

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва транспорту та енергетики  
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту”  
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ  
к.т.н., професор  
\_\_\_\_\_Петро ПЛЄШКОВ  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_2026р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за першим (бакалаврським) рівнем вищої**  
**освіти**  
**на тему**  
**“Розроблення електротехнічної системи**  
**електроспоживання целюлозно-паперового**  
**комбінату”**

Виконав здобувач вищої освіти  
4 курсу, групи ЕЕ-22  
ОПП «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
\_\_\_\_\_Голубовський К.А.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_2026р.

Керівник роботи  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_Андрій КОТИШ  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_2026р.  
Рецензент \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

м. Кропивницький

**Центральноукраїнський національний технічний університет**

Факультет Будівництва транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Плєшков П.Г.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

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

Голубовського Костянтина Андрійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Розроблення електротехнічної системи

електроспоживання целюлозно-паперового комбінату

Development of an electrical power consumption system for a pulp and paper mill

2. Керівник роботи (проекту)

Котиш Андрій Іванович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Вступ; 1.Електричні навантаження; 2.Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної розподільної установки; 3.Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання; 4.Компенсація реактивної потужності; 5.Трансформаторні підстанції; 6.Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання; 7.Спеціальний розділ; Висновки; Перелік посилань.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

| Розділ                    | Консультант                      | Підпис, дата   |                  |
|---------------------------|----------------------------------|----------------|------------------|
|                           |                                  | Завдання видав | Завдання прийняв |
| <i>Спеціальний розділ</i> | <i>к.т.н., доц. Н. Гарасьова</i> |                |                  |
|                           |                                  |                |                  |
|                           |                                  |                |                  |
|                           |                                  |                |                  |
|                           |                                  |                |                  |

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи                                                                              | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | <i>Вступ</i>                                                                                                               | <i>08.05.26</i>               |          |
| 2     | <i>Електричні навантаження</i>                                                                                             | <i>12.05.26.</i>              |          |
| 3     | <i>Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної розподільної установки</i>                         | <i>16.05.26.</i>              |          |
| 4     | <i>Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства</i>                    | <i>19.05.26.</i>              |          |
| 5     | <i>Компенсація реактивної потужності</i>                                                                                   | <i>21.05.26.</i>              |          |
| 6     | <i>Трансформаторні підстанції</i>                                                                                          | <i>24.05.26</i>               |          |
| 7     | <i>Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання</i> | <i>28.05.26.</i>              |          |
| 8     | <i>Спеціальний розділ</i>                                                                                                  | <i>01.06.26.</i>              |          |

Дата видачі завдання

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

Підпис керівника \_\_\_\_\_

Завдання прийнято до виконання

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

Підпис здобувача \_\_\_\_\_

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: с.; 7 рис.; 17 табл.; 14 джерел.

Голубовський К. А. Розроблення електротехнічної системи електроспоживання целюлозно-паперового комбінату. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2026 р.

У випускній кваліфікаційній роботі розроблено комплексний проєкт системи електропостачання сучасного целюлозно-паперового комбінату повного циклу. Робота охоплює детальний аналіз енергоспоживання основних технологічних ліній, зокрема машин для виробництва картону та офсетного паперу, варильних ділень целюлози та допоміжних цехів.

Виконано розрахунок електричних навантажень методом коефіцієнта максимуму, побудовано картограму для визначення умовного центру електричних навантажень та оптимізації розміщення головної розподільчої підстанції. Ключовим етапом роботи стало техніко-економічне обґрунтування вибору схеми зовнішнього електропостачання: на основі порівняння варіантів напругою 10 кВ та 110 кВ доведено ефективність живлення на генераторній напрузі. Розроблено заходи з компенсації реактивної потужності та обрано силове обладнання, стійке до струмів короткого замикання.

Спеціальний розділ присвячено проблематиці ферорезонансних процесів у мережах 6-35 кВ: проаналізовано причини пошкодження трансформаторів напруги та обґрунтовано методи підвищення надійності їх експлуатації через зміну режиму заземлення нейтралі.

Ключові слова: силові та освітлювальні електричні навантаження, електротехнічна система електроспоживання, електрична енергія, ферорезонанс, трансформатор напруги.

## SUMMARY

Holubovskiy K.A. Development of an electrical power consumption system for a pulp and paper mill. 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" EPP, "Electric power, electrical engineering and electromechanics". Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi, 2026.

In the final qualification work, a comprehensive project of the power supply system of a modern full-cycle pulp and paper mill was developed. The work includes a detailed analysis of the energy consumption of the main technological lines, in particular, machines for the production of cardboard and offset paper, pulp cooking sections and auxiliary shops.

The calculation of electrical loads was performed using the maximum coefficient method, a cartogram was constructed to determine the conditional center of electrical loads and optimize the location of the main distribution substation. The key stage of the work was the feasibility study of the choice of an external power supply scheme: based on a comparison of 10 kV and 110 kV voltage options, the efficiency of power supply at generator voltage was proven. Measures for reactive power compensation were developed and power equipment resistant to short-circuit currents was selected.

A special section is devoted to the issue of ferroresonance processes in 6-35 kV networks: the causes of damage to voltage transformers are analyzed and methods for increasing the reliability of their operation by changing the neutral grounding mode are substantiated.

Keywords: power and lighting electrical loads, electrical power consumption system, electric energy, ferroresonance, voltage transformer.

# ЗМІСТ

Стор.

|                                                                                                                                       |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Вступ.....                                                                                                                            |  |
| 1. Електричні навантаження.....                                                                                                       |  |
| 2. Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної роподільної установки (головної знижувальної підстанції)..... |  |
| 3. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства.....                              |  |
| 4. Компенсація реактивної потужності.....                                                                                             |  |
| 5. Трансформаторні підстанції.....                                                                                                    |  |
| 6. Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання.....           |  |
| 7. Спеціальний розділ роботи.....                                                                                                     |  |
| Висновки.....                                                                                                                         |  |
| Перелік посилань.....                                                                                                                 |  |

|          |              |          |         |      |                                                                                       |  |  |  |  |      |       |         |
|----------|--------------|----------|---------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|------|-------|---------|
|          |              |          |         |      | Випускна кваліфікаційна робота                                                        |  |  |  |  |      |       |         |
| Зм.      | Арк.         | Недокум. | Підпис. | Дат. | Розроблення електротехнічної системи електроспоживання целюлозно-паперового комбінату |  |  |  |  | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Розроб.  | Голубовський |          |         |      |                                                                                       |  |  |  |  |      |       |         |
| Перевір. | Котиш        |          |         |      |                                                                                       |  |  |  |  |      |       |         |
|          |              |          |         |      |                                                                                       |  |  |  |  |      |       |         |
| Н.контр. |              |          |         |      |                                                                                       |  |  |  |  |      |       |         |
| Затвер.  | Плешков      |          |         |      | ЦНТУ<br>гр. ЕЕ-22                                                                     |  |  |  |  |      |       |         |

## ВСТУП

Целюлозно-паперова промисловість належить до найбільш енергоємних галузей сучасної економіки. Специфіка роботи комбінату — це безперервний, високошвидкісний технологічний потік, де будь-яка зупинка коштує надзвичайно дорого. Величезні інерційні маси папероробних машин, складні термодинамічні процеси у варильних котлах та високі вимоги до якості електроенергії перетворюють систему електропостачання з допоміжної інфраструктури на критичний фактор виробничої стабільності.

Надійне електропостачання для такого об'єкта — це не просто подача напруги, це гарантія того, що тони паперової маси не застигнуть у трубопроводах, а кілометри полотна картону не перетворяться на брак через короткочасний провал напруги. Проектування такої системи вимагає ювелірної точності в розрахунках: від оцінки пікових навантажень при запуску потужних двигунів розмелювання (рафінерів) до вибору оптимальної архітектури мережі, здатної витримати жорсткі умови експлуатації.

Окремим викликом є питання електробезпеки та надійності вимірювального обладнання. Мережі середньої напруги (6-35 кВ), характерні для внутрішнього розподілу на таких комбінатах, часто страждають від специфічних перенапруг — ферорезонансу, який здатен миттєво виводити з ладу трансформатори напруги, "осліплюючи" системи обліку та захисту.

Метою даної роботи є створення проєкту системи електропостачання, яка поєднує в собі економічну ефективність (мінімізацію втрат та капітальних витрат) із промисловою надійністю, а також розробка інженерних рішень для захисту обладнання від внутрішніх перенапруг.

## 1. Електричні навантаження

Розрахунки здійснюються відповідно до методики, що викладено у [1, 2].

### 1.1. Електричні силові навантаження в мережі підприємства до 1000В

Розрахункове активне навантаження:

$$P_p = P_{cm} \cdot K_m \quad (1.1)$$

$P_{cm}$  - середньозмінне активне навантаження;

$K_m$  - коефіцієнт максимуму навантаження.

Груповий коефіцієнт використання:

$$K_u = \frac{\sum_1^n P_{cm}}{\sum_1^n P_n} \quad (1.2)$$

Ефективне число електроприймачів в групі (чи вузлі)  $n_e$  визначається:

$$n_e = \frac{2 \sum P_n}{P_{n, \max}} \quad (1.3)$$

Для даної групи приймачів чи вузла навантаження:

$$Q_p = Q_{cm} \quad (1.4)$$

- при  $n_e > 10$

$$Q_p = 1,1 \cdot Q_{cm} \quad (1.5)$$

- при  $n_e \leq 10$ ;

$$Q_{cm} = P_{cm} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (1.6)$$

Повна розрахункова потужність:

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



$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (1.7)$$

Приклад розрахунку (лінія виробництва картону А).

Використовуємо початкові дані.

$$m = \frac{P_{н. \max}}{P_{н. \min}} = \frac{50}{5} = 10$$

$$P_{см} = P_{сум} K_u = 2700 \cdot 0.65 = 1755 \text{ кВт}$$

$$Q_{см} = P_{см} \operatorname{tg} \varphi = 1755 \cdot 1.17 = 2051.82 \text{ кВар}$$

$$n_e = \frac{2 \cdot \sum P_n}{P_{н. \max}} = \frac{2 \cdot 2800}{200} = 28$$

Користуючись джерелами [1 та 2] знаходимо коефіцієнт максимуму - Км. Для зазначених умов задачі він становить Км=1,0700.

$$P_p = P_{см} \cdot K_m = 1755 \cdot 1.07 = 1874.26 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{см} = 2051.82 \text{ кВар (так як } n_e > 10);$$

Аналогічно ведемо розрахунок також для інших цехів й підрозділів підприємства, як показано вище, результати зводимо до таблиці 1.1.

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

Таблиця 1.1. Розрахункова таблиця електричних навантажень в мережі 0,4 кВ

| №  | Назва групи споживачів               | Кіл-кість ЕС | Рн одного, кВт | Рн сумарна, кВт | m   | Ки   | cosφ | tgφ  | Рсм, кВт | Qсм, кВар | пф | Км   | Рр, кВт | Qр, кВар | Sp, кВА |
|----|--------------------------------------|--------------|----------------|-----------------|-----|------|------|------|----------|-----------|----|------|---------|----------|---------|
| 1  | Лінія виробництва картону А          | 90           | 5.15           | 2781.00         | 50  | 0.65 | 0.65 | 1.17 | 1807.65  | 2113.56   | 90 | 1.07 | 1930.49 | 2113.37  | 2862.37 |
| 2  | Лінія виробництва картону Б          | 90           | 5.15           | 2781.00         | 50  | 0.65 | 0.65 | 1.17 | 1807.65  | 2113.56   | 90 | 1.07 | 1930.49 | 2113.37  | 2862.37 |
| 3  | Машина офсетного паперу №1           | 105          | 5.15           | 4120.00         | 150 | 0.65 | 0.65 | 1.17 | 2678.00  | 3131.20   | 53 | 1.09 | 2921.70 | 3130.93  | 4282.41 |
| 4  | Машина офсетного паперу №2           | 50           | 5.15           | 1545.00         | 50  | 0.65 | 0.65 | 1.17 | 1004.25  | 1174.20   | 50 | 1.09 | 1099.01 | 1174.10  | 1608.20 |
| 5  | Дільниця дрібносерійної продукції    | 100          | 5.15           | 2163.00         | 50  | 0.65 | 0.65 | 1.17 | 1405.95  | 1643.88   | 84 | 1.07 | 1505.23 | 1643.74  | 2228.81 |
| 6  | Цех хімічної підготовки              | 10           | 51.50          | 618.00          | 100 | 0.50 | 0.80 | 0.75 | 309.00   | 231.75    | 10 | 1.37 | 423.83  | 254.92   | 494.60  |
| 7  | Цех первинної переробки сировини     | 15           | 10.30          | 154.50          | 10  | 0.30 | 0.50 | 1.73 | 46.35    | 80.34     | 15 | 1.48 | 68.50   | 80.28    | 105.53  |
| 8  | Варильна дільниця №1 (целюлоза)      | 25           | 10.30          | 309.00          | 30  | 0.35 | 0.70 | 1.02 | 108.15   | 110.21    | 25 | 1.31 | 141.99  | 110.33   | 179.82  |
| 9  | Дільниця відбілювання маси           | 15           | 10.30          | 257.50          | 20  | 0.60 | 0.70 | 1.02 | 154.50   | 157.59    | 15 | 1.22 | 188.74  | 157.62   | 245.90  |
| 10 | Варильна дільниця №2 (напівцелюлоза) | 25           | 10.30          | 412.00          | 15  | 0.35 | 0.70 | 1.02 | 144.20   | 147.29    | 25 | 1.31 | 189.31  | 147.11   | 239.75  |

|               |                                       |            |          |                 |            |             |             |             |                 |                 |            |             |                 |                 |                 |
|---------------|---------------------------------------|------------|----------|-----------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 11            | Блок розділення повітря               | 20         | 10.30    | 412.00          | 50         | 0.60        | 0.78        | 0.80        | 247.20          | 198.79          | 16         | 1.21        | 299.94          | 198.33          | 359.57          |
| 12            | Ремонтно-механічний комплекс          | 90         | 4.64     | 3072.49         | 63.65      | 0.30        | 0.75        | 0.88        | 921.85          | 812.67          | 90         | 1.17        | 1081.00         | 812.91          | 1352.54         |
| 13            | Цех фінішної обробки та пакування     | 50         | 1.03     | 618.00          | 50         | 0.54        | 0.73        | 0.94        | 333.72          | 312.09          | 24         | 1.20        | 400.44          | 312.44          | 507.91          |
| 14            | Логістично-складський термінал        | 15         | 5.15     | 257.50          | 15         | 0.60        | 0.90        | 0.48        | 154.50          | 75.19           | 15         | 1.22        | 188.74          | 74.83           | 203.03          |
| 15            | Станція стисненого повітря та вакууму | 10         | 128.75   | 1545.00         | 250        | 0.65        | 0.85        | 0.62        | 1004.25         | 622.12          | 10         | 1.24        | 1244.90         | 684.62          | 1420.73         |
| <b>Всього</b> | <b>Всього по заводу</b>               | <b>710</b> | <b>-</b> | <b>21046.00</b> | <b>250</b> | <b>0.58</b> | <b>0.68</b> | <b>1.07</b> | <b>12127.20</b> | <b>12924.40</b> | <b>163</b> | <b>1.06</b> | <b>13614.30</b> | <b>13008.90</b> | <b>18953.50</b> |

## Освітлювальні навантаження

Встановлена потужність освітлювальних приймачів броварні, (кВт):

$$P_y = p_0 F \cdot 10^{-3} \quad (1.8)$$

Тобто, результат залежить від питомої потужності освітлювального навантаження ( $p_0$ ) та площі приміщень підприємства (цехів, відділень і т.д.) –  $F$ .

Розрахункове освітлювальне навантаження:

$$P_{p.осв} = K_n P_y \quad (1.9)$$

$K_n$  - коефіцієнт попиту.

$Q_p$  - залежить також від типу світильників, які обираються нами до встановлення на підприємстві.

Приклад (лінія виробництва картону А):

$$F = 1980 \text{ м}^2$$

$$P_0 = 15 \text{ Вт / м}^2$$

$$P_y = F \cdot P_0 \cdot 10^{-3} = 1980 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 29.7 \text{ кВт}$$

$$P_p = K_n \cdot P_y = 0.95 \cdot 29.7 = 28.2 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 28.2 \cdot 0.48 = 13.7 \text{ кВар}$$

Результати розрахунків для інших цехів аналогічні до показаного та зведені до таблиці 1.2.

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

Таблиця 1.2. Розрахунку електричних навантажень освітлення

| №             | Назва групи споживачів                | F, м²      | p0,<br>Вт/м² | Py,<br>кВт    | cosφ | tgφ  | Qy,<br>квар   | Kc   | Pp,<br>кВт    | Qp,<br>квар   | Sp,<br>кВА    |
|---------------|---------------------------------------|------------|--------------|---------------|------|------|---------------|------|---------------|---------------|---------------|
| 1             | Лінія виробництва картону А           | 1 980      | 15.45        | 30.59         | 0.90 | 0.48 | 14.81         | 0.95 | 29.05         | 14.11         | 32.29         |
| 2             | Лінія виробництва картону Б           | 1 460      | 15.45        | 22.56         | 0.90 | 0.48 | 10.93         | 0.95 | 21.42         | 10.40         | 23.81         |
| 3             | Машина офсетного паперу №1            | 450        | 15.45        | 6.95          | 0.90 | 0.48 | 3.37          | 0.95 | 6.59          | 3.19          | 7.34          |
| 4             | Машина офсетного паперу №2            | 1 970      | 15.45        | 30.44         | 0.90 | 0.48 | 14.74         | 0.95 | 28.94         | 14.01         | 32.13         |
| 5             | Дільниця дрібносерійної продукції     | 1 125      | 15.45        | 17.39         | 0.90 | 0.48 | 8.42          | 0.95 | 16.48         | 8.03          | 18.34         |
| 6             | Цех хімічної підготовки               | 765        | 12.36        | 9.46          | 0.50 | 1.73 | 16.38         | 0.80 | 7.52          | 13.08         | 15.13         |
| 7             | Цех первинної переробки сировини      | 338        | 18.54        | 6.26          | 0.90 | 0.48 | 3.04          | 0.85 | 5.36          | 2.58          | 5.92          |
| 8             | Варильна дільниця №1 (целюлоза)       | 1 440      | 20.60        | 29.66         | 0.90 | 0.48 | 14.37         | 0.85 | 25.24         | 12.26         | 28.02         |
| 9             | Дільниця відбілювання маси            | 900        | 18.54        | 16.69         | 0.90 | 0.48 | 8.09          | 0.85 | 14.21         | 6.90          | 15.76         |
| 10            | Варильна дільниця №2 (напівцелюлоза)  | 1 462      | 20.60        | 30.12         | 0.90 | 0.48 | 14.58         | 0.85 | 25.65         | 12.36         | 28.45         |
| 11            | Блок розділення повітря               | 720        | 10.30        | 7.42          | 1.00 | 0.00 | 0.00          | 0.85 | 6.28          | 0.00          | 6.30          |
| 12            | Ремонтно-механічний комплекс          | 675        | 15.45        | 10.43         | 0.50 | 1.73 | 18.07         | 0.95 | 9.89          | 17.20         | 19.82         |
| 13            | Цех фінішної обробки та пакування     | 1 350      | 15.45        | 20.86         | 0.90 | 0.48 | 10.10         | 0.85 | 17.72         | 8.55          | 19.69         |
| 14            | Логістично-складський термінал        | 4 376      | 5.15         | 22.54         | 0.50 | 1.73 | 39.04         | 0.60 | 13.49         | 23.38         | 27.05         |
| 15            | Високовольтна насосна станція         | 450        | 10.30        | 4.64          | 1.00 | 0.00 | 0.00          | 0.80 | 3.71          | 0.00          | 3.71          |
| 16            | Станція стисненого повітря та вакууму | 1 147      | 10.30        | 11.81         | 1.00 | 0.00 | 0.00          | 0.80 | 9.48          | 0.00          | 9.46          |
| 17            | Зовнішнє освітлення території         | 117<br>450 | 0.21         | 24.19         | 0.50 | 1.73 | 41.91         | 0.50 | 12.05         | 20.91         | 24.19         |
| <b>Всього</b> | <b>Всього по заводу</b>               | -          | -            | <b>302.01</b> | -    | -    | <b>217.85</b> | -    | <b>253.08</b> | <b>166.96</b> | <b>317.41</b> |

### 1.3. Електричні силові навантаження в мережі підприємства вище 1000В

Розрахунок ел. навантажень у мережах з напругою вище за 1000 В виконується відповідно до рекомендацій, [3, 4, 5]. При цьому обов'язковим моментом є врахування втрат у силових трансформаторах.

$$\Delta P = n(\Delta P_x + \Delta P_k K_z^2) \quad (1.10)$$

$$\Delta Q = n\left(\frac{I_x}{100} S_n + \frac{U_k}{100} S_n K_z^2\right) \quad (1.11)$$

де  $n$  – кількість трансформаторів;

$\Delta P_x, \Delta P_k$  – втрати відповідно х.х і к.з., %;

$K_z$  – коефіцієнт завантаження трансформаторів;

Кінцеві результати розрахунків силових й освітлювальних електричних навантажень у мережах напругою вище за 1000 В наведено у таблиці 1.3.

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

Таблиця 1.3. Високовольтні розрахункові навантаження (мережа 10 кВ)

| № | Назва групи споживачів                                | Кіл-кість ЕС | Рн одного, кВт | Рн сумарна, кВт | m | Ки   | cosj | tgj  | Рсм, кВт | Qсм, кВар | неф | Км   | Рр, кВт | Qр, кВар | Sp, кВА |
|---|-------------------------------------------------------|--------------|----------------|-----------------|---|------|------|------|----------|-----------|-----|------|---------|----------|---------|
| 1 | ТП № 1, 2<br>(Лінія картону А, Варильна №2)           | 3            | -              | 3254.80         | - | 0.63 | 0.98 | 0.23 | 2038.58  | 460.51    | -   | 1.06 | 2164.34 | 457.63   | 2212.19 |
| 2 | ТП № 3, 4<br>(Лінія картону Б, Хім. цех, Варильна №1) | 4            | -              | 4207.55         | - | 0.60 | 0.91 | 0.46 | 2545.13  | 1161.63   | -   | 1.08 | 2748.76 | 1156.48  | 2982.14 |
| 3 | ТП № 5, 6<br>(Машина офсетного паперу №1)             | 4            | -              | 4130.30         | - | 0.66 | 1.00 | 0.06 | 2720.54  | 175.20    | -   | 1.09 | 2963.82 | 175.10   | 2968.99 |
| 4 | ТП № 7, 8<br>(Дрібносерійна, Фінішна, Склад)          | 3            | -              | 2856.19         | - | 0.64 | 0.85 | 0.63 | 1827.12  | 1150.30   | -   | 1.06 | 1938.77 | 1146.80  | 2252.55 |
| 5 | ТП № 9<br>(Машина офсетного паперу №2, Киснева)       | 2            | -              | 1998.20         | - | 0.65 | 0.94 | 0.36 | 1306.76  | 476.58    | -   | 1.08 | 1405.54 | 475.86   | 1483.91 |
| 6 | ТП № 10<br>(Ремонтно-механічний, Зовнішнє освітлення) | 2            | -              | 3113.69         | - | 0.31 | 0.72 | 0.98 | 977.57   | 953.78    | -   | 1.15 | 1123.32 | 931.94   | 1459.58 |
| 7 | ТП № 11                                               | 2            | -              | 1800.44         | - | 0.66 | 0.92 | 0.42 | 1187.49  | 497.08    | -   | 1.19 | 1407.80 | 483.58   | 1488.55 |

|               |                                          |   |      |                 |   |             |             |             |                 |                |   |             |                 |                |                 |
|---------------|------------------------------------------|---|------|-----------------|---|-------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|---|-------------|-----------------|----------------|-----------------|
|               | (Компресорна,<br>Склади)                 |   |      |                 |   |             |             |             |                 |                |   |             |                 |                |                 |
| 8             | Високовольтна<br>насосна станція<br>(СД) | 4 | 1400 | 5768.00         | - | 0.80        | 0.90        | 0.48        | 4614.40         | 2234.89        | - | 1.15        | 5320.49         | -<br>1974.51   | 5675.06         |
| <b>Всього</b> | <b>Всього по<br/>заводу (10 кВ)</b>      | - | -    | <b>27129.20</b> | - | <b>0.63</b> | <b>0.92</b> | <b>0.41</b> | <b>17217.60</b> | <b>7109.97</b> | - | <b>1.11</b> | <b>19072.80</b> | <b>2852.88</b> | <b>19285.00</b> |



## 1.4. Графіки електричних навантажень

Графіки навантажень дозволяють візуалізувати споживання електроенергії для запобігання перевантаженням, планування експлуатації та підвищення енергоефективності. Основне завдання цієї роботи — побудова зимового і літнього добових графіків, а також формування річного графіка за тривалістю навантажень для оптимізації роботи енергосистеми.

$P(t), Q(t), S(t)$

Витрати активної й реактивної електричної енергії в умовах навчального проектування можливо визначити наступними виразами:

$$W_z = \sum P_i T_i \quad (1.12)$$

$$V_z = \sum Q_i T_i \quad (1.13)$$

$$W = \sum W_i = 182162423.2 + 50401995.3 = 132564419.1 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$V = \sum V_i = 52915009.2 + 32460363 = 85375372.2 \text{ кВар} \cdot \text{год};$$

Час годин використання максимального навантаження та час найбільших втрат:

$$T_{\max} = \frac{\sqrt{W_{\Gamma}^2 + Q_{\Gamma}^2}}{P_p} \quad (1.14)$$

$$\tau = (0.124 + \frac{T_{\max}}{10^4})^2 \cdot 8760 \quad (1.15)$$

$$T_{\max} = \frac{\sqrt{W^2 + V^2}}{S_{\max}} = \frac{\sqrt{132564419.1^2 + 85375372.2^2}}{22536.5} = 6996.6 \text{ год};$$

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

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{T_{max}}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = \left( 0,124 + \frac{7078}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = 5942.9 \text{ год.}$$

Графіки електричних навантажень, про які йшлося вище представлені на рис. 1.1. – 1.3.

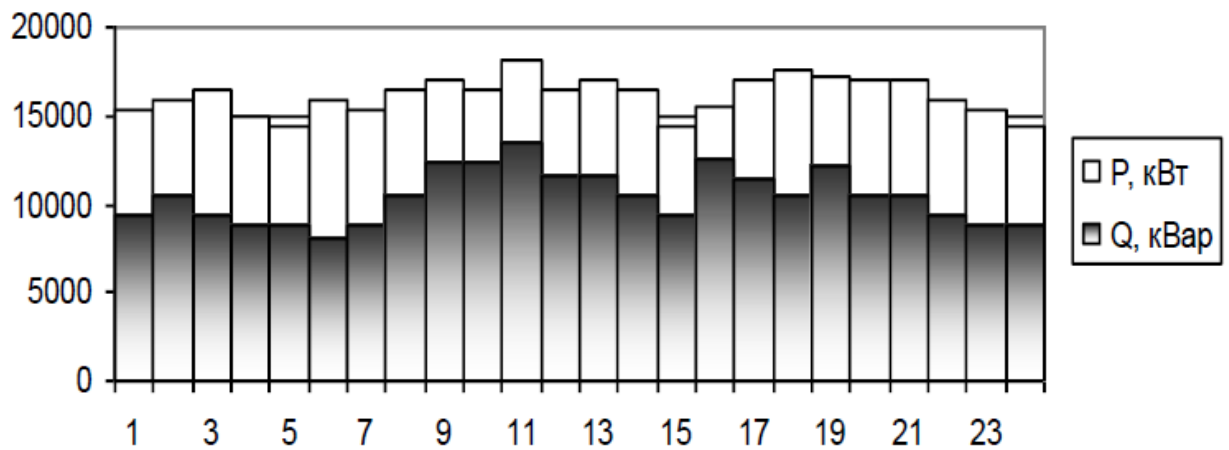


Рис. 1.1. Добові графіки активного та реактивного навантаження робочого та вихідного днів за зимовий період

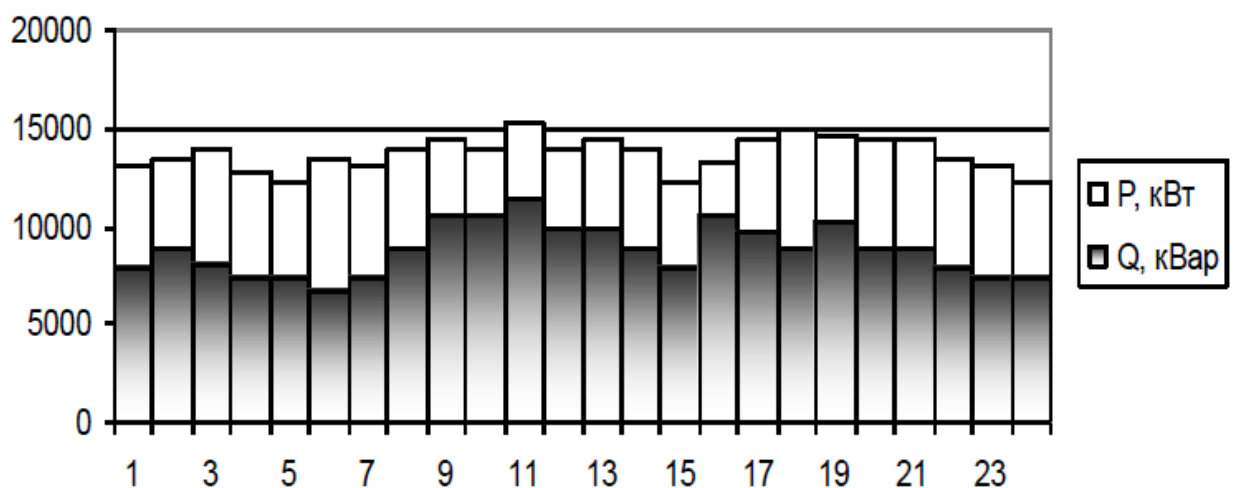


Рис. 1.2. Добові графіки активного та реактивного навантаження робочого та вихідного днів за літній період

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

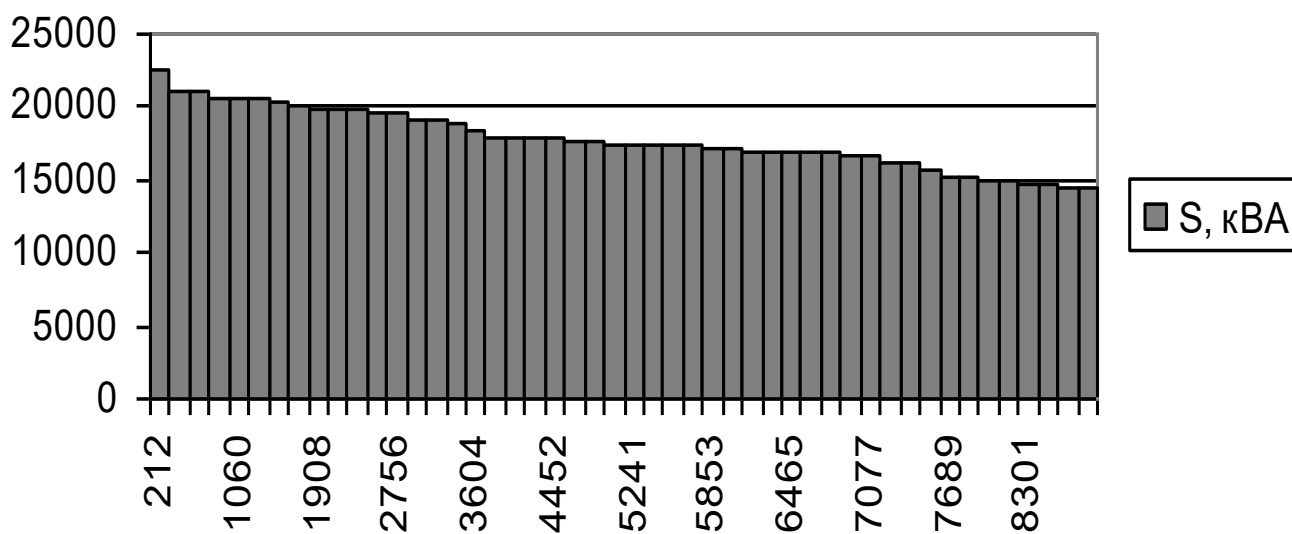


Рис. 1.3. Річний графік повного навантаження за тривалістю

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

## 2. Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної розподільної установки (ЦРП)

Візуалізація електричних навантажень підприємства реалізується через побудову картограми, де кожен цех представлений колом. Площа такого кола у вибраному масштабі (кВт/мм<sup>2</sup>) відповідає повному навантаженню цеху. Радіус кола розраховується за формулою площі (2.1):

Локалізація навантажень базується на методах теоретичної механіки. Центр електричних навантажень (ЦЕН) цеху приймається рівним його геометричному центру (за умови рівномірного розподілу обладнання).

Координати загального ЦЕН підприємства ( $X_0$ ,  $Y_0$ ) визначаються аналогічно до центру ваги фізичної системи, де «масою» виступає потужність цехів ( $P_i$ ), а координатами — центри навантажень окремих цехів ( $X_i$ ,  $Y_i$ ):

Частка освітлювального навантаження відображається на картограмі у вигляді сектора кола. Кут цього сектора (2.4) пропорційний відношенню потужності освітлення до повного навантаження цеху.

$$P_i = \pi R_i^2 m \quad (2.1)$$

$$R_i = \sqrt{\frac{P_i}{\pi m}} \quad (2.2)$$

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2.3)$$

$$\alpha_i = \frac{P_{i.осв} \cdot 360}{\pi R_i^2} \quad (2.4)$$

Згідно описаної методики, для кожного окремого цеху (підрозділу) підприємства розраховуємо координати та кут  $\alpha$ .

Приклад. Лінія виробництва картону А

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_1}{\pi m}} = \sqrt{\frac{P_{p.осб} + P_{p.сил}}{\pi m}} = \sqrt{\frac{28.22 + 1874.26}{3.14 \cdot 1}} = 24.61 \text{ мм}$$

$$\alpha_i = \frac{P_{i.осб} \cdot 360}{\pi R_i^2} = \frac{28.22 \cdot 360}{3.14 \cdot 24.61^2} = 5.34^\circ$$

$$m = 1 \text{ кВт} / \text{мм}^2$$

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{4174474.72}{18629.03} = 224 \text{ м},$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{2458955.67}{18629.03} = 132 \text{ м}.$$

Підсумок розрахунків знаходиться у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Картограма електричних навантажень (допоміжна таблиця)

| №  | Найменування                                 | Рр.сил,<br>кВт | Рр.осв,<br>кВт | РрΣ,<br>кВт | m | R,<br>мм | a     | x, м   | y, м   | Рх, кВт·м | Рy, кВт·м |
|----|----------------------------------------------|----------------|----------------|-------------|---|----------|-------|--------|--------|-----------|-----------|
| 1  | Лінія виробництва картону А                  | 1930.49        | 29.05          | 1959.54     | 1 | 24.61    | 5.34  | 76.50  | 195.00 | 149905.00 | 382110.00 |
| 2  | Лінія виробництва картону Б                  | 1930.49        | 21.42          | 1951.91     | 1 | 24.56    | 3.95  | 122.25 | 164.75 | 238621.00 | 321577.00 |
| 3  | Машина офсетного паперу №1                   | 2921.70        | 6.59           | 2928.29     | 1 | 30.08    | 0.81  | 132.00 | 127.50 | 386534.00 | 373357.00 |
| 4  | Машина офсетного паперу №2                   | 1099.01        | 28.94          | 1127.95     | 1 | 18.67    | 9.23  | 310.00 | 147.00 | 349664.00 | 165809.00 |
| 5  | Дільниця дрібносерійної<br>продукції         | 1505.23        | 16.48          | 1521.71     | 1 | 21.69    | 3.91  | 169.50 | 91.50  | 257930.00 | 139236.00 |
| 6  | Цех хімічної підготовки                      | 423.83         | 7.52           | 431.35      | 1 | 11.55    | 6.31  | 277.50 | 232.50 | 119700.00 | 100289.00 |
| 7  | Цех первинної переробки<br>сировини          | 68.50          | 5.36           | 73.86       | 1 | 4.78     | 25.97 | 165.75 | 217.50 | 12242.30  | 16064.50  |
| 8  | Варильна дільниця №1<br>(целюлоза)           | 141.99         | 25.24          | 167.23      | 1 | 7.19     | 54.29 | 178.50 | 195.00 | 29850.50  | 32609.80  |
| 9  | Дільниця відбілювання маси                   | 188.74         | 14.21          | 202.95      | 1 | 7.92     | 25.16 | 69.00  | 159.30 | 14003.50  | 32329.90  |
| 10 | Варильна дільниця №2<br>(напівцелюлоза)      | 189.31         | 25.65          | 214.96      | 1 | 8.15     | 42.88 | 133.00 | 196.50 | 28589.70  | 42239.60  |
| 11 | Блок розділення повітря                      | 299.94         | 6.28           | 306.22      | 1 | 9.73     | 7.41  | 303.00 | 171.00 | 92784.70  | 52363.60  |
| 12 | Ремонтно-механічний комплекс                 | 1081.00        | 9.89           | 1090.89     | 1 | 18.36    | 3.27  | 280.50 | 98.50  | 305995.00 | 107453.00 |
| 13 | Цех фінішної обробки та<br>пакування         | 400.44         | 17.72          | 418.16      | 1 | 11.37    | 15.26 | 69.75  | 91.50  | 29166.70  | 38261.60  |
| 14 | Логістично-складський термінал<br>(Секція 1) | 24.53          | 1.76           | 26.29       | 1 | 2.85     | 24.07 | 90.75  | 24.00  | 2385.82   | 630.96    |

|               |                                                 |                 |               |                 |          |          |          |               |               |                   |                   |
|---------------|-------------------------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|----------|----------|----------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| 15            | Логістично-складський термінал<br>(Секція 2)    | 32.08           | 2.30          | 34.38           | 1        | 3.26     | 24.07    | 328.50        | 202.50        | 11293.80          | 6961.95           |
| 16            | Логістично-складський термінал<br>(Секція 3)    | 35.86           | 2.56          | 38.42           | 1        | 3.45     | 24.07    | 408.75        | 228.75        | 15704.20          | 8788.58           |
| 17            | Логістично-складський термінал<br>(Секція 4)    | 96.25           | 6.90          | 103.15          | 1        | 5.65     | 24.07    | 405.00        | 165.75        | 41775.80          | 17097.10          |
| 18            | Високовольтна насосна станція<br>(0.4 кВ)       | 0.00            | 3.71          | 3.71            | 1        | 1.07     | -        | 332.00        | 113.50        | 1231.72           | 421.08            |
| 19            | Високовольтна насосна станція<br>(СД)           | 5320.49         | 0.00          | 5320.49         | 1        | 40.55    | 0.00     | 332.00        | 113.50        | 1766400.00        | 603876.00         |
| 20            | Станція стисненого повітря та<br>вакууму        | 1244.90         | 9.48          | 1254.38         | 1        | 19.69    | 2.71     | 355.50        | 72.75         | 445932.00         | 91256.10          |
| 21            | Зовнішнє освітлення території                   | 0.00            | 12.10         | 12.10           | 1        | 1.93     | -        | 0.00          | 0.00          | 0.00              | 0.00              |
| <b>Всього</b> | <b>Всього по заводу (Центр<br/>навантажень)</b> | <b>18934.80</b> | <b>253.16</b> | <b>19187.96</b> | <b>-</b> | <b>-</b> | <b>-</b> | <b>224.08</b> | <b>132.00</b> | <b>4299710.00</b> | <b>2532730.00</b> |

### 3. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства

Оптимізація системи зовнішнього електропостачання промислового об'єкта ґрунтується на обґрунтованому виборі класу напруги та конфігурації мережі. Це рішення приймається на основі комплексного аналізу, де ключовими факторами виступають: розрахункова потужність споживача, віддаленість від джерела живлення, наявні рівні напруги в енергосистемі та категорійність надійності.

Головна мета проектування — знайти техніко-економічний оптимум. На початковому етапі (зокрема в межах курсового проектування) доцільно використовувати номограми для відсіювання нераціональних рішень без проведення детальних розрахунків. Це дозволяє звузити коло пошуку до кількох найбільш вірогідних варіантів, прив'язаних до реальних точок підключення.

Згідно з вихідними даними, живлення здійснюється від підстанції системи нескінченної потужності, яка знаходиться на відстані 3,3 км. Підстанція обладнана двома трансформаторами по 25 МВА (115/10,5 кВ), що працюють роздільно. Виходячи з цього, для техніко-економічного порівняння доцільно розглянути схеми живлення на двох класах напруги: 10 кВ та 110 кВ.

Приведені витрати:

$$Z_i = E_n K_i + C_i + C_{\text{exp.i}} + Y_i \quad (3.1)$$

де  $E_n$  - коефіцієнт нормативний, 1/рік;

$K_i$  - капітальні підсумкові витрати у нашу схему, тис. грн.;

$C_i$  - поточні витрати, тис.грн./рік;



$C_{втр.i}$  –вартість втрат електричної енергії, тис.грн./рік;

$Y_i$  - ймовірнісний збиток від переривів в електропостачанні об'єкту, тис.грн/рік.

$$C_i = C_{ai} + C_{ei} \quad (3.2)$$

$$C_{втр} = c_0 \Delta W \quad (3.3)$$

де  $C_0$  –вартість втрат однієї кВт·год електроенергії, (грн.)

$\Delta W$  втрати електричної енергії в повітряних та кабельних лініях електропередач, кВт·год;

$$\Delta W = \Delta P_{1км} l_{\Sigma} K_3^2 \tau \quad (3.4)$$

де  $\Delta P_{1км} - l_{\Sigma} - K_3 - \tau$  – відповідно питомі втрати активної потужності на 1 км довжини; сумарна довжина ліній електропередачі, км; коефіцієнт завантаження зазначених ліній; кількість годин максимальних річних втрат.

Втрати електричної енергії в трансформаторах:

$$\Delta W = \Delta P_x t + \Delta P_k K_3^2 \tau \quad (3.5)$$

Збитки визначаються наступним чином:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3.6)$$

де  $\lambda_i$  – параметр потоку відмов одного із елементів дослідної системи електропостачання застосованих у проектуванні, 1/рік;

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

$n$  - кількість застосованих елементів у колі схеми.

Середній час відновлення однієї лінії (годин) (ланцюга схеми):

$$T_{\epsilon} = \frac{\sum \lambda_i T_{ei}}{\lambda} \quad (3.7)$$

Загальну методику розрахунку найвигіднішого варіанту, використану в даній роботі, наведено в літературному джерелі [6]. На основі її здійснюється техніко-економічне зіставлення 2-х варіантів схем зовнішнього електропостачання

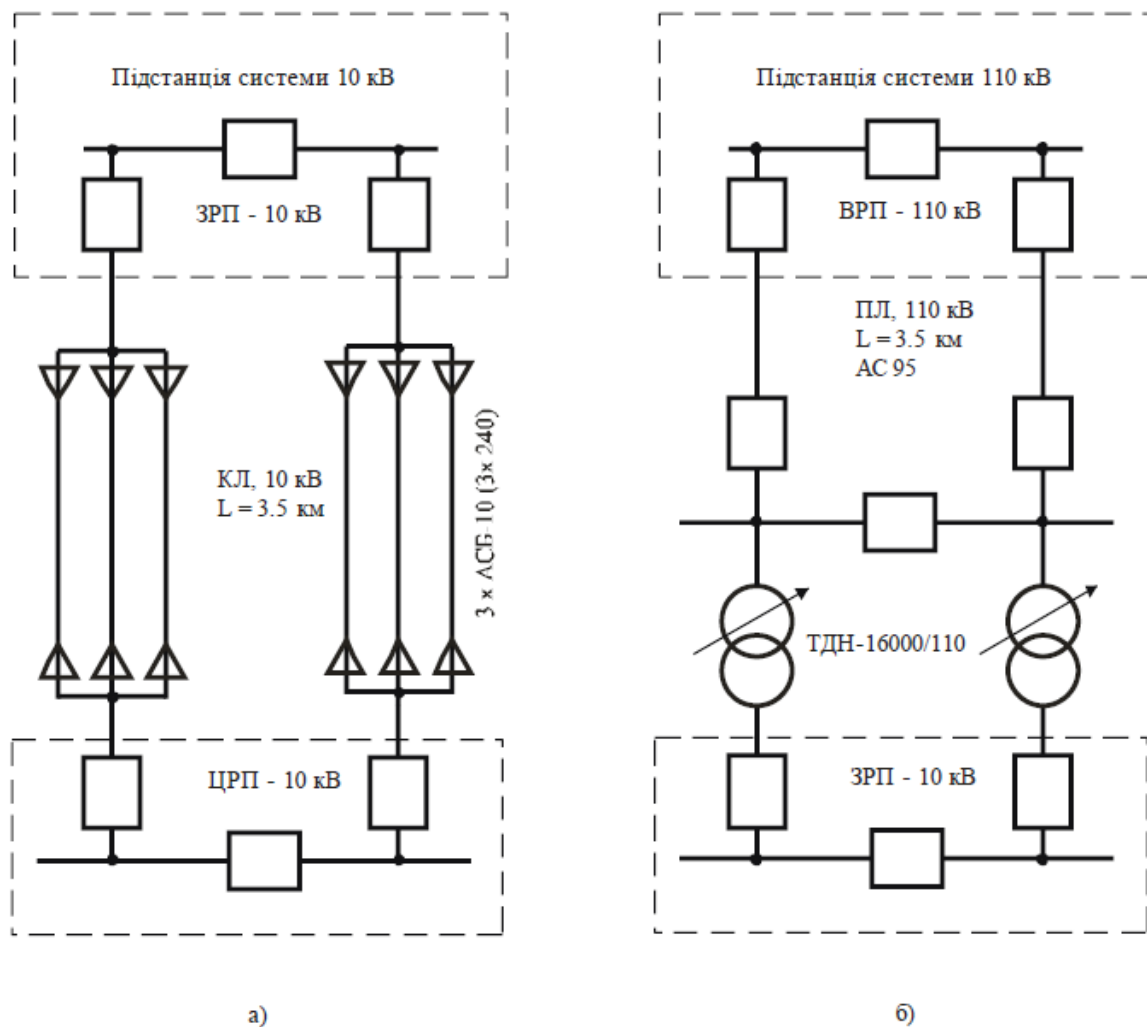


Рис. 3.1. Можливі схеми зовнішнього електропостачання комбінату

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

## Розрахунки по I варіанту

### Розрахунок капітальних вкладень

Таблиця 3.1. Розрахунок капітальних вкладень

| №<br>вар. | Назва елемента схеми | Оди-<br>ниця | Кількість | Вартість | Всього  |
|-----------|----------------------|--------------|-----------|----------|---------|
| 1         | КЛ 10 кВ             | км           | 6,6       | 140      | 924     |
|           | Траншея              | км.          | 3,3       | 15,3     | 50,49   |
|           | Шафи КРП серії КУ-10 | шт.          | 2         | 15,7     | 31,4    |
| Всього    |                      |              |           |          | 1005,89 |

### Розрахунок поточних витрат

Таблиця 3.2. Розрахунок поточних витрат

| №<br>вар. | Назва елемента схеми | К <sub>ж</sub> ,<br>тис.грн. | Р <sub>аж</sub> ,<br>% | С <sub>аж</sub> ,<br>тис.грн. | Р <sub>эж</sub> ,<br>% | С <sub>эж</sub> ,<br>тис.грн. | С <sub>ж</sub> ,<br>тис.грн. |
|-----------|----------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1         | КЛ 10 кВ             | 924                          | 5                      | 46,2                          | 5                      | 46,2                          | 92,4                         |
|           | Траншея              | 50,49                        | 5                      | 2,5245                        | 5                      | 2,5245                        | 5,049                        |
|           | Шафи КРП серії КУ-10 | 31,4                         | 15                     | 4,71                          | 5                      | 1,57                          | 6,28                         |
| Всього    |                      |                              |                        |                               |                        |                               | 103,729                      |

### Розрахунок збитку від перерви електропостачання

$$U = U_0 P_{cp} T_a = 25 \cdot 15,23 \cdot 0,01356 = 5,16$$

## Розрахунки по II варіанту

### Розрахунок капітальних вкладень

Таблиця 3.1. Розрахунок капітальних вкладень

| №<br>вар. | Назва елемента схеми     | Оди-<br>ниця | Кількість | Вартість | Всього |
|-----------|--------------------------|--------------|-----------|----------|--------|
| 2         | ЛЕП 110 кВ на з/б опорах | км           | 3,3       | 80       | 264    |
|           | ВРП 110 кВ               | шт.          | 1         | 95       | 95     |
|           | 2 x ТМН-10000/110        | шт.          | 2         | 1000     | 2000   |
| Всього    |                          |              |           |          | 2359   |

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

### *Розрахунок поточних витрат*

Таблиця 3.2. Розрахунок поточних витрат

| №<br>вар | Назва елемента схеми     | K <sub>j</sub> ,<br>тис.грн. | P <sub>aj</sub> ,<br>% | C <sub>aj</sub> ,<br>тис.грн. | P <sub>эj</sub> ,<br>% | C <sub>aj</sub> ,<br>тис.грн. | C <sub>j</sub> ,<br>тис.грн. |
|----------|--------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 2        | ЛЕП 110 кВ на з/б опорах | 264                          | 5                      | 13,2                          | 5                      | 13,2                          | 26,4                         |
|          | ВРП 110 кВ               | 95                           | 15                     | 14,25                         | 5                      | 4,75                          | 19                           |
|          | 2 х ТМН-10000/110        | 2000                         | 15                     | 300                           | 5                      | 100                           | 400                          |
| Всього   |                          |                              |                        |                               |                        |                               | 445,4                        |

### *Розрахунок збитку від перерви електропостачання*

$$U = U_0 P_{cp} T_a = 25 \cdot 0,02 \cdot 0,02285 = 0,01$$

Результати приведених розрахунків заносимо у підсумкову таблицю за номером 3.5.

Таблиця 3.5. Техніко – економічні показники розглянутих схем

| Показники схеми               | Варіанти (тис. грн) |         |
|-------------------------------|---------------------|---------|
|                               | I                   | II      |
| Капітальні вкладення          | 1005,9              | 2395    |
| Поточні витрати               | 103,73              | 445,4   |
| Вартість втрат електроенергії | 40750,6             | 9854,5  |
| Збиток                        | 5,16                | 0,01    |
| Приведені витрати             | 40980,2             | 10583,1 |

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

#### 4. Компенсация реактивной мощности

Навантаження на стороні 0.4 кВ:

$$P_n = 12746 \text{ кВт}$$

$$Q_n = 12709 \text{ кВар}$$

Навантаження на стороні 10 кВ:

$$P_\epsilon = 5166 \text{ кВт}$$

$$Q_\epsilon = 0 \text{ кВар}$$

Втрати в трансформаторах:

$$\Delta P_m = 156 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_m = 761 \text{ кВар}$$

Сумарне навантаження по заводу:

$$P_p = P_n + \Delta P_{mp} + \Delta P_\epsilon = 12746 + 156 + 5166 = 18068 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_n + \Delta Q_{mp} + QP_\epsilon = 12709 + 761 + 0 = 13470 \text{ кВар}$$

Реактивна потужність, яка передається від енергосистеми:

$$Q_\epsilon = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_\epsilon = 18068 \cdot 0.15 = 2710 \text{ кВар}$$

Реактивна потужність, яку необхідно компенсувати:

|  |  |  |  |  |  |      |
|--|--|--|--|--|--|------|
|  |  |  |  |  |  | Арк. |
|  |  |  |  |  |  |      |
|  |  |  |  |  |  |      |

$$Q_{кп} = Q_p - Q_{\epsilon} = 13470 - 2710 = 10760 \text{ кВар}$$

Визначення мінімальної кількості трансформаторів:

$$N_0 = \frac{P_n}{K_3 P_{ном}} = \frac{12746}{0.7 \cdot 1000} \approx 20 \text{ шт.}$$

Надалі розглядатимуться варіанти при кількості трансформаторів  $N = N_0, N = N_0 + 1, N = N_0 + 2$

1-й Варіант  $N = N_0 = 20$  тр-рів

Реактивна потужність, передавана із мережі 10 кВ до мережі до 1 кВ при встановленні мінімальної кількості  $N$  трансформаторів:

$$Q_n = \sqrt{(N \cdot K_3 \cdot S_{ном})^2 - P_n^2} = \sqrt{(20 \cdot 0.7 \cdot 1000)^2 - 18068^2} = 0 \text{ кВар}$$

$$Q_{кп} = Q_n - Q_n = 10760 - 0 = 10760 \text{ кВар}$$

Потужність КП на стороні 10 кВ:

$$Q_{кв} = Q_{\epsilon} + Q_n + \Delta Q_{тр} - Q_{\epsilon} - Q_{кп} = 12709 + 0 + 761 - 2710 - 8842.5 = 1917 \text{ кВар}$$

На стороні 10 кВ встановлення батарей конденсаторів не потрібне, так як синхронний двигун може видавати в мережу до  $Q_{сд} = 2387,0 \text{ кВар}$  реактивної потужності.

Приймаємо  $Q_{сд} = 1917,0 \text{ кВар}$

Розрахунок 2-х інших варіантів  $N = N_0 + 1, N = N_0 + 2$  виконується аналогічно вказаному.

Результати розрахунків наведено у таблиці 4.1.

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

Таблиця 4.1 Розміщення низьковольтних КП на комбінаті

| ТП           | n | Pp,<br>кВт | Qp,<br>кВар | Qnp,<br>кВар | Qкп,<br>кВар | Qкп(ст.),<br>кВар | Qp-Qкп,<br>кВар | Kз   | Sp,<br>кВА | Тип і потужн.<br>БСК   | Kі, тис<br>грн |
|--------------|---|------------|-------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------|------|------------|------------------------|----------------|
| ТП №<br>1, 2 | 3 | 2086,4     | 2231,1      | 318          | 1913,5       | 1908,5            | 322,6           | 0,7  | 2111,2     | 3х300, 3х200,<br>3х133 | 484,08         |
| ТП №<br>3, 4 | 4 | 2648,2     | 2672,3      | 951,8        | 1720,6       | 1708,5            | 963,8           | 0,7  | 2818,1     | 4х225, 4х200           | 434,2          |
| ТП №<br>5, 6 | 4 | 2857,2     | 3058,2      | 0            | 3058,2       | 3055,2            | 3               | 0,71 | 2857,2     | 4х335, 4х225,<br>4х200 | 720,56         |
| ТП №<br>7, 8 | 3 | 1866,3     | 1937,6      | 985,6        | 951,7        | 942,2             | 995,5           | 0,71 | 2115,2     | 3х200,<br>3х112,5      | 276,6          |
| ТП №<br>9    | 2 | 1354,7     | 1352,7      | 380,8        | 971,8        | 970,8             | 381,9           | 0,7  | 1407,5     | 2х300, 2х133,<br>2х50  | 281,92         |
| ТП №<br>10   | 2 | 1079,4     | 830,1       | 902          | 0            | 0                 | 830,1           | 0,68 | 1361,7     | -                      | 0              |
| ТП №<br>11   | 2 | 1356,7     | 690,4       | 373,1        | 317,6        | 301,5             | 388,9           | 0,71 | 1411,4     | 2х150                  | 94,22          |

Втрати активної потужності в КП:

$$\Delta P_{\kappa H} = 0.0045 Q_{\kappa H} = 0.0045 \cdot 8842.5 = 40 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\kappa B} = 0.003 Q_{\kappa B} = 0.003 \cdot 0 = 0 \text{ кВт}$$

Втрати активної потужності (P) під час передачі через трансформатори  
власне реактивної потужності:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{нр}}^2 \cdot \Delta P_{\kappa}}{n \cdot P_{\text{ном}}^2} = \frac{3867^2 \cdot 12.2}{20 \cdot 1000^2} = 9.12 \text{ кВт}$$

Вартість КП на стороні 0,4 кВ (грн.):

$$K_{\kappa H} = 484.08 + 434.2 + 720.56 + 276.6 + 281.92 + 94.22 = 2291.58 \text{ тис. грн.}$$

Вартість КП на стороні 10 кВ:

$$K_{\kappa B} = 0 \text{ тис. грн.}$$

Вартість ТП:

$$K_{КП} = 9 \cdot 550 + 2 \cdot 250 = 5450 \text{ тис. грн.}$$

Розрахункові витрати:

$$\begin{aligned} Z &= E_H \cdot (K_{KH} + K_{KB} + K_{КП}) + (\Delta P_{KH} + \Delta P_{KB} + \Delta P_{КП}) \cdot C_0 \cdot \tau = \\ &= 0.12 \cdot (2291.58 + 0 + 5450) + (40 + 0 + 9.12) \cdot 0.268 \cdot 6061 = 1006.89 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

Розрахунки 2-го й 3-го варіантів виконуються аналогічно, показаному вище. Результати наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Розрахунок затрат на компенсацію РП та її баланс

| Показник                                           | Варіант |         |         |
|----------------------------------------------------|---------|---------|---------|
|                                                    | 1       | 2       | 3       |
| Потужність компенсуючих пристроїв в мережі 0,4 кВ  | 8841,5  | 7212    | 6274    |
| Потужність компенсуючих пристроїв в мережі 10 кВ   | 0       | 1350    | 2250    |
| Генерація реактивної потужності СД                 | 0       | 0       | 0       |
| Споживання реактивної потужності від енергосистеми | 2711    | 2711    | 2711    |
| Всього по балансу                                  | 8842    | 8561    | 8523    |
| Затрати на компенсацію синхронними двигунами       | 0       | 0       | 0       |
| Затрати на компенсацію БСК                         | 1006,88 | 1035,45 | 1057,76 |
| Сумарні затрати на компенсацію                     | 1006,88 | 1035,45 | 1057,76 |

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



## 5. Трансформаторні підстанції

Правильний вибір потужності, кількості та типу силових трансформаторів на трансформаторних підстанціях (ТП) — це критично важливий етап проектування будь-якої системи електропостачання. Від цього рішення залежить як технічна працездатність мережі, так і її економічна доцільність.

Ось головні аспекти, які визначають важливість правильного вибору трансформаторів:

### 1. Надійність та безперебійність електропостачання

Трансформатор, обраний з урахуванням реального графіка навантажень та необхідної категорії надійності споживачів, гарантує стабільну роботу системи. Занижена потужність призводить до систематичних перевантажень, перегріву ізоляції, прискореного старіння обладнання та підвищеного ризику аварій. Завищена — до неефективного використання ресурсу.

### 2. Оптимальний коефіцієнт завантаження $K_z$

Трансформатори проектуються таким чином, щоб мати максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) при певному завантаженні (зазвичай у межах  $K_z = 0,65 \dots 0,75$ ).

- Як видно з ваших попередніх розрахунків, коефіцієнти завантаження підтримуються саме на рівні 0,68–0,71. Це ідеальний діапазон, який забезпечує найвищу ефективність перетворення енергії.

### 3. Енергозбереження та мінімізація втрат

Трансформатори постійно споживають енергію на створення магнітного поля (втрати холостого ходу, або втрати в сталі) та на нагрівання обмоток струмом (втрати короткого замикання, або втрати в міді).

- Надто потужний трансформатор працюватиме в режимі недовантаження, що призведе до невиправдано високих постійних втрат холостого ходу.

- Слабкий трансформатор матиме величезні змінні втрати в обмотках під час пікових навантажень.

Правильний вибір мінімізує сумарні втрати активної та реактивної потужності.

#### 4. Економічна ефективність

Цей критерій зводиться до пошуку балансу між капітальними інвестиціями (вартість придбання, монтажу трансформатора та супутнього обладнання, як-от БСК) та експлуатаційними витратами (оплата втрат електроенергії протягом усього терміну служби, витрати на обслуговування). Правильний вибір гарантує найменші приведені витрати за період експлуатації.

#### 5. Підтримка якості електроенергії

Правильно підібраний трансформатор має відповідний опір короткого замикання, що дозволяє підтримувати стабільний рівень напруги на клеммах споживачів навіть при значних змінах навантаження. Це критично для нормальної роботи промислового обладнання та побутової техніки.

#### 6. Перспектива розвитку (резервування)

При виборі обов'язково враховується можливість майбутнього зростання навантажень (зазвичай на 5–10 років вперед) та здатність трансформатора витримувати післяаварійні перевантаження, якщо один з трансформаторів двотрансформаторної підстанції вийде з ладу.

Вибір трансформаторів ГПП

$$S_T = \frac{S_{max} K_{1,2}}{K_{ав} (n - 1)} = \frac{0.9 \cdot 18292}{1.4(2 - 1)} = 11759 \text{ кВА}$$

Обираємо для встановлення два трансформатори ТРДН-16000/110.

$$K_3 = \frac{S_{max}}{n \cdot S_{ном}} = \frac{18292}{2 \cdot 16000} = 0.572$$

Вибір цехових ТП здійснюємо у вигляді таблиці

Таблиця 5.1. Вибір цехових трансформаторних підстанцій

| № ТП  | Кі-сть | $S_{роз},$<br>кВА | Марка          | $K_3$ | $S_{ном} >$<br>$> S_p/K1$ | $S_{ном} >$<br>$> S_p/K2$ | Тип КТП   |
|-------|--------|-------------------|----------------|-------|---------------------------|---------------------------|-----------|
| ТП-1  | 2      | 1400,5            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,70  | 1297                      | 1000                      | Вбудована |
| ТП-2  | 1      | 700,2             | ТМ-1000-10/0,4 | 0,70  | 648                       | 500                       | Вбудована |
| ТП-3  | 2      | 1401,9            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,70  | 1298                      | 1001                      | Вбудована |
| ТП-4  | 2      | 1401,9            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,70  | 1298                      | 1001                      | Вбудована |
| ТП-5  | 2      | 1421,5            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,71  | 1316                      | 1015                      | Вбудована |
| ТП-6  | 2      | 1421,5            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,71  | 1316                      | 1015                      | Вбудована |
| ТП-7  | 2      | 1402,9            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,70  | 1299                      | 1002                      | Вбудована |
| ТП-8  | 1      | 701,4             | ТМ-1000-10/0,4 | 0,70  | 650                       | 501                       | Вбудована |
| ТП-9  | 2      | 1400,3            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,70  | 1297                      | 1000                      | Вбудована |
| ТП-10 | 2      | 1355,4            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,68  | 1255                      | 968                       | Вбудована |
| ТП-11 | 2      | 1404,3            | ТМ-1000-10/0,4 | 0,70  | 1300                      | 1003                      | Вбудована |

\*Обрана потужність цехових КТП ще обов’язково має перевірятися щодо їхнього аварійного перевантаження

$$S_{доп} = 1,4 S_{ном} \geq S_{ав} \quad (5.1)$$

## **6. Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання**

### **6.1. Розрахунок струмів коротких замикань**

Розрахунок струмів короткого замикання — це фундаментальний етап проектування та налаштування будь-якої електроенергетичної системи. Він необхідний для запобігання аваріям та забезпечення надійної роботи обладнання в екстремальних умовах.

Процес розрахунку складається з кількох послідовних етапів:

Щоб виконати точні математичні обчислення, фізичну енергосистему потрібно перетворити на абстрактну модель.

- Формування однолінійної розрахункової схеми: Це графічне відображення шляху струму від усіх можливих джерел генерації (генераторів, систем) до ймовірної точки пошкодження. На цій схемі фіксуються всі проміжні елементи: силові трансформатори, повітряні та кабельні лінії, струмообмежувальні реактори тощо.

- Створення схеми заміщення: На цьому етапі реальне обладнання з креслень замінюється його електричними параметрами — активними (резисторами) та реактивними (індуктивностями) опорами.

- Приведення параметрів та еквівалентування: Оскільки в реальній мережі є різні класи напруг, усі опори схеми заміщення приводяться до єдиних базових умов (базової напруги та потужності). Після цього складну розгалужену схему "згортають" за допомогою математичних перетворень (послідовне, паралельне з'єднання, перетворення зірки в трикутник тощо) до найпростішого вигляду: "еквівалентне джерело — еквівалентний опір — точка КЗ".

Під час перехідного процесу короткого замикання струм не є сталим. Для повноцінної оцінки аварії зазвичай визначають два головні параметри:

- Періодична складова струму КЗ (6.1): Це усталене значення змінного струму, яке підтримується джерелами живлення після затухання перехідних процесів. Цей параметр є базовим для розрахунку теплової дії струму на обладнання.

- Ударний струм КЗ (6.2): Це максимально можливе миттєве значення струму, яке виникає приблизно через півперіоду (0,01 с) після початку КЗ. Він враховує як періодичну, так і аперіодичну (затухаючу) складові і необхідний для перевірки обладнання на механічну міцність під дією потужних магнітних полів.

Отримані математичні дані є критично важливими для прийняття проектних та експлуатаційних рішень:

- Вибір та перевірка високовольної й низьковольної апаратури: Вимикачі, роз'єднувачі та трансформатори струму перевіряються на електродинамічну стійкість (здатність витримати ударний струм без руйнування) та термічну стійкість (здатність не розплавитися під час протікання періодичного струму КЗ).

- Підбір провідників: Визначення мінімально допустимого перерізу силових кабелів та голих шин, щоб уникнути їхнього загоряння чи деформації при аварії.

- Налаштування релейного захисту та автоматики (РЗА): Розраховані мінімальні та максимальні струми КЗ дозволяють точно задати уставки спрацьовування реле. Це гарантує, що захист миттєво відключить пошкоджену ділянку, але не буде хибно спрацьовувати при нормальних робочих перевантаженнях.

$$I_{п0} = I'' = \frac{E_{\Sigma}''}{\sqrt{3} \cdot X_{PE3}}, \quad (6.1)$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot \left( 1 + e^{\frac{-0.01}{T_a}} \right), \quad (6.2)$$

де

$$T_a = \frac{x_{pez}}{\omega I'_{pez}}, \quad (6.3)$$

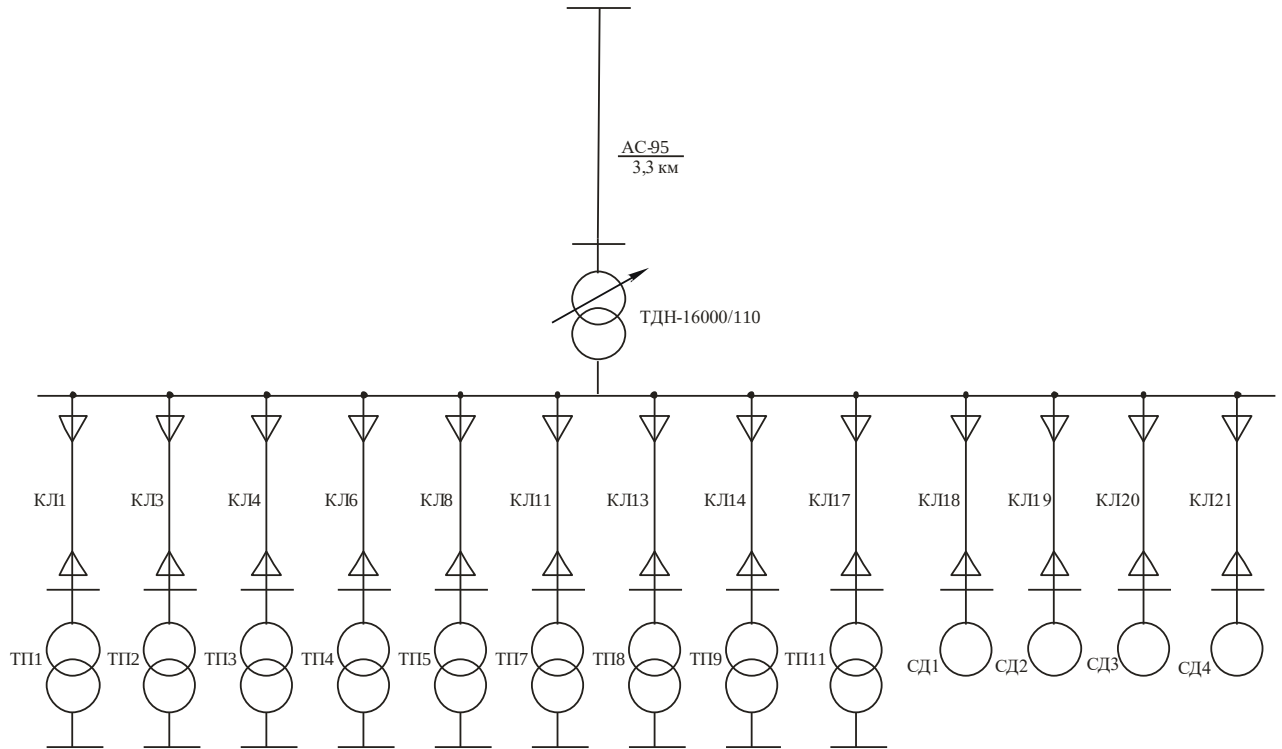


Рис. 6.1. Розрахункова схема для розрахунку струмів к.з.

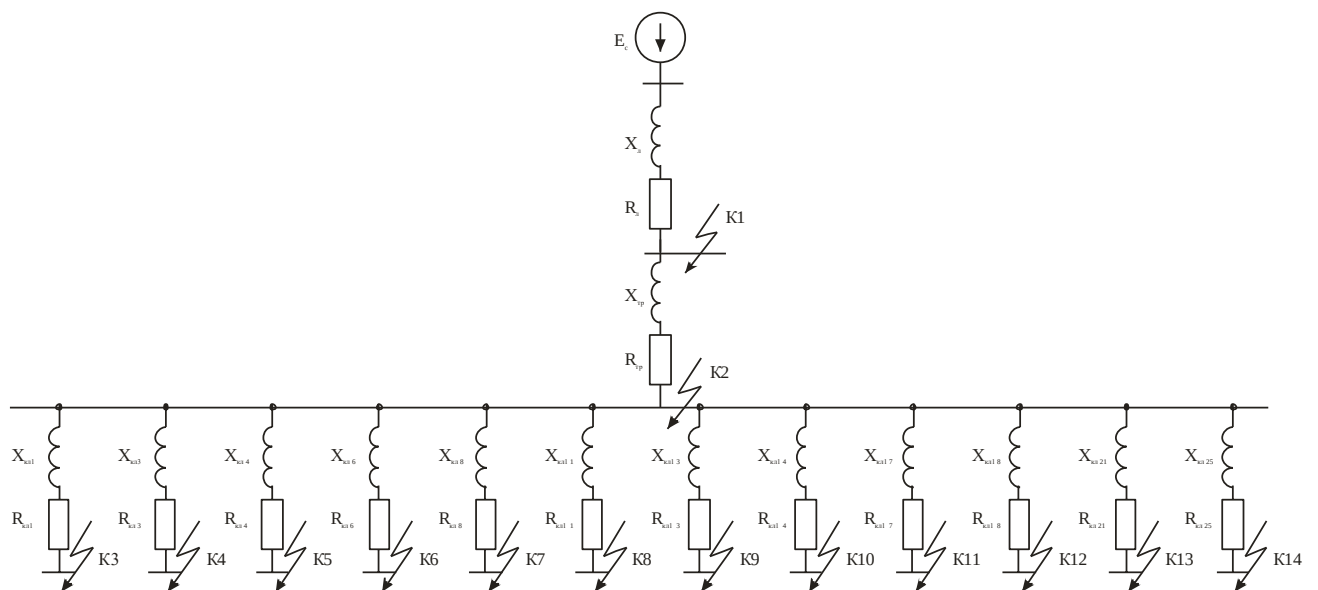


Рис. 6.2. Схема заміщення мережі для розрахунку струмів к.з.

Розрахунок струмів КЗ виконуємо за допомогою програмного забезпечення TKZ-Master. Результати заносимо в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1. Результати розрахунку струмів КЗ

| № т.<br>КЗ | R, Ом | X, Ом | Ik'', кА | Ta, с  | Ky    | iуд, кА |
|------------|-------|-------|----------|--------|-------|---------|
| 1          | 1,527 | 1,291 | 33,543   | 0,0038 | 1,075 | 50,772  |
| 2          | 0,052 | 0,812 | 7,883    | 0,0498 | 1,826 | 20,260  |
| 3          | 0,067 | 0,818 | 7,817    | 0,0389 | 1,781 | 13,853  |
| 4          | 0,067 | 0,818 | 7,817    | 0,0389 | 1,781 | 13,853  |
| 5          | 0,213 | 0,835 | 7,441    | 0,0126 | 1,456 | 10,783  |
| 6          | 0,225 | 0,837 | 7,401    | 0,0120 | 1,437 | 10,586  |
| 7          | 0,113 | 0,821 | 7,743    | 0,0233 | 1,658 | 12,775  |
| 8          | 0,163 | 0,828 | 7,602    | 0,0163 | 1,548 | 11,707  |
| 9          | 0,132 | 0,823 | 7,692    | 0,0201 | 1,614 | 12,354  |
| 10         | 0,149 | 0,826 | 7,643    | 0,0178 | 1,576 | 11,984  |
| 11         | 0,099 | 0,819 | 7,776    | 0,0263 | 1,691 | 13,085  |
| 12         | 0,063 | 0,814 | 7,860    | 0,0411 | 1,792 | 14,014  |
| 13         | 0,061 | 0,813 | 7,865    | 0,0427 | 1,799 | 14,082  |
| 14         | 0,142 | 0,825 | 7,662    | 0,0186 | 1,591 | 12,127  |

## 6.2. Вибір струмопровідних пристроїв силових мереж

Економічно доцільний переріз визначається із співвідношення [10]:

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}} \quad (6.4)$$

де  $j_{ек}=1,4 \text{ А/мм}^2$

Перевірка за умовами:

$$1. I_{роб.форс.} \leq I_{доп} \quad (6.5)$$

$$2. F_{min} \geq \frac{\sqrt{B_k}}{C} \quad (6.6)$$

|  |  |  |  |  |  |      |
|--|--|--|--|--|--|------|
|  |  |  |  |  |  | Арк. |
|  |  |  |  |  |  |      |
|  |  |  |  |  |  |      |

$$C=91A \cdot c^{1/2}/mm^2$$

В якості прикладу розглянемо вибір кабельної лінії до ТП 1.

Розрахункова потужність на ТП1, ТП2:

$$S_p = 2147.78 \text{ кВА}$$

Розрахунковий струм:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{2147.78}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot 10.5} = 39.37 \text{ А}$$

Струм в аварійному режимі:

$$I_{p.ав} = 2 \cdot I_p = 2 \cdot 39.37 = 78.73 \text{ А}$$

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}} = \frac{39.37}{1} = 39.37$$

Термічний імпульс:

$$B_k = I_{КЗ}^2 \cdot (t_{відкл} + T_a) = 7.404^2 \cdot (0.1 + 0.0125) = 6.17 \text{ кА}^2 \cdot c$$

Мінімальний переріз кабелю згідно термічної стійкості:

$$F_{тер} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = \frac{\sqrt{6.17 \cdot 10^6}}{94} = 26.42 \text{ мм}^2$$

Обираємо кабель

$$ААШв - 3 \times (3 \times 50). I_{дон} = 101.2 \text{ А}$$

Перевірка за умовами:

$$I_p = 39.37 < K_n \cdot I_{дон} = 0.92 \cdot 101.2 = 93.104$$

$$I_{p.ав} = 78.73 < K_{ан} \cdot K'_n \cdot I_{дон} = 1.3 \cdot 0.95 \cdot 101.2 = 124.982$$

Аналогічно обираємо інші кабелі. Результати див. таблиця 6.1.

### 6.3. Вибір електрообладнання

Вибір вимикачів (комутаційних апаратів)

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



Вибір комутаційних апаратів здійснюється згідно наступних параметрів:

Напруги 
$$U_{вст} \leq U_{ном} \quad (6.7)$$

Струму 
$$I_{ном} \leq I_{ном}; I_{роб.форс} \leq I_{ном} \quad (6.8)$$

$$I_{п.т} \leq I_{відк.ном} \quad (6.9)$$

Здатності на відключення 
$$i_{а.т} \leq i_{а.ном} = \sqrt{2} * I_{відк.ном} * (1 + \beta_n) \quad (6.10)$$

За ударним струмом 
$$i_y \leq i_{вкл}; I_{п.о.} \leq I_{вкл} \quad (6.11)$$

За термічною стійкістю 
$$B_k \leq I_{тер}^2 t_{тер} \quad (6.12)$$

На стороні 110 кВ ГПП приймаємо до встановлення елегазовий вимикач типу LTB-145D1/B

$$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$$

$$I_{TH} = 20 \text{ кА}$$

$$U_{max.роб} = 125 \text{ кВ}$$

$$I_{дин.ст} = 52 \text{ кА}$$

$$I_{ном} = 3150 \text{ А}$$

$$t_{відкл.вл} = 0.022 \text{ с}$$

$$I_{відкл} = 40 \text{ кА}$$

$$t_{відкл.заг} = 0.04 \text{ с}$$

$$t_{TH} = 3 \text{ с}$$

$$\beta_n = 0.35$$

На ГПП комбінату, приймаємо до встановлення комірки розподільчі КРП типу КУ-10Ц, які комплектуються вакуумними вимикачами ВР-1.

На вводах ЦРП підприємства

Таблиця 6.2. Вибір ввідних вимикачів 10 кВ.

| Параметри мережі | Розрахункові формули                     | Параметри вимикача |
|------------------|------------------------------------------|--------------------|
| 10,5 кВ          | $U_{уст} \leq U_{ном}$                   | 11 кВ              |
| 1307 А           | $I_{роб.форс} \leq I_{ном}$              | 1600,0 А           |
| 7,84 кА          | $I_K \leq I_{динс}$                      | 52,0 кА            |
| 20,16 кА         | $i_y \leq 1,8 \cdot \sqrt{2} * I_{динс}$ | 132,4 кА           |

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

|                                |                                                                                            |                                                         |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 7,84 кА                        | $I_{н\tau} \leq I_{номв\dot{д}кл}$                                                         | 20,0 кА                                                 |
| $\sqrt{2} \cdot 7.84 + 3.3174$ | $\sqrt{2} \cdot I_{ном\tau} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2} \cdot I_{нв\dot{д}кл} (1 + \beta_n)$ | $\sqrt{2} \cdot 20 \cdot (1 + 0.25) = 35.26 \text{ кА}$ |
| 6,74                           | $B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$                                                         | $20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$       |

Таблиця 6.3. Вибір лінійних вимикачів 10 кВ.

| Параметри мережі               | Розрахункові формули                                                                       | Параметри вимикача                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 10,5 кВ                        | $U_{уст} \leq U_{ном}$                                                                     | 11 кВ                                                   |
| 1307 А                         | $I_{роб\text{форс}} \leq I_{ном}$                                                          | 1000,0 А                                                |
| 7,84 кА                        | $I_K \leq I_{динс}$                                                                        | 52,0 кА                                                 |
| 20,16 кА                       | $i_y \leq 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{динс}$                                               | 132,4 кА                                                |
| 7,84 кА                        | $I_{н\tau} \leq I_{номв\dot{д}кл}$                                                         | 20,0 кА                                                 |
| $\sqrt{2} \cdot 7.84 + 3.3174$ | $\sqrt{2} \cdot I_{ном\tau} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2} \cdot I_{нв\dot{д}кл} (1 + \beta_n)$ | $\sqrt{2} \cdot 20 \cdot (1 + 0.25) = 35.26 \text{ кА}$ |
| 5,48                           | $B_k \leq I_{тер}^2 \cdot t_{тер}$                                                         | $20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$       |

### Вибір трансформаторів власних потреб (ТВП)

Безперебійна робота будь-якої підстанції неможлива без надійного живлення системи власних потреб (ВП). Це найважливіша група споживачів на об'єкті, адже відхилення в їхній роботі ставлять під загрозу електропостачання всієї мережі.

Набір споживачів ВП не є універсальним і визначається класом підстанції, типом обладнання, потужністю трансформаторів та використанням синхронних компенсаторів.

Електроенергія на власні потреби витрачається для забезпечення роботи:

- систем примусового охолодження силового обладнання;
- кіл оперативного струму та пристроїв релейного захисту і телемеханіки;

- обігріву приводів високовольних апаратів (вимикачів, роз'єднувачів тощо) і релейних шаф;
- робочого та аварійного освітлення, опалення;
- протипожежних систем.

Розрахункове навантаження для ТВП:

$$S_{розр} = K_C \cdot \sqrt{(P_{встp}^2 + Q_{встp}^2)}, \quad (6.16)$$

$K_C = 0,8$  - коефіцієнт попиту

Умова виборки потужності ТВП:

$$S_{тр} \geq \frac{S_{розр}}{1,4} \quad (6.17)$$

Таблиця 6.4. Вибір трансформатора власних потреб

| №<br>п/п | Споживачі                                                                     | $P_{ном},$<br>кВт | n  | $P_{сум},$<br>кВт | $\cos \varphi$ | $\operatorname{tg} \varphi$ | $P_{уст},$<br>кВт | $Q_{уст},$<br>кВар |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----|-------------------|----------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| 1        | Електродвигуни обдуву трансформаторів номінальною потужністю $S_{ном}=16$ МВА | 6,0               | 2  | 12,0              | 0,80           | 0,75                        | 12,0              | 9,0                |
| 2        | Пристрої підігріву вимикачів 110 кВ                                           | 1,75              | 2  | 3,5               | 0,96           | 0,25                        | 3,3               | 0,88               |
| 3        | Пристрої підігріву комірков КРП (КУ-10Ц)                                      | 1,1               | 30 | 34,1              | 0,96           | 0,25                        | 34,2              | 8,55               |
| 4        | Опалення і освітлення приміщення оперативного персоналу                       | 5,5               | 3  | 16,5              | 0,96           | 0,25                        | 16,5              | 4,14               |
| 5        | Зовнішнє освітлення                                                           | 4,5               | 4  | 18,0              | 0,96           | 0,25                        | 18,0              | 4,51               |
|          | Всього                                                                        |                   |    |                   |                |                             | 85,20             | 27,30              |

Споживачі власних потреб споживають наступну потужність:

$$S_{уст} = \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2} = \sqrt{85.2^2 + 27.3^2} = 89.5 \text{ кВА}$$

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

$$S_p = K_c \cdot S_{\text{уст}} = 0.8 \cdot 89.5 = 71.585 \text{ кВА}$$

Обираємо трансформатор ВП ТМ – 40/10 із наступними параметрами:

$$S_{\text{ном}} = 40 \text{ кВА}, U_{BH} = 10 \text{ кВ}, U_{HH} = 0.4 \text{ кВ}$$

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{71.585}{2 \cdot 40} = 0.895$$

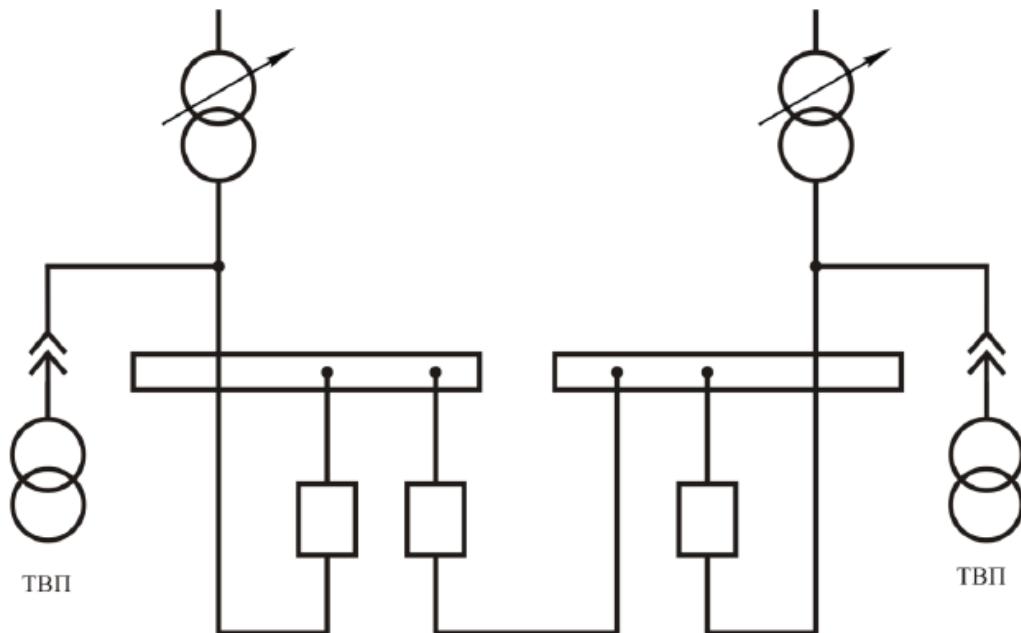


Рис. 6.1. Схема під'єднання ТВП на ГПП підприємства

## **7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ.**

### **МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ**

Гарантування стабільного та безперебійного постачання електроенергії споживачам виступає пріоритетним завданням як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації електричних мереж (ЕМ). Особливої уваги потребують мережі середньої напруги (6–35 кВ), специфіка роботи яких визначається режимом заземлення нейтралі. Вибір оптимального режиму нейтралі є складним комплексним завданням, оскільки від нього залежить поведінка системи при замиканнях на землю. Це питання безпосередньо впливає на надійність електропостачання, координацію ізоляції, величину перенапруг, організацію релейного захисту, а також на безпеку персоналу та роботу апаратури зв'язку.

Загальновідомо, що розподільчі мережі номінальною напругою 6, 10, 20 та 35 кВ функціонують у режимі ізолюваної нейтралі, якщо ємнісні струми замикання на землю не перевищують граничних значень (30, 20, 15 та 10 А відповідно). У випадках, коли ці струми є вищими, застосовується компенсація нейтралі. Кожен із зазначених режимів має свої експлуатаційні особливості.

Ключовою перевагою мереж з ізолюваною нейтраллю є можливість продовження роботи навіть за наявності стійкого однофазного замикання на землю (ОЗЗ), що не призводить до перерви у живленні споживачів. Це зумовлено тим, що ізоляція електроустановок у мережах 6–35 кВ розраховується на лінійну напругу. Хоча це дещо здорожчує обладнання, такі витрати виправдовуються підвищенням надійності, оскільки на ОЗЗ припадає близько 65% усіх пошкоджень ізоляції. Додатковим плюсом є економія на спорудженні заземлювальних пристроїв.

Попри тривалий позитивний досвід використання ізолюваної нейтралі, статистика свідчить про високу аварійність певних видів обладнання в таких

мережах. Головним недоліком є те, що при ОЗЗ відбувається зміщення нейтралі, що викликає підвищення напруги на здорових фазах до лінійних значень. Такі режими створюють передумови для виникнення дугових перенапруг та ферорезонансних процесів (ФРП), які є руйнівними для обладнання. Крім того, тривалий режим "землі" становить загрозу електробезпеці.

Зростання кількості аварій внаслідок ферорезонансу пояснюється збільшенням частки мереж із критичним співвідношенням параметрів. Конструктивні особливості повітряних ліній підвищують ймовірність несиметричних режимів (обриви проводів, неповнофазні режими), які стають каталізаторами розвитку ФРП.

### **7.1. Передумови виникнення ферорезонансних явищ**

Електричні мережі насичені елементами з нелінійною вольт-амперною характеристикою, такими як силові трансформатори та вимірювальні трансформатори напруги (ТН). Динамічна індуктивність їхніх контурів намагнічення  $L_{\mu}$  здатна змінюватися в широкому діапазоні протягом періоду промислової частоти, що призводить до спотворення форми кривої струму. За певних умов це провокує виникнення ферорезонансних перенапруг та надструмів (як на основній частоті, так і на вищих або нижчих гармоніках). Ферорезонанс виникає при послідовному або паралельному сполученні ємності мережі з нелінійною індуктивністю.

Найбільш поширеним сценарієм є виникнення ФРП у контурі, утвореному індуктивностями намагнічення заземлених ТН та ємностями фаз мережі відносно землі. При цьому виникає явище резонансу струмів (паралельний резонанс). У таких режимах магнітопроводи ТН входять у стан глибокого насичення, що спричиняє різке зростання струму в обмотках високої напруги (ВН), який багаторазово перевищує номінальні значення. Часто ці процеси носять характер вільних коливань на частотах, відмінних від промислової.

Ініціаторами ФРП зазвичай виступають комутаційні операції, спрацювання розрядників або короточасні порушення ізоляції. Наслідком найчастіше стає термічне пошкодження обмоток ВН трансформаторів напруги. Особливо важкі умови створюються при дугових замиканнях з перекидною дугою, коли струм в обмотках має імпульсний характер і досягає критичних величин.

## 7.2. Класифікація ферорезонансних процесів у мережах 6–35 кВ

Широке використання електромагнітних ТН із заземленою нейтраллю створює умови для існування тривалих ФРП. Серед різновидів цих процесів найбільш небезпечним та поширеним є субгармонічний резонанс. Його природа полягає у виникненні вільних струмів нульової послідовності після обриву дуги замикання. Ці струми накладаються на робочі струми намагнічення прямої послідовності. Частота вільних коливань  $\beta$  зазвичай становить половину від промислової частоти, тобто близько 25 Гц.

Розглянемо фізику процесу на прикладі спрощеної схеми заміщення ферорезонансного контуру (рис. 7.1), де  $R'$  – активний опір первинної обмотки ТН,  $C$  – ємність мережі,  $r$  – поздовжній опір мережі,  $L_{\text{нам}}$  – нелінійна індуктивність,  $e_A$  – ЕРС джерела.

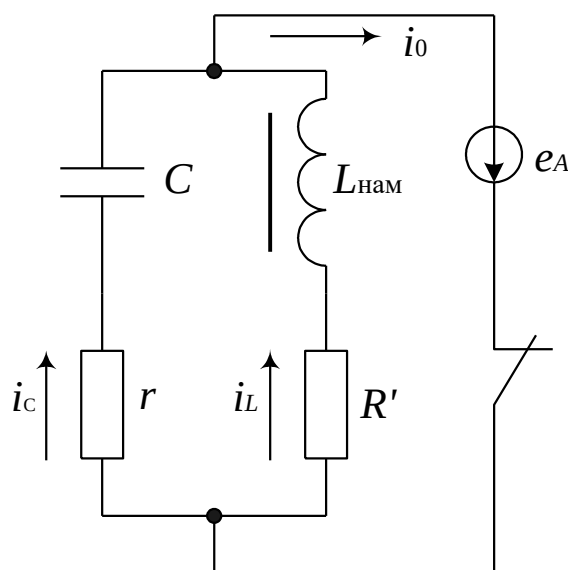


Рис.7.1. Спрощена розрахункова схема нульової послідовності мережі з ТН

При виникненні ОЗЗ у контурі протікає струм нульової послідовності  $i_0$ . Якщо припустити, що ЕРС змінюється за законом  $e_A = E_{Am} \sin(\omega t + \psi)$ , напруга на ємності складатиметься з вимушеної та вільної складових:

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi - 90^\circ) + (U_C(0) - U_{Cm} \sin(\psi - 90^\circ))e^{-\alpha t}, \quad (7.1)$$

а струм у вітці С-г описується виразом:

$$i_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \psi) + \frac{U_C(0) - U_{Cm} \sin(\psi - 90^\circ)}{r} e^{-\alpha t}, \quad (7.2)$$

де  $U_C(0)$  – напруга на ємності в момент запалювання дуги.

Струм у вітці з нелінійною індуктивністю визначається як:

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \psi - \phi_L) + (i_L(0) - I_{Lm} \sin(\psi - \phi_L))e^{-\frac{R'}{L_{\text{іаі}}}t}, \quad (7.3)$$

де  $\phi_L$  – кут зсуву фаз.

Після згасання дуги схема трансформується у послідовний коливальний контур  $C - r - L_{\text{іаі}} - R'$ , позбавлений джерела ЕРС. У ньому протікає вільний струм під дією залишкового заряду на ємності. Цей струм визначається з рівняння:

$$L_{\text{іаі}} \frac{di_{\text{а}}}{dt} + (R' + r)i_{\text{а}} + u_C = 0. \quad (7.4)$$

Напруга на ємності в режимі погаслої дуги:

$$u_C = u_C(t_{\text{іі}^+}) + \frac{1}{C} \int_{t_{\text{іі}^+}}^t i_{\text{а}} dt. \quad (7.5)$$



Струм вільного процесу  $i_{\hat{a}}$  описується рівнянням:

$$i_{\hat{a}} = \frac{U_C(t_{\hat{n}^+})}{\omega_{\hat{a}} L_{\hat{a}i}} e^{-\alpha(t-t_{\hat{n}^+})} \sin(\omega_{\hat{a}}(t-t_{\hat{n}^+})) + I_{\hat{a}}(t_{\hat{n}^+}) e^{-\alpha(t-t_{\hat{n}^+})} \cos(\omega_{\hat{a}}(t-t_{\hat{n}^+})), \quad (7.6)$$

де  $\omega_{\hat{a}}$  – частота вільних коливань.

Внаслідок цього процесу відбувається періодичний перезаряд ємностей мережі через індуктивності ТН. Оскільки частота  $\omega_{\hat{a}}$  менша за робочу частоту мережі, магнітопровід швидко насичується, індукція перевищує 1,5 Тл, а струм намагнічення набуває аварійних значень, що загрожує термічною руйнацією обмоток.

### 7.3. Заходи та технічні засоби для попередження ФРП і захисту ТН

Надійність роботи вимірювальних трансформаторів є критичною для функціонування всієї системи електропостачання. Однак ТН типу ЗНОМ-35, що масово експлуатуються, конструктивно не розраховані на тривалу дію ферорезонансу та дугових замикань. Середня пошкоджуваність таких апаратів становить 5–10% на рік.

Основною причиною виходу з ладу є надструми в обмотках ВН, що призводять до виткових замикань та вигорання. Враховуючи поширеність ОЗЗ, впровадження ефективних методів захисту ТН є нагальною потребою.

#### 7.3.1. Застосування дугогасних реакторів

Традиційним методом захисту від перенапруг у мережах 6–35 кВ є компенсація ємнісних струмів за допомогою дугогасних котушок (ДГК). Це дозволяє зменшити струм у місці пошкодження та знизити швидкість відновлення напруги, сприяючи самопогасанню дуги.

Однак, цей метод має суттєві недоліки:

1. Складність встановлення ДГК у мережах 35 кВ з малою кількістю приєднань (тупикові підстанції), де обрив лінії може призвести до небезпечних зміщень нейтралі.

2. Необхідність точного резонансного налаштування, що важко забезпечити в умовах постійної зміни конфігурації мережі без автоматичних регуляторів.

3. Проблеми з селективністю роботи релейного захисту, оскільки в компенсованих мережах важко визначити пошкоджений фідер.

Нормативні документи вимагають, щоб ступінь несиметрії в таких мережах не перевищувала 0,75% фазної напруги, що на практиці потребує виконання заходів із симетрування ємностей.

### **7.3.2. Резистивне заземлення нейтралі**

Сучасним підходом є заземлення нейтралі через резистор, що дозволяє обмежити перенапруги та покращити роботу релейного захисту. Існує дискусія щодо вибору оптимального опору резистора (високоомне чи низькоомне заземлення).

Експлуатація електричних мереж з повністю ізольованою нейтраллю має суттєвий недолік — високий ризик виникнення небезпечних дугових перенапруг при однофазних замиканнях на землю (ОЗЗ). Фізика цього процесу полягає в тому, що під час переміжного горіння дуги електрична ємність непошкоджених фаз накопичує надлишковий заряд. Через відсутність провідного зв'язку із землею цей заряд не встигає розрядитися до моменту наступного пробоя (запалювання дуги). У результаті напруга на нейтралі та фазах ескалює до критичних значень.

Ефективним інженерним рішенням для демпфування таких перенапруг є заземлення нейтралі через спеціальний високовольтний резистор. Він створює активний шлях для швидкого стікання накопиченого заряду. Щоб уникнути перенапруг, опір резистора розраховується так, аби розряд відбувався менш ніж за півперіоду промислової частоти.

Залежно від величини опору резистора та філософії побудови релейного захисту, цей режим поділяють на два типи:

1. Високоомне резистивне заземлення (HRG)

Якщо опір резистора вибрати виключно з умови компенсації надлишкового заряду (зазвичай активний струм резистора обирають порівнянним з ємнісним струмом мережі,  $I_R > I_C$ ), то загальний струм у місці замикання зросте незначно — орієнтовно в 1,5 раза.

- Перевага: Таке незначне зростання струму дозволяє мережі продовжувати роботу в умовах однофазного замикання протягом певного часу (подібно до мереж з ізольованою нейтраллю або дугогасними реакторами), даючи персоналу можливість знайти та локалізувати пошкодження.

## 2. Низькоомне резистивне заземлення (LRG)

Якщо опір резистора значно зменшити, струм ОЗЗ зростає (наприклад, до значень 30–60 А і вище). Тривала експлуатація мережі в такому режимі категорично заборонена через небезпеку термічного руйнування обладнання в місці пробою.

- Особливості: Така мережа в обов'язковому порядку оснащується швидкодіючим релейним захистом, який працює на негайне відключення пошкодженого фідера. Наявність значної активної складової струму (створеної резистором) робить роботу селективного захисту від замикань на землю максимально простою, чутливою та надійною. Оскільки струм протікає дуже короткий час (до спрацювання вимикача), потужність та габарити такого резистора можна суттєво зменшити, спираючись лише на вимоги короткочасної термічної стійкості.

Хоча ідеї резистивного заземлення відомі електроенергетиці вже тривалий час, сьогодні їхня теорія та практика переживають справжній ренесанс, витісняючи застарілі підходи.

Найдоцільніше використовувати резистивне заземлення у мережах з відносно невеликими ємнісними струмами, де встановлення дорогих дугогасних реакторів (котушок Петерсена) є економічно або технічно невиправданим. До таких об'єктів належать:

- Мережі власних потреб електростанцій (6–10 кВ);

- Розподільні мережі живлення пересувних екскаваторів та механізмів на відкритих гірничих розробках (кар'єрах);
- Повітряні та змішані розподільні мережі 6–35 кВ.

Підключення резистора здійснюється безпосередньо до виведеної нульової точки силового трансформатора (якщо обмотки з'єднані в «зірку»). Якщо ж мережа живиться від трансформатора зі з'єднанням обмоток у «трикутник», де фізично немає нейтралі, використовують спеціальні нейтралеутворювальні трансформатори (фільтри нульової послідовності) зі схемою з'єднання «зірка-трикутник», до нейтралі яких і підключають резистор.

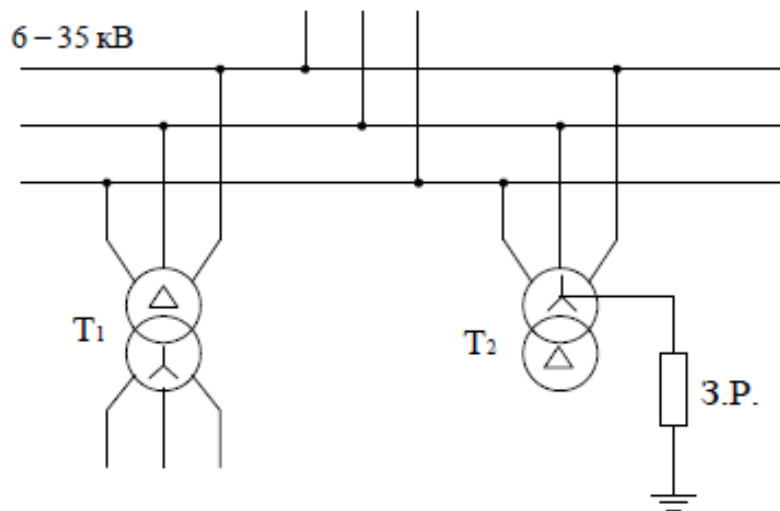


Рис. 7.2. Схема електричної мережі з омичним заземленням нейтралі

Для обмеження струмів у ТН типу ЗНОМ-35 до безпечного рівня пропонується використовувати високоомні резистори  $R_N = 10 \div 30$  кОм. Їх вибір часто базується на співвідношенні:

$$R_N \approx \frac{U_{\phi}}{I_C}, \quad (7.7)$$

де  $I_C$  – ємнісний струм замикання.

Альтернативний підхід [19] пропонує обирати резистор, виходячи з умови рівності активної та ємнісної складових провідності:

$$R_N \leq \frac{1}{3\omega C}. \quad (7.8)$$

Оскільки ємнісний струм  $I_C = 3\omega C U_{\delta}$ , а струм через резистор  $I_R = \frac{U_{\delta}}{R_N}$ , то за умови  $I_R \geq I_C$  отримуємо:

$$R_N \leq \frac{U_{\delta}}{3\omega C U_{\delta}} = \frac{1}{3\omega C}. \quad (7.9)$$

Такий резистор забезпечує стікання залишкового заряду за час півперіоду промислової частоти. Якщо прийняти сталу часу розряду  $\tau = 3R_N C$  і час розряду  $t = 0,01$  с, отримаємо аналогічний вираз:

$$R_N = \frac{t}{3C}. \quad (7.10)$$

Застосування високоомного резистора обмежує перенапруги до рівня  $(2,2 \div 2,4)U_{\delta}$  та усуває умови для виникнення стійкого ферорезонансу.

Низькоомне заземлення (опір 100–500 Ом) застосовується там, де необхідна висока чутливість захистів (наприклад, мережі власних потреб станцій), але воно вимагає швидкого вимкнення пошкодженої ділянки.

Також розглядаються схеми динамічного заземлення нейтралі, де резистор підключається через тиристорний комутатор лише в момент аварії. Опір у такому випадку розраховується з умов аперіодичного розряду:

$$R \leq 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (7.11)$$

або

$$R \leq \frac{t}{C \ln \left( \frac{U_{\text{нз}}}{U_{\text{зв}}} \right)}, \quad (7.13)$$

де  $L$  – індуктивність трансформатора.

### 7.3.3. Пристрої захисту безпосередньо на ТН

Найпростішим методом боротьби з ФРП є ввімкнення резистора у вторинну обмотку "розімкнений трикутник".

- Резистор опором 25 Ом: Практика показала його низьку ефективність для гасіння субгармонічних коливань (25 Гц), оскільки потужність розсіювання є недостатньою. Він ефективний лише проти резонансу на промисловій частоті (50 Гц).
- Резистор опором 5 Ом: Значно ефективніший, але може призвести до перегріву при тривалих ОЗЗ. Тому його підключають через автоматику, яка спрацьовує лише при появі напруги певної частоти та амплітуди.

Існують також складніші пропозиції, такі як ввімкнення резисторів або LC-фільтрів у коло первинної обмотки ТН, або використання схем дешунтування. Проте вони мають суттєві недоліки: зниження класу точності ТН, необхідність високовольного виконання елементів та зниження загальної надійності вузла. Тому такі рішення не набули широкого поширення.

### 7.3.4. Антирезонансні трансформатори типу НАМИ

Як кардинальне вирішення проблеми рекомендується заміна застарілих ТН на антирезонансні трансформатори типу НАМИ-35. Їхня конструкція (рис. 7.2) принципово відрізняється від традиційної.

У баці НАМИ-35 розміщено два трансформатори: трифазний (з'єднаний у зірку без заземлення нейтралі) та додатковий однофазний (ДТ),

увімкнений між нейтраллю трифазного ТН і землею. Саме ДТ вимірює напругу нульової послідовності.

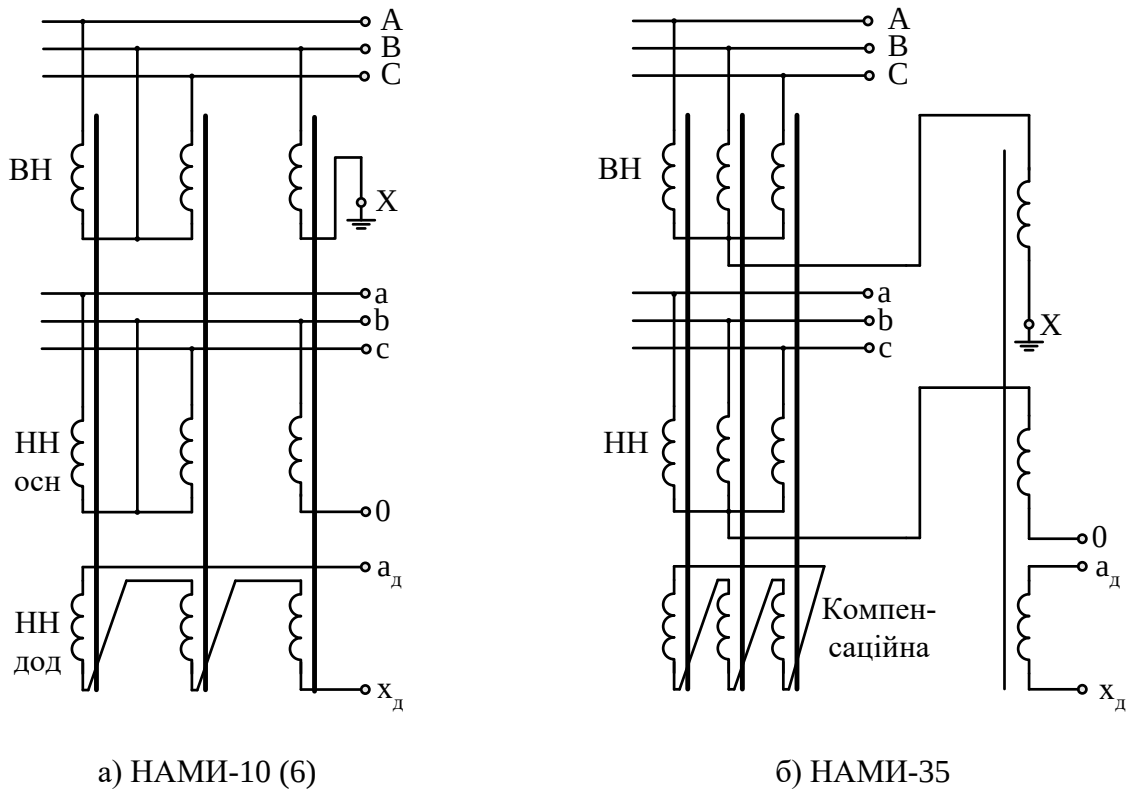


Рис. 7.3. Принципові схеми з’єднань ТН типу НАМИ

Порівняльні характеристики наведено в таблиці 7.1:

Таблица 7.1

| Параметри                                          | НАМИ-35        | 3×3НОМ-35      |
|----------------------------------------------------|----------------|----------------|
| <b>Номинальна напруга обмоток, кВ:</b>             |                |                |
| Первинна                                           | $35/\sqrt{3}$  | $35/\sqrt{3}$  |
| Вторинна основна                                   | $0,1/\sqrt{3}$ | $0,1/\sqrt{3}$ |
| Вторинна додаткова                                 | 0,1/3          | 0,1/3          |
| <b>Номинальна потужність ВА, в класі точності:</b> |                |                |
| 0,5                                                | 360            | 450            |
| 1,0                                                | 500            | 750            |
| 3,0                                                | 1200           | 1800           |

Трансформатори НАМИ-35 заявлені як такі, що не вступають у резонанс із ємністю мережі та витримують тривалі дугові замикання. Однак досвід експлуатації свідчить, що навіть вони не є абсолютно надійними. Зафіксовано випадки пошкодження високовольної обмотки (переважно фази «В»), що вказує на необхідність подальших досліджень перехідних процесів у мережах, обладнаних такими трансформаторами.

## **Висновки до розділу 7**

1. Проаналізовано особливості експлуатації електричних мереж напругою 6–35 кВ та встановлено, що режим ізольованої нейтралі, забезпечуючи безперебійність електропостачання при однофазних замиканнях на землю, створює передумови для виникнення небезпечних перенапруг та ферорезонансних процесів. Статистика пошкоджень свідчить, що найбільш вразливим елементом у таких режимах є електромагнітні трансформатори напруги контролю ізоляції (типу ЗНОМ-35), які зазнають термічного руйнування обмоток внаслідок протікання надструмів намагнічення.

2. Визначено механізм виникнення та перебігу ферорезонансних явищ. Найбільшу небезпеку становить субгармонічний резонанс на частоті 25 Гц, який виникає в контурі нульової послідовності після обриву дуги. Показано, що вільні коливання в контурі «ємність мережі – нелінійна індуктивність ТН» призводять до глибокого насичення магнітопроводу та різкого зростання струмів, що перевищують номінальні значення у десятки разів.

3. Виконано оцінку ефективності традиційних методів захисту від перенапруг. Встановлено, що компенсація ємнісних струмів за допомогою дугогасних реакторів, хоч і сприяє гасінню дуги, має суттєві обмеження для мереж 35 кВ через складність налаштування в резонанс, ризик зміщення



нейтралі при неповнофазних режимах та ускладнення роботи релейного захисту.

4. Обґрунтовано доцільність застосування резистивного заземлення нейтралі як ефективного засобу обмеження перенапруг та запобігання ферорезонансу. Доведено, що використання високоомного резистора, обраного з умови  $R_N \leq 1/(3\omega C)$ , забезпечує аперіодичний розряд ємності мережі, обмежує перенапруги до рівня  $(2,2-2,4)U_f$  та усуває умови для виникнення стійких ферорезонансних коливань.

5. Критично проаналізовано методи індивідуального захисту ТН. Виявлено, що пасивні методи, такі як увімкнення резистора 25 Ом у розімкнений трикутник, є неефективними для гасіння субгармонічних коливань. Використання резисторів меншого опору (5 Ом) потребує складних схем автоматичного керування для запобігання перегріву, а встановлення захисних елементів у первинних колах знижує клас точності та надійність вимірювального вузла.

6. Розглянуто ефективність застосування антирезонансних трансформаторів типу НАМИ-35. Попри вдосконалену конструкцію, що передбачає розділення кіл вимірювання лінійних та фазних напруг, досвід експлуатації свідчить про наявність випадків їх пошкодження (зокрема фази «В»). Це вказує на те, що проблема захисту від ферорезонансних процесів у мережах 35 кВ потребує комплексного підходу та подальших досліджень перехідних режимів.

## ВИСНОВКИ

За результатами проектування системи електропостачання целюлозно-паперового комбінату було сформовано наступні концептуальні висновки, що відображають стратегічний підхід до енергетики підприємства:

- Техніко-економічний аналіз (порівняння варіантів 110 кВ та 10 кВ) виявив парадоксальну, на перший погляд, але економічно виправдану істину: для даної конфігурації мережі та відстані (3,3 км) відмова від проміжної трансформації (110/10 кВ) на користь прямого кабельного вводу 10 кВ є стратегічно вірною. Це рішення дозволило скоротити капітальні інвестиції більш ніж удвічі та уникнути значних постійних втрат холостого ходу потужних трансформаторів, знизивши приведені витрати з 40,9 млн грн до 10,6 млн грн.

- Побудова картограми навантажень довела, що енергетичне серце комбінату знаходиться в зоні основних технологічних ліній (виробництво картону та офсетного паперу). Розміщення розподільчих потужностей саме в цій точці дозволяє мінімізувати довжину важких фідерних ліній, знижуючи втрати на транспортування енергії всередині заводу — це приклад того, як геометрія працює на економіку.

- Компенсація реактивної потужності (потреба у якій склала понад 10 МВАр) була вирішена не просто як виконання нормативів, а як спосіб розвантаження силових трансформаторів. Це створює "прихований резерв" потужності, що дозволить підприємству нарощувати виробництво (наприклад, встановити додаткову папероробну машину) без заміни дороговартісних трансформаторів підстанцій.

- У спеціальному розділі було переосмислено підхід до експлуатації мереж 6-35 кВ. Доведено, що традиційна "ізольована нейтраль" в сучасних умовах є джерелом підвищеної аварійності для вимірювальних трансформаторів через ризик ферорезонансу. Запропоновані рішення (зокрема резистивне заземлення або спеціальні демпфуючі заходи) змінюють

парадигму з пасивного спостереження за аварією на активне запобігання їй, захищаючи "очі та вуха" енергосистеми — трансформатори напруги.

Цей проєкт демонструє, що сучасна енергетика паперового виробництва — це баланс між потужністю важкої індустрії та інтелектуальними рішеннями захисту та оптимізації.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П.Г., Зінзура В.В., Гарасьова Н.Ю., Котиш А.І., Величко Т.В.]; – М.-во освіти і науки України, Центральноукр. Нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ПП «Ексклюзив –Систем», 2021. – 209 с.
2. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник –Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010. – 408 с.
3. Шкрабець Ф.П. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П. Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
4. Мілих В.І. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків: ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
5. Плешков П.Г., Орлович А.Ю., Котиш А.І. Електропостачання промислових підприємств: Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування. - Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2007. – 386 с.
6. Надійність електроенергетичних систем: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.В. Казанський. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 67 с.
7. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / Орлович А.Ю., Плешков П.Г., Козловський О.А., Співак О.В., Котиш А.І., Величко Т.В. Навчальний посібник. Видавець Лисенко В.Ф., м.Кропивницький, 2020р. – 272 с.
8. Черемісін М. М., Мороз О. М., Єгоров О. Б., Швець С. В. Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець. — Харків: ТОВ "В справі", 2016. — 260 с.
9. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с.
10. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.

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

11. Воробієнко П.П., Нікітюк Л.А., Резніченко П.І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підручник. К.: САММІТ-Книга, 2010. 708 с.

12. Котиш А.І. До питання пошкодження трансформаторів напруги контролю ізоляції в сільських розподільних мережах // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету/ техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація./- Вип.6.-Кіровоград: КДТУ, 2000.-С.139-141.

13. Саєнко Ю.Л. Ефективність застосування антирезонансних трансформаторів напруги контролю ізоляції в мережах з ізольованою нейтраллю / Ю.Л. Саєнко, А.С. Попов // Електрифікація транспорту – 2012. – № 4. – С. 38-43.

14. Саєнко Ю.Л. Пошкодження вимірювальних трансформаторів напруги в електромережах з малими струмами замикання на землю / Ю.Л. Саєнко, А.С. Попов // Вісник Харківського нац. техн. ун-ту сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. – Харків: ХНТУСГ. – 2011. – Випуск 116. – С. 106 – 107.

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