мінімум високочастотних радіоперешкод (ЕМІ), що є вкрай важливим критерієм для безперебійної роботи суміжної чутливої мікроелектроніки.

На наведеному нижче рисунку детально проілюстровано осцилограми, які візуалізують поведінку електричних величин під час використання вищеописаної технології "м'якого" перемикавання ZCS.

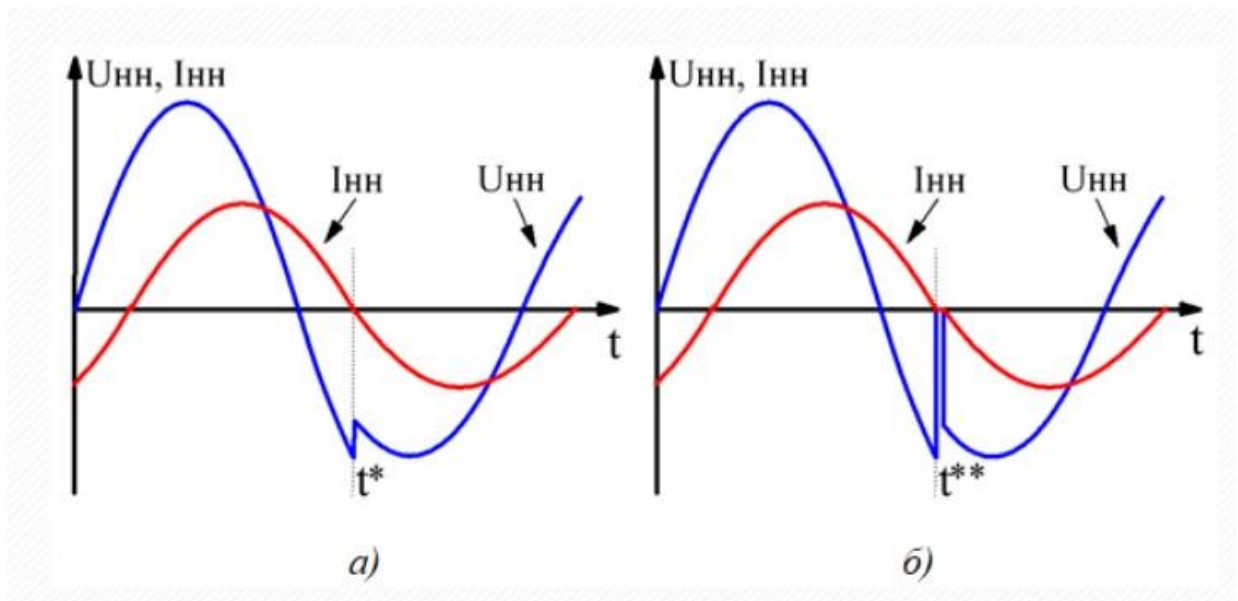


Рис. 7.3. Осцилограми змін струму та потенціалу в процесі реалізації логіки відключення допоміжних тиристорів у точці природного нуля

Застосування концепції відключення електронного ключа саме в момент природного переходу струму через нуль (так звана м'яка комутація) гарантує низку беззаперечних експлуатаційних вигод:

- Радикально зменшується термічне зношування тиристорних кристалів, оскільки в мить розмикання кола генерується мінімум тепла і не виникають руйнівні сплески перенапруг;
- Досягається суттєве зниження амплітуди високочастотних радіоперешкод, які здатні поширюватися магістраллю та забруднювати її;
- Загальний термін безвідмовної служби потужних напівпровідникових блоків значно продовжується;

Інженери фіксують різке зменшення кількості інцидентів, пов'язаних із порушенням параметрів електромагнітної сумісності (ЕМС) чутливого суміжного обладнання на підстанції.

2. Стратегія примусового гасіння за допомогою формування імпульсу зворотної полярності. Дана технологія базується на принципі штучного (активного) переривання провідності вентиля. Це досягається шляхом цілеспрямованої подачі негативного потенціалу на катод-анодну структуру або керуючий електрод протягом чітко заданого вікна часу. Зазвичай цей специфічний інтервал триває від 10 до 50 мікросекунд. Саме такої мілісекундної паузи виявляється цілком достатньо для повноцінної рекомбінації носіїв заряду всередині р-п переходів, що гарантує повне повернення напівпровіднику його початкових діелектричних (блокуючих) характеристик.

Наступна ілюстрація візуалізує динаміку зміни електричних параметрів під час активації вищезгаданого алгоритму штучного переривання струму.

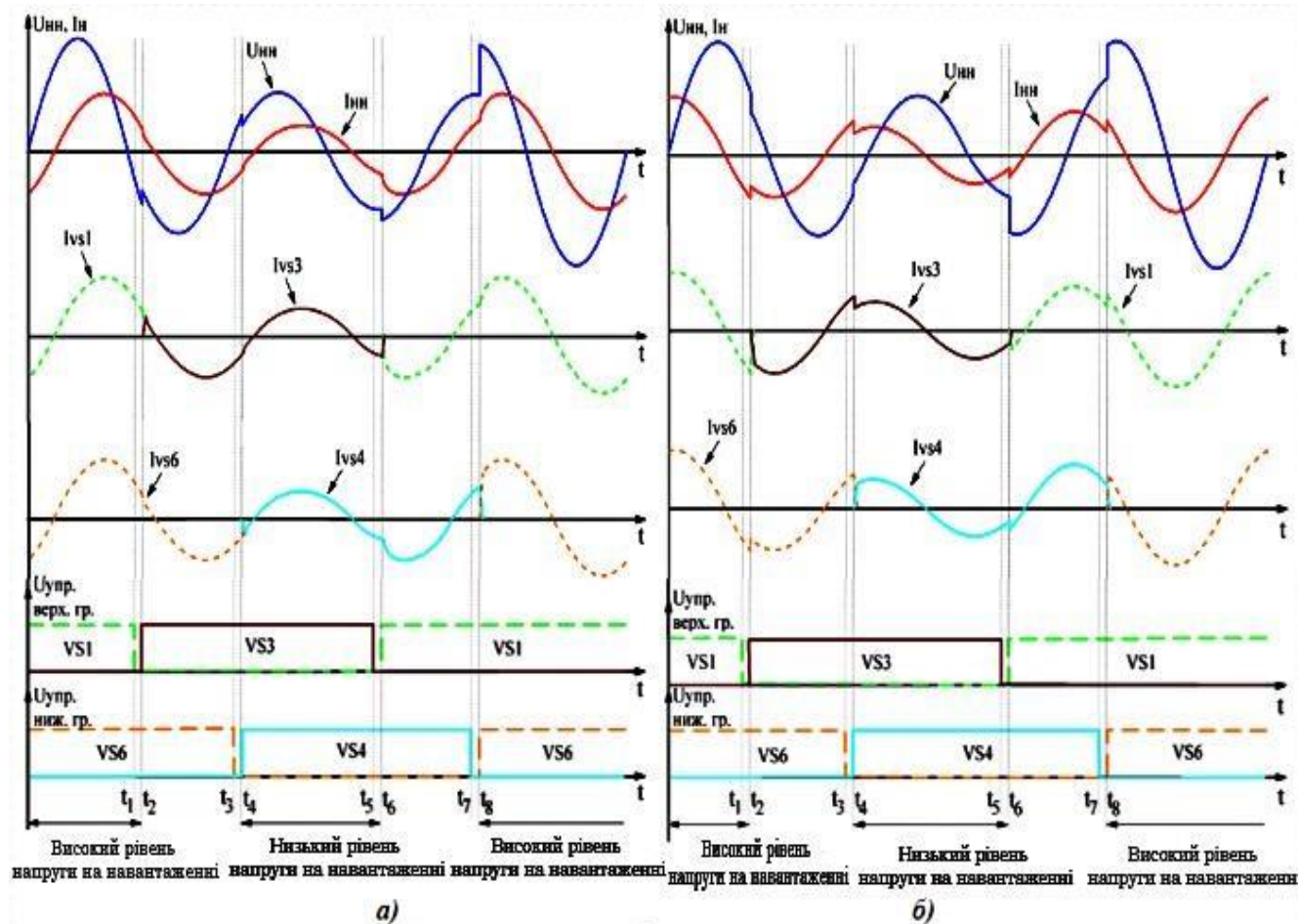


Рис. 7.4 Осцилограми динаміки струмів та потенціалів у процесі реалізації примусового відключення напівпровідникового ключа зворотним імпульсом напруги

Специфіка апаратного втілення цього підходу вимагає вирішення кількох складних інженерних викликів:

Для генерування необхідного замикаючого імпульсу доводиться ускладнювати загальну архітектуру пристрою, додаючи до схеми спеціальні комутувальні конденсаторні батареї або масивні імпульсні трансформатори;

Надзвичайно важливо прецизійно налаштувати тривалість подачі зворотного потенціалу, адже будь-яка похибка може спровокувати мимовільне (хибне) повторне відмикання кристала під дією прямої напруги мережі;

Програмісти зобов'язані постійно вносити адаптивні поправки на тепловий стан транзисторів та тиристорів, оскільки при сильному нагріванні час відновлення їхніх замикаючих властивостей суттєво зростає.

Аби написаний програмний код обох вищеописаних методик працював коректно та без зависань, апаратна база повинна мати значний запас обчислювальної потужності. Ядром такої системи виступають високопродуктивні мікропроцесори, чия тактова частота стартує від позначки 100 мегагерц. Крім того, для точного зчитування аналогових сигналів потрібні надшвидкі АЦП (аналого-цифрові перетворювачі), які мають розрядність не нижче 12 біт. Такий комплекс мікроелектроніки здатен гарантувати безперервне відстеження амплітуд струму та потенціалів у динамічному режимі, виконуючи до 10 тисяч математичних вимірів за одну секунду (частота дискретизації на рівні 10 кГц).

Остаточне рішення щодо вибору робочої математичної моделі (алгоритму) повністю спирається на фізичну природу підключених споживачів. Якщо розподільна лінія живить переважно асинхронні двигуни чи потужні трансформатори (домінує індуктивна складова), інженери надають перевагу алгоритму комутації в нульовій точці струму. Натомість для об'єктів із яскраво вираженим активним (резистивним) навантаженням, наприклад, для промислових печей опору, найкращі та найшвидші результати демонструє методика примусового гасіння зворотною напругою.

Органічне влиття цих програмних продуктів у глобальну цифрову інфраструктуру активних електромереж неможливе без жорсткої інтеграції сучасних телекомунікаційних стандартів обміну даними. Окремим, критично важливим напрямком стає розбудова багаторівневого кіберзахисту, щоб гарантовано унеможливити зовнішнє хакерське втручання в алгоритми управління підстанційною автоматикою.

Повсякденна експлуатація агрегатів безіскрового коригування напруги (РПН) всередині новітніх Smart-мереж суворо контролюється низкою галузевих регламентів. Ці нормативні документи чітко формулюють інженерні критерії щодо безпечного функціонування силової електроніки на розподільчих транзитах 6–10 кіловольт. Аби повністю задовольнити вимоги актуальних стандартів енергетичної галузі, недостатньо просто створити якісний код для перемикання тиристорів. Головний процесорний модуль управляючої системи зобов'язаний паралельно

підтримувати та безперебійно виконувати наступний розширений перелік технологічних функцій.

Модуль телеметрії та глибокої діагностики:

Перманентне відстеження електричних характеристик: безперервний збір даних щодо поточного стану транзиту (ампераж, рівень потенціалу, частотні коливання та косинус фі). При цьому вимірювальні трансформатори у комплексі з АЦП зобов'язані забезпечувати мінімальну похибку, яка не повинна перевищувати 0,5% (високий клас точності для комерційного та технологічного обліку).

Протоколювання позаштатних інцидентів: ретельна фіксація та довгострокове зберігання історії аварій у суворій відповідності до регламентів якості електроенергії (зокрема, нормативів ГОСТ 13109-97 або новітніх ДСТУ EN 50160). Бортовий журнал записує глибину просадок напруги, часові інтервали відхилень, загальну дозу флуктуацій та амплітуду стрибків.

Предиктивний самоаналіз апаратури: автоматичне тестування власної компонентної бази, що включає перевірку цілісності р-п переходів тиристорів та оцінку працездатності драйверів керування до моменту подачі високої напруги.

Комплекс апаратного захисту та експлуатаційної безпеки:

Миттєве блокування імпульсів: надшвидке апаратне відключення у разі виникнення фатальних загроз. Система реагує за доли мілісекунд на появу надструмів короткого замикання, екстремальні перенапруги чи небезпечну деградацію частоти живлення.

Тепловий моніторинг силового блоку: безперервний контроль нагрівання напівпровідникових вентилів за допомогою прецизійних термодатчиків, які монтуються безпосередньо на металевих радіаторах кожного тиристора для запобігання їхньому тепловому пробою.

Блокування втрати керованості: інтелектуальний захист від розриву фазової синхронізації з лінією (збій алгоритмів ФАПЧ), а також апаратна страховка на випадок зависання головного процесора, що гарантує безпечне розмикання комутаторів.

Комунікаційні інтерфейси та SCADA-інтеграція:

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 72  |

Підтримка промислових стандартів зв'язку: стовідсоткова сумісність із передовими протоколами цифрової підстанції (IEC 61850 з його GOOSE-повідомленнями, DNP3 та класичним Modbus RTU/TCP). Це відкриває шлях до безшовної інтеграції агрегату в глобальні диспетчерські платформи.

Глобальна телеметрія: надання оперативно-ремонтному персоналу можливості віддалено моніторити стан вузлів та зчитувати осцилограми без фізичного виїзду на об'єкт.

Горизонтальна синхронізація: обмін даними по швидкісних шинах із сусіднім обладнанням розумної мережі (Smart Grid) для узгодженого відпрацювання транзитних режимів.

Логіка автоматизованого коригування параметрів:

Утримання цільових уставок: жорстка стабілізація рівня потенціалу у вузькому коридорі допустимих значень (із похибкою не більше  $\pm 2\%$  від заданого паспортом номіналу).

Нівелювання сезонних та добових трендів: плавна адаптація коефіцієнта трансформації у відповідь на повільні, прогнозовані зміни графіків навантаження підприємств чи населення.

Запобігання логічним колізіям: програмна координація дій із суміжними компенсаторами чи генераторами, щоб уникнути ситуації "перетягування каната" (коли два пристрої намагаються одночасно регулювати одну й ту саму ділянку).

Для повноцінної та безперебійної реалізації такого масиву математичних завдань керуючий блок повинен мати потужну архітектуру. Мінімальні апаратні вимоги передбачають інтеграцію продуктивних 32-розрядних мікроконтролерів (наприклад, архітектури ARM Cortex). Крім того, для розгортання операційної системи реального часу (RTOS) та швидкої обробки потоків телеметрії обсяг оперативної пам'яті плати має становити щонайменше 512 МБ.

Організація взаємодії всіх описаних функціональних вузлів візуалізована на наступній ілюстрації.

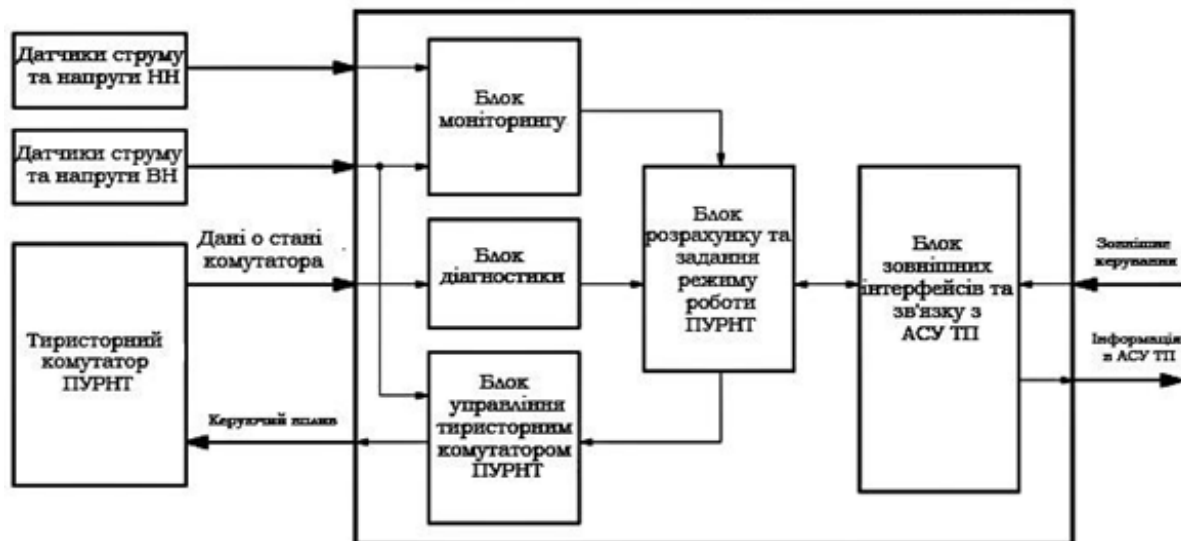


Рис. 7.6. Блок-схема архітектури комплексу автоматизованого контролю обладнання РПН

### 7.3 Впровадження концепції FACTS у сучасних електроенергетичних комплексах

Стрімкий прогрес у виготовленні потужних твердотільних ключів для енергетичної галузі став потужним каталізатором для масової інтеграції інноваційних систем FACTS (що розшифровується як гнучкі системи передачі змінного струму). Підвищення граничних струмових та номінальних показників високовольтних перетворювальних блоків відкрило інженерам абсолютно нові горизонти для прецизійного диспетчерського контролю. Зазначені апаратні комплекси є високотехнологічними мережевими інструментами, які спроможні цілеспрямовано і динамічно коригувати еквівалентний опір транзитів або керувати балансом реактиву на визначених відрізках об'єднаної енергосистеми.

Еволюція даного класу апаратури на пряму залежить від досягнень мікроелектроніки у сфері силових напівпровідників. Актуальні покоління транзисторів типу IGBT (з ізольованим затвором) легко витримують робочі струми на рівні 3000 А при потенціалах до 6500 В. Така витривалість дає змогу конструювати інверторні платформи, чия сумарна потужність перетинає позначку в 100 МВА. Водночас класичні запірні тиристори (GTO) та їхні модернізовані

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

аналоги з інтегрованим драйвером (IGCT) успішно функціонують в умовах 10 кВ та безперебійно пропускають через кристал до 6000 А.

Залежно від топології підключення та фізичних принципів впливу на магістраль, обладнання FACTS прийнято класифікувати за такими основними групами:

Установки поздовжнього (серієсного) коригування: до цієї родини належать комплекси синхронної серієсної компенсації (SSSC) та спеціалізовані модулі управління перетіканнями (UPFC). Подібні апарати монтуються безпосередньо в розрив високовольтного проводу. Їхня головна технологічна місія полягає у штучній зміні хвильового опору магістралі, що дозволяє примусово скеровувати масиви активної потужності потрібним маршрутом, розвантажуючи "вузькі" місця мережі.

Пристрої поперечного (шунтуючого) типу: тут беззаперечними лідерами виступають класичні статичні варові компенсатори (SVC) та більш інноваційні синхронні машини статичного формату (STATCOM). Це устаткування приєднується до збірних шин паралельним способом. Воно відповідає за надшвидке локальне генерування ємнісної та індуктивної складових, чим гарантує ідеальне утримання рівнів напруги всередині конкретного енерговузла.

Гібридні (комбіновані) платформи: вони вдало акумулюють сильні сторони як шунтуючого, так і серієсного монтажу. Найбільш технічно досконалим представником цієї гілки визнано згаданий вище об'єднаний регулятор потоків (UPFC), який здатен одночасно вирішувати проблеми і з якістю напруги, і з пропускною здатністю лінії.

Час реакції передової електроніки FACTS на зовнішні збурення вимірюється фантастичними 1–5 мілісекундами, що залишає застарілі електромеханічні приводи далеко позаду. Така безпрецедентна динаміка дає можливість ефективно гасити небезпечні низькочастотні коливання турбогенераторів та суттєво розширювати межі динамічної стійкості об'єднаної мережі під час аварій. Що стосується прецизійності роботи, то похибка утримання потенціалу не перевищує

$\pm 1\%$ , а для реактиву цей показник тримається в межах  $\pm 2\%$ . Завдяки цьому забезпечується еталонна якість живлення для найбільш чутливих споживачів.

Використання подібного класу апаратури стає критично необхідною умовою для успішного приєднання масивів сонячних та вітрових парків. Здатність напівпровідників моментально нівелювати хаотичні сплески або провали "зеленої" генерації рятує мережу від дестабілізації. Окрім того, це ідеальний інструмент для штучного збільшення транзитної спроможності існуючих старих ЛЕП, що дозволяє енергокомпаніям уникати мільярдних капіталовкладень на зведення нових повітряних магістралей.

Якщо ж розглядати середній клас напруг, то інструментарій FACTS перетворює звичайні лінії на повноцінні "розумні" розподільні мережі. Вони здатні без проблем приймати двосторонні перетікання енергії та стабілізувати параметри попри складну поведінку розосереджених споживачів-генераторів (проз'юмерів).

СТАТКОМ (статичний компенсатор синхронного принципу дії) як базова ланка технології FACTS

Модулі STATCOM заслужено вважаються фундаментальною технологічною основою сучасної енергетичної електроніки. За своєю суттю, це потужний твердотільний генератор реактивної енергії, який працює повністю автономно. Його здатність видавати ємнісний струм або споживати індуктивний жодним чином не залежить від несподіваних коливань потенціалу в живильній магістралі.

Серцем апаратної архітектури даної системи виступає потужний трифазний інвертор напруги. Він інтегрується у високовольтну конфігурацію через спеціальний узгоджувальний силовий трансформатор або струмообмежувальний реактор. Якщо порівнювати його з традиційними модулями SVC (де встановлені звичайні конденсаторні банки та тиристорні котушки), то СТАТКОМ діє принципово інакше. Він застосовує масиви швидкісних IGBT-ключів для штучного синтезування ідеальної синусоїди, причому мікроконтролер може вільно керувати як амплітудою цієї хвилі, так і її фазою.

Технологічний принцип балансування базується на такому алгоритмі: установка постійно формує власну систему напруг, яка жорстко синхронізована з

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 76  |

Найважливішим козирем цієї електронної машини перед класичними аналогами є феноменальна стабільність робочих показників під час аварій. У звичайних компенсаторах SVC максимальна струмовіддача стрімко обвалюється квадратично до падіння напруги (  $I \propto U^2$  ). Натомість інтелектуальний інвертор STATCOM спроможний "накачувати" магістраль своїм 100-відсотковим номінальним струмом навіть у тих екстремальних ситуаціях, коли потенціал у лінії критично просідає до 15% від паспортного значення.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ap. |
|  |  |  |  |  |  | 77  |
|  |  |  |  |  |  |     |

Рис. 7.7. Принципова спрощена конфігурація апаратної частини комплексу  
СТАТКОМ

Актуальні моделі СТАТКОМ проектуються на основі багаторівневої інверторної архітектури (Multilevel Inverters), укомплектованої швидкодіючими транзисторами класу IGBT. Таке прогресивне інженерне рішення дає змогу радикально знизити загальний коефіцієнт гармонійних спотворень струму (THD) до позначки, що не перевищує 3%, повністю відмовившись від встановлення масивних та дорогих пасивних фільтрів. Модульний принцип компонування силових комірок гарантує безпрецедентну експлуатаційну надійність, оскільки передбачає апаратне резервування та допускає оперативну (гарячу) заміну пошкоджених блоків без зупинки всього комплексу.

Інтелектуальне ядро системи керування будується на надшвидких цифрових сигнальних мікропроцесорах (DSP). Завдяки високій тактовій частоті та частоті дискретизації аналогових сигналів на рівні 20 кГц, контролер спроможний практично миттєво відстежувати найменші флуктуації мережевих параметрів та генерувати ідеально точні керівні імпульси для драйверів напівпровідників.

Апаратура СТАТКОМ довела свою абсолютну ефективність у питаннях жорсткого утримання номіналів напруги безпосередньо у вузлах масового споживання. Це особливо критично для тих локацій, де приєднані надпотужні промислові підприємства з екстремально рваними (ударними) графіками поглинання реактиву (наприклад, металургійні заводи з дуговими печами). У сегменті розподільних ліній, глибоко насичених об'єктами "зеленої" генерації, електронні компенсатори віртуозно нівелюють наслідки непередбачуваних погодних змін, підтримуючи бездоганну якість електроживлення.

У масштабах високовольтних магістралей передачі енергії інсталяція таких комплексів дозволяє суттєво розсунути межі як динамічної, так і статичної стійкості об'єднаної енергосистеми. Як вагомий економічний бонус, системні оператори отримують змогу штучно збільшити фактичну пропускну здатність

старих ЛЕП, уникаючи мільярдних фінансових витрат на їхню фізичну реконструкцію.

Розрахунок загальної (уявної) потужності, яку здатен опрацювати електронний перетворювач, виконується за класичним геометричним співвідношенням активної та реактивної складових:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

де  $S$  – повна потужність комплексу,  $P$  – обсяг активного потоку енергії, а  $Q$  – величина згенерованої або поглинутої реактивної потужності.

Потенціал, що формується на виводах твердотільного інвертора, може прецизійно змінюватися системою управління не лише за розмахом амплітуди, а й за фазовим зсувом. Надзвичайно важливою характеристикою є здатність процесора керувати кожною з трьох фаз абсолютно незалежно одна від одної. Такий підхід дає можливість автономно маніпулювати векторами генерації або споживання енергії. Завдяки цій технологічній гнучкості СТАТКОМ спроможний повноцінно працювати в усіх без винятку чотирьох просторових квадрантах енергетичної характеристики. Однак тривалість роботи в режимі перетікання активної енергії є суворо лімітованою. Це пояснюється тим, що поглинання або видача активних мегаватів неминуче призводить до швидкого заряду чи виснаження конденсаторної збірки в ланці постійного струму (DC-link). Фізично обсяг акумульованої енергії перебуває у квадратичній залежності від рівня напруги на обкладках цих конденсаторів.

Здатність мікроконтролера автономно коригувати параметри потенціалу для кожної окремої фази наділяє комплекс безпрецедентними можливостями у боротьбі з фазною несиметрією та шкідливими струмами зворотної послідовності, які часто зустрічаються у транзитних магістралях. Повне усунення цих перекосів стає реальним завдяки імплементації складних математичних алгоритмів векторного управління, які дозволяють інвертору синтезувати унікальну амплітуду та індивідуальний кут зсуву для кожної лінії живлення.



Подібна інженерна маневреність перетворює твердотільні компенсатори на найпотужнішу зброю диспетчерів під час стабілізації "слабких" енерговузлів з хаотичною динамікою попиту та масовою присутністю "зелених" електростанцій.

Як уже зазначалося, головним апаратним бар'єром, який жорстко обмежує час функціонування агрегату в режимах видачі або забору активних мегаватів, виступає фізична ємність масиву конденсаторів у шині постійного струму. Обсяг накопиченої в DC-ланці електроенергії розраховується за такою класичною формулою:

$$W = \frac{C \cdot U_{dc}^2}{2}$$

де  $C$  відображає сумарну паспортну ємність конденсаторної збірки (у фарадах), а  $U_{dc}$  – фактичний рівень напруги постійного струму у внутрішньому контурі.

Стандартні значення ємності буферної ланки у промислових компенсаторах зазвичай варіюються в межах від 10 до 50 міліфарад, тоді як робоча напруга на них утримується на рівні 1–10 кіловольт. Такого енергетичного резерву вистачає лише для надзвичайно короткочасного (буквально кілька секунд) впорскування активної потужності в магістраль.

Щоб кардинально розширити часові межі експлуатації комплексу в активних режимах, розробники впроваджують передові інноваційні концепції:

Створення гібридних систем: до DC-шини паралельно підключаються потужні літій-іонні акумулятори, суперконденсатори або навіть кінетичні маховики. Це перетворює компенсатор на повноцінне сховище енергії;

Інтелектуальне балансування: програма постійно слідкує за рівнем заряду і змушує інвертор короткочасно забирати або віддавати краплі активної енергії, щоб повернути напругу конденсаторів до заводської норми;

Глобальна мережева координація: контролер СТАТКОМ безперервно обмінюється телеметрією із суміжним обладнанням, рівномірно розподіляючи навантаження, щоб уникнути критичного виснаження власних конденсаторів.

Реальна картина зміни електричних параметрів, зафіксована вимірjuвальними приладами під час роботи перетворювача у різних просторових квадрантах, детально проілюстрована на наступних осцилограмах.

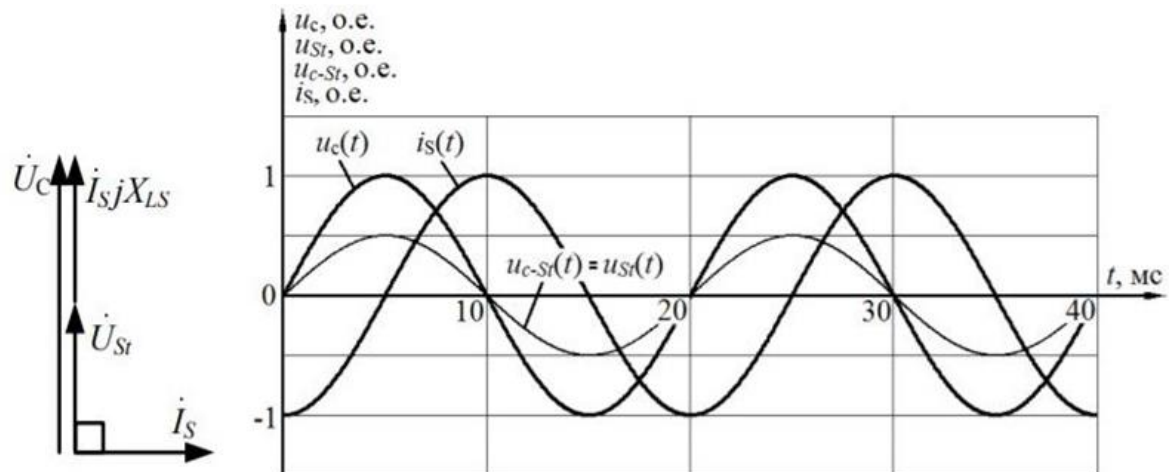


Рис. 7.11. Осцилограми транзитних процесів у режимі відбору активної енергії

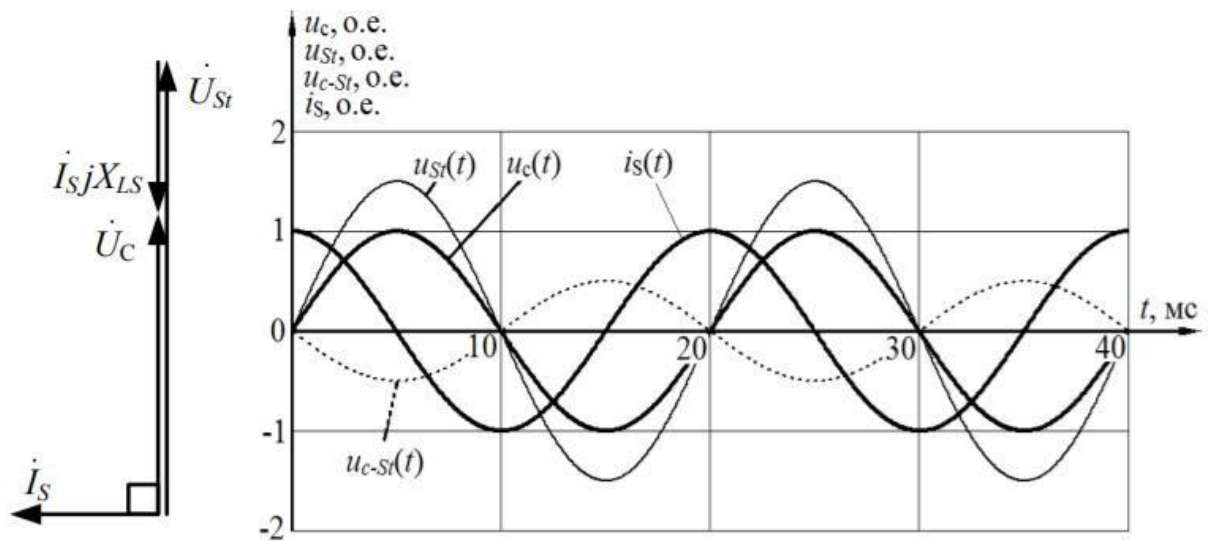


Рис. 7.12. Динаміка електричних величин у процесі генерування ємнісної потужності

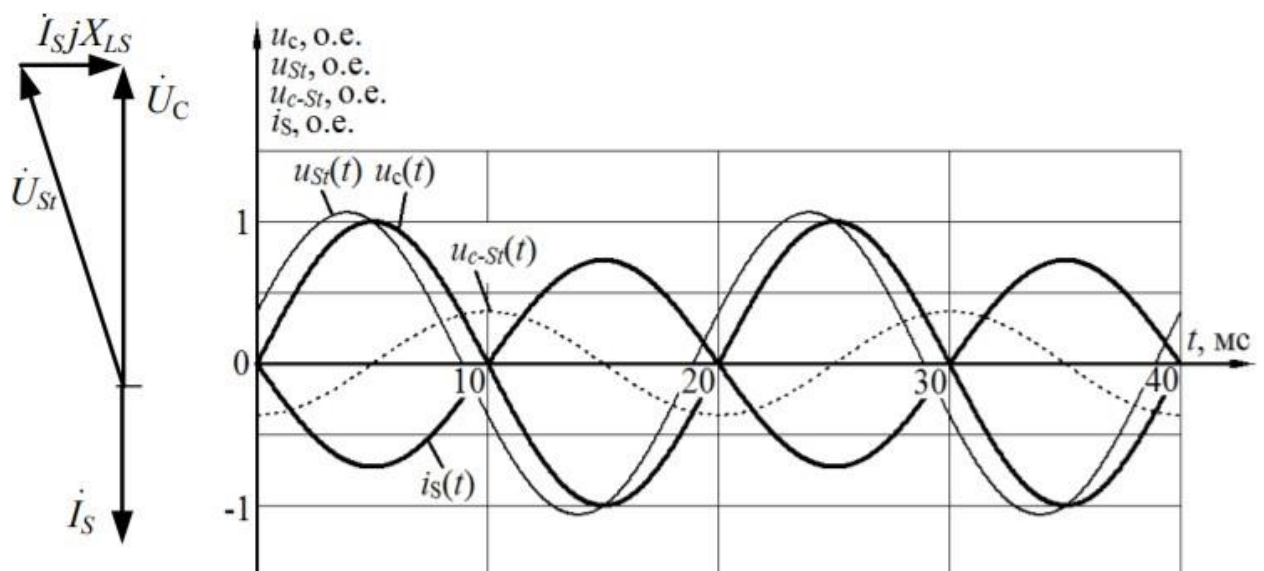


Рис. 7.13. Робочі осцилограми комплексу під час видачі в магістраль активних мегаватів

Спираючись на викладений візуальний матеріал, доцільно перейти до глибокого аналітичного розбору механіки функціонування СТАТКОМ у розрізі всіх чотирьох квадрантів. Подібна здатність до стовідсотково незалежного контролю як за потоками реальної, так і уявної енергії перетворює цей пристрій на найбільш гнучкий вузол управління в архітектурі новітніх енергосистем.

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Здатність електронного перетворювача вільно мігрувати між усіма чотирма зонами (квадрантами) енергетичної характеристики є його найголовнішою технологічною перевагою. Це дає змогу диспетчерським алгоритмам абсолютно відокремлено маніпулювати векторами реальної та уявної енергії, перетворюючи установку на максимально універсальний вузол стабілізації транзитних магістралей.

**Перша координатна зона (Квадрант I):** Видача реактиву на тлі поглинання активних мегаватів

Перебуваючи у цьому секторі, твердотільний комплекс виконує місію потужного джерела ємнісної енергії ( $Q > 0$ ). Водночас він змушений відбирати певну частку активної потужності безпосередньо з живильної лінії ( $P > 0$ ). Подібний електрофізичний стан активується тоді, коли процесор штучно завищує амплітуду вихідного потенціалу інвертора над фактичним рівнем підстанції, утримуючи при цьому фазовий зсув у межах від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

З інженерної точки зору це означає, що апарат успішно бореться з індуктивним впливом заводських двигунів, паралельно "втягуючи" активні струми для двох критичних цілей: компенсації неминучих теплових втрат на перемикання всередині IGBT-модулів та екстреного відновлення робочого заряду у своїй шині постійного струму. Зазвичай такий алгоритм вмикається під час холодного старту обладнання або ж одразу після важких аварій, коли буферні конденсатори були сильно виснажені.

**Друга координатна зона (Квадрант II):** Одночасне генерування активної та реактивної складових

Цей режим є найбільш навантаженим для системи, оскільки апарат працює як повноцінна віртуальна електростанція. Він синхронно насичує мережу як корисним ємнісним струмом ( $Q > 0$ ), так і реальними активними мегаватами ( $P < 0$ ). Умови переходу в цей стан: вектор амплітуди інвертора домінує над мережевим, а кут зсуву лежить у діапазоні  $90^\circ < \delta < 180^\circ$ .

У такій конфігурації компенсатор бере на себе роль класичного турбогенератора. Проте варто пам'ятати, що єдиним джерелом для видачі активної

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 84  |

потужності слугує накопичений заряд DC-ланки. Відповідно, напруга на обкладках конденсаторів починає стрімко деградувати. Робота у цій зоні вимірюється буквально мілісекундами, якщо до шини не підключено додаткових промислових акумуляторів (BESS).

**Третя координатна зона (Квадрант III):** Поглинання реактиву на тлі експорту активної потужності

Тут алгоритм діє дзеркально: комплекс перетворюється на віртуальний шунтуючий реактор ( $Q < 0$ ), продовжуючи при цьому віддавати активну енергію в магістраль ( $P < 0$ ). Щоб досягти такого ефекту, автоматика знижує вихідну амплітуду нижче за показники підстанції та встановлює фазовий кут у межах від  $180^\circ$  до  $270^\circ$ .

Ця функція є життєво необхідною у періоди глибокого нічного мінімуму споживання, коли надвисоковольтні лінії страждають від небезпечного зростання потенціалу (ефект Ферранті). СТАТКОМ успішно "з'їдає" паразитну ємність транзиту і водночас допомагає енергосистемі покрити дефіцит реальної потужності, що виникає через нестабільність сусідніх вітрових чи сонячних парків.

**Четверта координатна зона (Квадрант IV):** Синхронне споживання реальної та уявної енергії

Останній робочий сценарій передбачає жорстке поглинання як індуктивного струму ( $Q < 0$ ), так і активних потоків ( $P > 0$ ). Для цього інвертор формує занижену амплітуду із фазовим зсувом від  $270^\circ$  до  $360^\circ$ .

Апарат виступає як масивне комплексне навантаження. Диспетчери системного оператора застосовують цей алгоритм для екстреного демпфування потужних електромеханічних коливань генераторів та для швидкого "перезарядження" власних конденсаторів установки в умовах тотального надлишку реактиву в мережі.

Математичний апарат балансування потужностей

Обсяги перетікання реальної та уявної енергії між інвертором СТАТКОМ та загальною енергосистемою підпорядковуються класичним рівнянням електротехніки для двох активних джерел живлення:

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 85  |

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \sin \varphi$$

$$Q = \frac{V_1 \cdot V_2 \cos \delta - V_1^2}{X}$$

У цих виразах застосовано такі позначення:  $V_1$  виступає фактичним рівнем напруги на збірних шинах підстанції,  $V_2$  є штучно синтезованою амплітудою самого перетворювача,  $\delta$  позначає векторний фазовий зсув між згаданими потенціалами, а  $X$  відображає індуктивний опір узгоджувального (зв'язкового) трансформатора чи дроселя.

Як уже наголошувалося, критичним "вузьким місцем" під час роботи в квадрантах із видачею активної складової є фізична ємність буферної зони постійного струму. Якщо розглянути типову конденсаторну батарею номіналом 20 мФ, яка працює під напругою 2 кВ, то максимальний обсяг збереженої в ній енергії сягатиме лише 40 кілоджоулів. Цього мізерного запасу фізично вистачить для підтримки видачі потужності на рівні 1 МВт лише протягом 40 мілісекунд (фактично – два періоди промислової частоти 50 Гц).

Саме тому ядром мікропроцесорної системи управління СТАТКОМ виступає надшвидкий ПІ-регулятор напруги DC-ланки. Його завдання – безперервно сканувати рівень заряду конденсаторів і, у разі його падіння, миттєво переводити інвертор у перший або четвертий квадрант для відновлення балансу. Передові розробки у цій сфері спираються на використання нейромережевих предиктивних алгоритмів (Model Predictive Control). Вони здатні на мілісекунди наперед прораховувати поведінку мережі та оптимізувати траєкторію переходу між квадрантами так, щоб гарантувати максимальний коефіцієнт корисної дії та не допустити аварійної зупинки інвертора через просадку внутрішньої напруги.

## ВИСНОВКИ

Під час реалізації цього інженерного проекту було успішно розв'язано фундаментальну проблему створення надійної інфраструктури живлення для заводу інструментальної промисловості. Окрім побудови базової схеми розподілу енергії, особлива увага приділялася формуванню гнучкої топології підстанцій. Вона повністю відповідає найсуворішим нормативам безперебійності та враховує специфічну категорійність приймачів струму. Було проаналізовано технічні умови об'єкта, що дозволило інтегрувати сучасні рішення управління ресурсами на всіх рівнях технологічного ланцюжка.

Завдяки застосуванню методу впорядкованих діаграм проведено глибоку оцінку очікуваних силових потреб цехів. Це дало змогу максимально точно підібрати перерізи кабельно-провідникової продукції та номінали силових трансформаторів, уникаючи зайвих перевитрат. Вивчення добових і сезонних кривих попиту на електрику допомогло виявити пікові години та збалансувати режим роботи цехового обладнання. Окремим, не менш важливим етапом, став ґрунтовний аудит перетоків реактивної енергії. На основі отриманих результатів запропоновано впровадження автоматизованих конденсаторних установок (АКУ). Такий крок суттєво підвищить загальний коефіцієнт потужності, зменшить теплові втрати у лініях та захистить підприємство від штрафних санкцій з боку постачальника ресурсів.

Для збереження життя персоналу та захисту дороговартісного устаткування було виконано багатокритеріальне моделювання аварійних ситуацій. Зокрема, обчислення максимальних і мінімальних значень струмів при різних видах коротких замикань (трифазних, двофазних, однофазних) допомогли розробити точну карту селективності. Здобуті показники стали головним аргументом під час комплектації головної знижувальної підстанції та локальних розподільчих пунктів. Вибір зупинився на передових вакуумних вимикачах і мікропроцесорних терміналах релейного захисту, які гарантують миттєве локальне відключення пошкоджених ділянок, не впливаючи на роботу сусідніх ліній.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  | 87  |

Запропонована архітектура енергетичного господарства характеризується високим ступенем адаптивності до майбутніх змін. Спроектowana інфраструктура містить стратегічний запас пропускної здатності трансформаторних вузлів та магістральних шинопроводів. Такий інженерний підхід гарантує, що подальше нарощування обсягів випуску продукції, встановлення нових конвеєрних ліній чи додаткових верстатів не вимагатиме масштабної реконструкції мережі. Відповідно, завод зможе оперативно реагувати на ринкові виклики, мінімізуючи капітальні фінансові витрати на переобладнання та уникаючи тривалих зупинок технологічного процесу.

|  |  |  |  |  |  |     |
|--|--|--|--|--|--|-----|
|  |  |  |  |  |  | Ар. |
|  |  |  |  |  |  |     |
|  |  |  |  |  |  | 88  |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.] ; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.
2. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017. – 617 с.
3. Електропостачання: підручник / П. О. Василега. – Суми: СДУ, 2019. – 521 с.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Г. Г. Півняк, В. Н. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен та ін. – Дніпропетровськ : Вид-во НГА України, 2000. – 378 с.
5. Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування : навчальний посібник / В. Г. Рудницький. – Суми : Університетська книга, 2006. –153 с.