**Міністерство освіти і науки України**
**Український державний університет науки і технологій**

Управління енергетичними та економічними процесами
(назва факультету)

Інтелектуальні системи енергопостачання
(повна назва кафедри)

# Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
бакалавра
(ступінь вищої освіти)

на тему: Розрахунок системи електропостачання для частини енергетичної системи між підстанціями Д-Є 110 кВ. Акумуляторні батареї
за освітньою програмою Електротехнічні системи електроспоживання
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи ЕС21-1:

(підпис студента) / Дмитро ПРИХОДЬКО /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: (підпис) / доцент Тетяна ДРУБЕЦЬКА /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер: (підпис) / доцент Ірина ПОТАПЧУК /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (підпис)

Дніпро – 2025 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine**
**Ukrainian State University of Science and Technologies**

Energy and economic process management
(faculty)

Intellectual power supply systems
(department)

# Explanatory Note
to Master's Thesis
of Bachelor
(higher education degree)

on the topic: Calculation of the power supply system for the part of the power system between the 110 kV D-E substations. Batteries

according to educational curriculum Electrotechnical systems of electricity consumption

in the Speciality: 141 Electrotechnical systems of electricity consumption electromechanics
(speciality and its code )

Done by the student of the group EC2111: / Dmytro PRYKHODKO /
(name, surname)

Scientific Supervisor: / Ass. Prof. Tatiana DRUBETSKA /
(position, name, surname)

Normative controller: / Ass. Prof. Iryna POTAPCHUK /
(position, name, surname)

Dnipro – 2025

**Міністерство освіти і науки України**

**Український державний університет науки і технологій**

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання
Рівень вищої освіти: Бакалавр
Освітня програма: Електротехнічні системи електроспоживання
Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(ШИФР ТА НАЗВА)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІСЕ
_____ Дмитро БОСИЙ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу бакалавра
(ступінь вищої освіти)

студенту Приходьку Дмитру Денисовичу
**(Прізвище, Ім'я По батькові)**

1.Тема роботи: Розрахунок системи електропостачання для частини енергетичної системи між підстанціями Д-Є 110 кВ. Акумуляторні батареї

Керівник роботи: Друбецька Тетяна Ігорівна, к.т.н., доцент
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від 03.03.2025 р. № 328ст

2. Строк подання студентом роботи: 12.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: вихідні дані до кваліфікаційної роботи відповідно до варіанту, дані відкритих джерел інформації

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Тягове електропостачання: розрахунок навантажень на систему тягового електропостачання, вибір контактної мережі, механічний розрахунок контактної підвіски

4.2 Електричні підстанції та станції: вибір основного обладнання тягової підстанції, розрахунки струмів короткого замикання, проектування сонячної електростанції

4.3 Електромережі та релейний захист: розрахунок кабельної лінії електропересилання, вибір параметрів релейного захисту кабельної лінії

4.4 Індивідуальне завдання: Акумуляторні батареї

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): графіки струмів поїздів на ділянці, графіку руху поїздів, графіки

струмів фідерів тягових підстанцій, монтажні криві для контактної підвіски, однолінійна розрахункова схема тягових підстанцій, схеми заміщення при розрахунку струмів к.з., звіт проекту сонячної електростанції з програми PVsyst

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Тягове електропостачання | 11.03.2025 | |
| 2 | Електричні підстанції та станції | 18.04.2025 | |
| 3 | Електромережі та релейний захист | 16.04.2025 | |
| 4 | Індивідуальне завдання | 23.05.2025 | |
| 5 | Подання кваліфікаційної роботи до кафедри | 12.06.2025 | |
| 6 | Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії | 24.06.2025 | |

Студент _____ Дмитро ПРИХОДЬКО
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи _____ Тетяна ДРУБЕЦЬКА
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти Приходько Д. Д. на тему:

«Розрахунок системи електропостачання для частини енергетичної системи між підстанціями Д-Є 110 кВ. Акумуляторні батареї»

| Складова кваліфікаційної роботи | Кількість | Обсяг |
|---|---|---|
| Пояснювальна записка | 1 | 96 стор. |
| Демонстраційний матеріал | 1 | 18 слайдів |

Керівник: _____ / Тетяна ДРУБЕЦЬКА /

Нормоконтролер: _____ / Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ: _____ / Дмитро БОСИЙ /

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра містить: 96 с., 27 рис., 41 табл., 14 джерел.

Об’єкт розробки – частина енергетичної системи між підстанціями Д-Є 110 кВ.

Мета роботи – розрахунок системи електропостачання між підстанціями Д-Є 110 кВ.

Методи дослідження. Вирішення поставлених завдань здійснювалося з використанням теоретичних матеріалів у даній галузі, методів математичного програмування та програмного комплексу PVsyst.

Для досягнення даної мети виконано розрахунок навантажень на систему тягового електропостачання, вибір контактної мережі, проведено механічний розрахунок контактної підвіски, розрахунок струмів короткого замикання та вибір основного обладнання тягової підстанції, виконано проектування сонячної електростанції, розрахунок кабельної лінії електропересилання та вибір параметрів релейного захисту кабельної лінії.

Результатами роботи являються визначені значення струмів фідерів та підстанцій, струмів короткого замикання на всіх приєднаннях, вибір трансформаторів, вимикачів та роз’єднувачів, визначення обладнання для сонячних станцій. Дані результати можуть стати основою для розробки системи електропостачання між підстанціями Д-Є.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ТЯГОВА МЕРЕЖА, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ІНВЕРТОР, РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ.

**ЗМІСТ**

ВСТУП ……9
1. ТЯГОВЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ……..10
1.1 Струморозподіл у тяговій мережі……...10
1.1.1 Навантаження тягових підстанцій……....10
1.1.2 Струм фази трансформатора підстанції змінного струму……17
1.1.3 Переріз контактної мережі……....20
1.1.4 Визначення питомих річних втрат електроенергії……...21
1.1.5 Перевірка контактної підвіски за нагрівом……..…25
1.2 Механічний розрахунок анкерної ділянки ……26
2. ЕЛЕКТРИЧНІ ПІДСТАНЦІЇ ТА СТАНЦІЇ ……...33
2.1 Розрахунок потужності трансформаторів…….…..33
2.2 Розрахунок струмів к.з…….….36
2.3 Розрахунок максимальних робочих струмів приєднань…….…...47
2.4 Вибір електричних апаратів вище 1000 В……..….48
2.5 Проектування сонячної електростанції……...50
3. ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ТА РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ……...…….59
3.1 Розрахунок кабельної лінії електропересилання……59
3.2 Вибір параметрів релейного захисту кабельної лінії…….67
4. ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
Акумуляторні батареї ….…..76
4.1 Призначення та основні типи ……..…76
4.2 Особливості свинцево-кислотних акумуляторних батарей ……77
4.2.1 Загальна характеристика акумуляторної батареї тягових підстанцій..79

4.2.2 Типи акумуляторних батарей, застосовуваних на тягових підстанціях……..……..……81
4.3 Нікель-кадмінієві акумуляторні батареї……..……86
4.4 Особливості літій-іонних акумуляторних батарей……..…88
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ…….94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ…….95

# ВСТУП

Сукупність електротехнічних пристроїв від генераторів електростанцій до тягової мережі складає систему електропостачання електрифікованих залізниць. Системи тягового електропостачання корінним чином відрізняються від систем електропостачання промислових підприємств, що зумовлено навантаженнями, які змінюються в координатах часу та простору.

Основне призначення системи тягового електропостачання полягає в забезпеченні експлуатаційної роботи електрифікованих залізниць. Для цього необхідно, щоб загальна потужність всіх елементів системи була достатньою для забезпечення кожному електровозу необхідної потужності в різноманітних умовах роботи залізничного транспорту. Розв’язання поставленої задачі можливе лише за умови правильного вибору параметрів системи електропостачання, тобто забезпечення роботи обладнання в допустимих для нього межах по навантаженню та дотримання необхідної якості електроенергії.

Метою даної роботи є придбання та закріплення навичок вибору параметрів та визначення показників роботи системи тягового електропостачання, виконання проектних розрахунків для ділянки електрифікованої залізниці змінного струму.

# 1 ТЯГОВЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

## 1.1 Струморозподіл у тяговій мережі

Струмові навантаження поїздів та графік руху представлені відповідно на рис.1.1 та рис. 1.2.

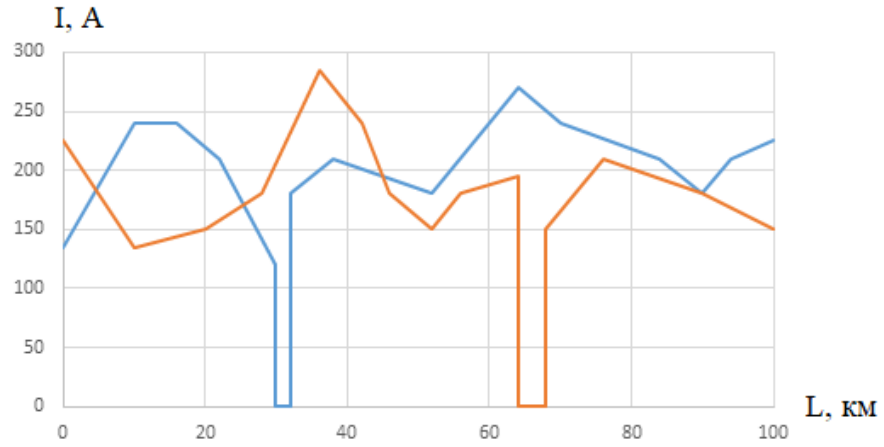



Рисунок 1.1 – Струмові навантаження поїздів на ділянці

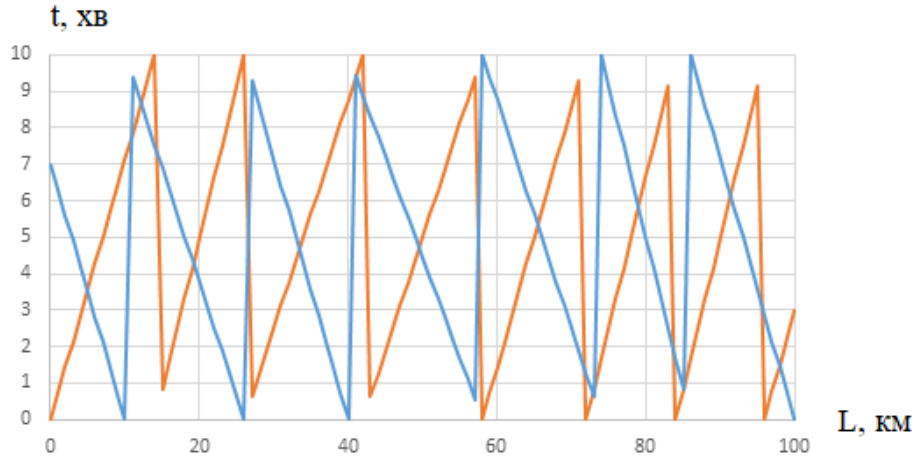



Рисунок 1.2 – Графіки руху поїздів

### 1.1.1 Навантаження тягових підстанцій

Відповідно до струмових навантажень поїздів та графіку руху визначаємо середній струм фідера за час руху поїзда розрахунковою міжпідстанційною зоною (МПЗ):

$$I_1 = 173{,}7\ \text{А},\quad I_2 = 201{,}4\ \text{А},\quad I_3 = 88{,}5\ \text{А},\ I_4 = 69{,}9\ \text{А}.$$

Ефективний струм фідера за час руху розрахункового поїзда по МПЗ:

$$I_{e1} = 206{,}3\ \text{А},\quad I_{e2} = 224{,}7\ \text{А},\quad I_{e3} = 103{,}9\ \text{А},\ I_{e4} = 87{,}9\ \text{А}.$$

Струми фідерів підстанції визначаються для двох режимів навантаження:

1) режиму середніх розмірів руху поїздів ( $N = N_{сер}$);

2) режиму згущення поїздів ( $N = N_{зг} = 0{,}9N_0$);

3) режиму максимальних розмірів руху ($N = N_0$).

Середній струм фідера підстанції визначається за формулою:

$$I_{ф} = \frac{n_0 \cdot N}{N_0} \cdot I\ , \tag{1.1}$$

де $n_0$ – максимальна кількість поїздів, які одночасно знаходяться на даній МПЗ.

У свою чергу:

$$n_0 = \frac{t}{J}, \tag{1.2}$$

де $J$ – мінімальний міжпоїзний інтервал, хв;

$N$ – добова кількість поїздів на ділянці, пар;

$N_0$ – максимальна пропускна спроможність ділянки, пар:

$$N_0 = \frac{T}{J}, \tag{1.3}$$

де $T$ – розрахунковий період, що дорівнює кількості хвилин у добі, хв.

Підставляючи значення у формули (1.2) та (1.3) отримаємо:

$$N_0 = \frac{24 \cdot 60}{10} = 144 \text{ пар};$$

$$n_{01} = \frac{34,3}{10} = 3,43 \text{ пар};$$

$$n_{02} = \frac{24}{10} = 2,4 \text{ пар};$$

$$n_{03} = \frac{31,3}{10} = 3,13 \text{ пар};$$

$$n_{04} = \frac{22}{10} = 2,2 \text{ пар}.$$

Ефективний струм фідера підстанції визначається в залежності від схеми живлення:

1) для консольного живлення:

$$I_{фе}^2 = \frac{n_0 \cdot N}{N_0} \cdot I_e^2 + \frac{n_0(n_0 - 1) \cdot N^2}{N_0^2} \cdot I^2; \quad (1.4)$$

2) для двостороннього живлення:

$$I_{фе}^2 = \frac{4 \cdot n_0 \cdot N}{3N_0} \cdot I_e^2 + \frac{n_0\left(n_0 - \frac{4}{3}\right) \cdot N^2}{N_0^2} \cdot I^2. \quad (1.5)$$

Підставляючи значення у формули (1.1), (1.4) та (1.5) отримаємо струми для різних режимів.

Режим середніх розмірів руху поїздів:

$$I_{ф1} = \frac{3{,}43 \cdot 75 \cdot 173{,}7}{144} = 310{,}3 \text{ А};$$

$$I_{ф2} = \frac{2{,}4 \cdot 75 \cdot 201{,}4}{144} = 251{,}8 \text{ А};$$

$$I_{ф3} = \frac{3{,}13 \cdot 75 \cdot 88{,}5}{144} = 144{,}3 \text{ А};$$

$$I_{ф4} = \frac{2{,}2 \cdot 75 \cdot 69{,}9}{144} = 80{,}1 \text{ А};$$

$$I_{еф1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}43 \cdot 75}{3 \cdot 144} \cdot 206{,}3^2 + \frac{3{,}43 \cdot \left(3{,}43 - \frac{4}{3}\right) \cdot 75^2}{144^2} \cdot 173{,}7^2} = 400{,}3 \text{ А};$$

$$I_{еф2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}4 \cdot 75}{3 \cdot 144} \cdot 224{,}7^2 + \frac{2{,}4 \cdot \left(2{,}4 - \frac{4}{3}\right) \cdot 75^2}{144^2} \cdot 201{,}4^2} = 335{,}1 \text{ А};$$

$$I_{еф3} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}13 \cdot 75}{3 \cdot 144} \cdot 103{,}9^2 + \frac{3{,}13 \cdot \left(3{,}13 - \frac{4}{3}\right) \cdot 75^2}{144^2} \cdot 88{,}5^2} = 188{,}2 \text{ А};$$

$$I_{еф4} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}2 \cdot 75}{3 \cdot 144} \cdot 87{,}9^2 + \frac{2{,}2 \cdot \left(2{,}2 - \frac{4}{3}\right) \cdot 75^2}{144^2} \cdot 69{,}9^2} = 119{,}7 \text{ А}.$$

Режим згущення поїздів:

$$I_{ф1} = \frac{3{,}43 \cdot 130 \cdot 173{,}7}{144} = 537{,}9 \text{ А};$$

$$I_{ф2} = \frac{2{,}4 \cdot 130 \cdot 173{,}7}{144} = 436{,}4 \text{ А};$$

$$I_{ф3} = \frac{3{,}13 \cdot 130 \cdot 88{,}5}{144} = 250{,}1 \text{ А};$$

$$I_{ф4} = \frac{2{,}2 \cdot 130 \cdot 69{,}9}{144} = 138{,}8 \text{ А};$$

$$I_{еф1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}43 \cdot 130}{3 \cdot 144} \cdot 206{,}3^2 + \frac{3{,}43 \cdot \left(3{,}43 - \frac{4}{3}\right) \cdot 130^2}{144^2} \cdot 173{,}7^2} = 593{,}8 \text{ А};$$

$$I_{еф2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}4 \cdot 130}{3 \cdot 144} \cdot 224{,}7^2 + \frac{2{,}4 \cdot \left(2{,}4 - \frac{4}{3}\right) \cdot 130^2}{144^2} \cdot 201{,}4^2} = 480{,}1 \text{ А};$$

$$I_{еф3} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}13 \cdot 130}{3 \cdot 144} \cdot 103{,}9^2 + \frac{3{,}13 \cdot \left(3{,}13 - \frac{4}{3}\right) \cdot 130^2}{144^2} \cdot 88{,}5^2} = 276{,}7 \text{ А};$$

$$I_{еф4} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}2 \cdot 130}{3 \cdot 144} \cdot 87{,}9^2 + \frac{2{,}2 \cdot \left(2{,}2 - \frac{4}{3}\right) \cdot 130^2}{144^2} \cdot 69{,}9^2} = 167{,}5 \text{ А}.$$

Режим максимальних розмірів руху:

$$I_{ф1} = \frac{3{,}43 \cdot 144 \cdot 173{,}7}{144} = 595{,}8 \text{ А};$$

$$I_{ф2} = \frac{2,4 \cdot 144 \cdot 173,7}{144} = 483,4 \text{ А};$$

$$I_{ф3} = \frac{3,13 \cdot 144 \cdot 88,5}{144} = 277 \text{ А};$$

$$I_{ф4} = \frac{2,2 \cdot 144 \cdot 69,9}{144} = 153,8 \text{ А};$$

$$I_{еф1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,43 \cdot 144}{3 \cdot 144} \cdot 206,3^2 + \frac{3,43 \cdot \left(3,43 - \frac{4}{3}\right) \cdot 144^2}{144^2} \cdot 173,7^2} = 641,6 \text{ А};$$

$$I_{еф2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,4 \cdot 144}{3 \cdot 144} \cdot 224,7^2 + \frac{2,4 \cdot \left(2,4 - \frac{4}{3}\right) \cdot 144^2}{144^2} \cdot 201,4^2} = 515,2 \text{ А};$$

$$I_{еф3} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,13 \cdot 144}{3 \cdot 144} \cdot 103,9^2 + \frac{3,13 \cdot \left(3,13 - \frac{4}{3}\right) \cdot 144^2}{144^2} \cdot 88,5^2} = 298,5 \text{ А};$$

$$I_{еф4} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,2 \cdot 144}{3 \cdot 144} \cdot 87,9^2 + \frac{2,2 \cdot \left(2,2 - \frac{4}{3}\right) \cdot 144^2}{144^2} \cdot 69,9^2} = 178,8 \text{ А}.$$

Середній струм кожного плеча живлення визначається як сума струмів відповідних фідерів підстанції, тобто:

$$I_{пл} = \sum_{i}^{v} I_{фi}, \qquad (1.6)$$

де $v$ – кількість фідерів даного плеча живлення, шт.

Ефективний струм плеча живлення визначається за формулою:

$$I_{пле}^2 = \left( \sum_1^v I_{фі} \right)^2 + \sum_1^v I_{феі}^2 - \sum_1^v I_{фі}^2 . \quad (1.7)$$

Підставляючи значення у формули (1.6) та (1.7) отримаємо необхідні струми для різних режимів.

Режим середніх розмірів руху поїздів:

$$I_{лів} = 310,3 + 251,8 = 562,1 \text{ А};$$

$$I_{пр} = 144,3 + 80,1 = 224,4 \text{ А};$$

$$I_{елів} = \sqrt{562,1^2 + \left(400,3^2 + 335,1^2\right) - \left(310,3^2 + 251,8^2\right)} = 654,8 \text{ А};$$

$$I_{епр} = \sqrt{224,4^2 + \left(188,2^2 + 119,7^2\right) - \left(144,3^2 + 80,1^2\right)} = 269,9 \text{ А}.$$

Режим згущення поїздів:

$$I_{лів} = 537,9 + 436,4 = 974,3 \text{ А};$$

$$I_{пр} = 250,1 + 138,8 = 388,9 \text{ А};$$

$$I_{елів} = \sqrt{974,3^2 + \left(593,8^2 + 480,1^2\right) - \left(537,9^2 + 436,4^2\right)} = 1026 \text{ А};$$

$$I_{епр} = \sqrt{388,9^2 + \left(276,7^2 + 167,5^2\right) - \left(250,1^2 + 138,8^2\right)} = 417,2 \text{ А}.$$

Режим максимальних розмірів руху:

$$I_{лів} = 595,8 + 483,4 = 1079,2 \text{ А};$$

$$I_{пр} = 277 + 153,8 = 430,8 \text{ А};$$

$$I_{елів} = \sqrt{1079,2^2 + \left(641,6^2 + 515,2^2\right) - \left(595,8^2 + 483,4^2\right)} = 1119,4 \text{ А};$$

$$I_{епр} = \sqrt{430,8^2 + \left(298,5^2 + 178,8^2\right) - \left(277^2 + 153,8^2\right)} = 454,2 \text{ А}.$$

### 1.1.2 Струм фази трансформатора підстанції змінного струму

Середній струм фази трансформатора розраховується за формулами:

– для фаз *a* і *c*

$$I_{a(c)} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot I_1^2 + I_2^2 + 2 \cdot I_1 \cdot I_2}; \quad (1.8)$$

– для фази *b*

$$I_b = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{I_1^2 + I_2^2 - I_1 \cdot I_2}. \quad (1.9)$$

Ефективні струми фаз трансформатора розраховуються за формулами:

– для фаз *a* і *c*

$$I_{a(c)e}^2 = \frac{1}{9} \cdot \left(4 \cdot I_{e1}^2 + I_{e2}^2 + 2 \cdot I_1 \cdot I_2\right); \quad (1.10)$$

– для фази *b*

$$I_{be}^2 = \frac{1}{9} \cdot \left( I_{e1}^2 + I_{e2}^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 \right), \tag{1.11}$$

де $I_1$, $I_{e1}$ – середній та ефективний струми того плеча живлення, яке живиться від розрахункової фази, А;

$I_2$, $I_{e2}$ – середній та ефективний струми того плеча живлення, яке живиться від суміжного плеча живлення, А.

Підставляючи значення у формули (1.8) - (1.11) отримаємо необхідні струми для різних режимів.

Режим середніх розмірів руху поїздів:

$$I_a = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 562{,}1^2 + 224{,}4^2 + 2 \cdot 562{,}1 \cdot 224{,}4} = 417{,}2 \text{ А};$$

$$I_b = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{562{,}1^2 + 224{,}4^2 - 562{,}1 \cdot 224{,}4} = 163{,}4 \text{ А};$$

$$I_c = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 224{,}4^2 + 562{,}1^2 + 2 \cdot 562{,}1 \cdot 224{,}4} = 292{,}4 \text{ А};$$

$$I_{ea} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 654{,}8^2 + 269{,}9^2 + 2 \cdot 562{,}1 \cdot 224{,}4} = 476{,}1 \text{ А};$$

$$I_{eb} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{654{,}8^2 + 269{,}9^2 - 562{,}1 \cdot 224{,}4} = 204{,}3 \text{ А};$$

$$I_{ec} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 269{,}9^2 + 654{,}8^2 + 2 \cdot 562{,}1 \cdot 224{,}4} = 328{,}7 \text{ А}.$$

Режим згущення поїздів:

$$I_a = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 974,2^2 + 388,9^2 + 2 \cdot 974,2 \cdot 388,9} = 723,1 \text{ А};$$

$$I_b = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{974,2^2 + 388,9^2 - 974,2 \cdot 388,9} = 283,1 \text{ А};$$

$$I_c = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 388,9^2 + 974,2^2 + 2 \cdot 974,2 \cdot 388,9} = 506,8 \text{ А};$$

$$I_{ea} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 1025,9^2 + 417,2^2 + 2 \cdot 974,2 \cdot 388,9} = 755,8 \text{ А};$$

$$I_{eb} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{1025,9^2 + 417,2^2 - 974,2 \cdot 388,9} = 306,9 \text{ А};$$

$$I_{ec} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 417,2^2 + 1025,9^2 + 2 \cdot 974,2 \cdot 388,9} = 527,7 \text{ А}.$$

Режим максимальних розмірів руху поїздів:

$$I_a = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 1079,2^2 + 430,8^2 + 2 \cdot 1079,2 \cdot 430,8} = 801 \text{ А};$$

$$I_b = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{1079,2^2 + 430,8^2 - 974,2 \cdot 430,8} = 313,6 \text{ А};$$

$$I_c = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 430,8^2 + 1079,2^2 + 2 \cdot 974,2 \cdot 430,8} = 561,4 \text{ А};$$

$$I_{ea} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 1119,4^2 + 454,2^2 + 2 \cdot 1119,4 \cdot 430,8} = 826,5 \text{ А};$$

$$I_{eb} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{1119,4^2 + 454,2^2 - 974,2 \cdot 430,8} = 332,4 \text{ А};$$

$$I_{ec} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{4 \cdot 454,2^2 + 1119,4^2 + 2 \cdot 974,2 \cdot 430,8} = 578,1 \text{ А}.$$

Результати розрахунку струморозподілу заносимо в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати розрахунку струморозподілу

| Приєднання | Середні розміри руху | | Режим згущення поїздів | | Максимальний режим | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | середній струм, А | ефективний струм, А | середній струм, А | ефективний струм, А | середній струм, А | ефективний струм, А |
| Фідер 1 | 310,3 | 400,3 | 537,9 | 593,8 | 595,8 | 641,6 |
| Фідер 2 | 251,8 | 335,1 | 436,4 | 480,1 | 483,4 | 515,2 |
| Фідер 3 | 144,3 | 188,2 | 250,1 | 276,7 | 277 | 298,5 |
| Фідер 4 | 80,1 | 119,7 | 138,8 | 167,5 | 153,8 | 178,8 |
| Ліве плече | 562,1 | 654,8 | 974,2 | 1025,9 | 1079,2 | 1119,4 |
| Праве плече | 224,4 | 269,9 | 388,9 | 417,2 | 430,8 | 454,2 |
| Фаза «*a*» | 417,2 | 476,1 | 723,1 | 755,8 | 801 | 826,5 |
| Фаза «*b*» | 163,3 | 204,3 | 283,1 | 306,9 | 313,6 | 332,4 |
| Фаза «*c*» | 292,4 | 328,7 | 506,8 | 527,7 | 561,4 | 578,1 |

### 1.1.3 Переріз контактної мережі

Зі збільшенням перерізу проводів контактної мережі зменшуються витрати, пов’язані з оплатою втрат електроенергії в тяговій мережі, але зростають

капітальні витрати. Таким чином, змінюючи переріз проводів контактної мережі, за деякого значення досягається оптимум, коли приведені щорічні витрати найменші. Такий переріз контактної мережі є економічно доцільним та визначається виразом:

$$F_{\text{ме}} = 0{,}46\sqrt{B_0}\,, \tag{1.12}$$

де $F_{\text{ме}}$ – переріз проводів контактної мережі у мідному еквіваленті, $\text{мм}^2$;

$B_0$ – питомі річні втрати електроенергії в проводах контактної мережі на фідерній зоні, кВт·год/Ом·рік:

$$B_0 = \frac{\Delta W_p}{r\ell}, \tag{1.13}$$

де $\Delta W_p$ – річні втрати електроенергії в проводах контактної мережі на міжпідстанційній зоні, кВт·год;

$\ell$ – довжина міжпідстанційної зони, км;

$r$ – питомий опір проводів контактної мережі на міжпідстанційній зоні, Ом/км.

### 1.1.4 Визначення питомих річних втрат електроенергії

Схема живлення контактної мережі на двоколійних та багатоколійних ділянках повинна передбачати підключення постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання контактних підвісок. Для визначення $B_0$ для вузлової схеми живлення можна скористатись виразом:

$$B_0 = \frac{0{,}0228 \cdot W_T^2}{TU_{ном}^2} \left[ \begin{array}{l} 2{,}95 \left[ \dfrac{T}{N_{пар} t_{спар} + N_{неп} t_{снеп}} + 0{,}46 \left( 0{,}25 - \dfrac{\theta}{t_{пар} + t_{неп}} \right) \right] \\ \dfrac{4}{3} \dfrac{\theta}{t_{пар} + t_{неп}} \left( 1{,}1 \dfrac{N_{0пар} t_{пар} + N_{0неп} t_{неп}}{N_{пар} t_{спар} + N_{неп} t_{снеп}} - 1 \right) + 1 \end{array} \right]. \quad (1.14)$$

Для трьохвузлової схеми живлення значення $B_0$ можна визначити як для схеми паралельного з'єднання підвісок, тобто:

$$B_0 = \frac{0{,}067 \cdot W_T^2}{TU_{ном}^2} \left[ \frac{T}{N_{пар} t_{спар} + N_{неп} t_{снеп}} + 0{,}46 \left( 1 - \frac{\theta}{t_{пар} + t_{неп}} \right) \right]. \quad (1.15)$$

У формулах (1.14), (1.15) застосовані такі позначення:

$T$ – розрахунковий період, год;

$U_{ном}$ – номінальна напруга на струмоприймачеві електровоза, кВ;

$t_{пар}$, $t_{неп}$ – час руху поїзда міжпідстанційною зоною в парному, непарному напрямку, год;

$t_{спар}$, $t_{снеп}$ – час споживання електроенергії поїздом у парному, непарному напрямку, год;

$N_{пар}$, $N_{неп}$ – середньодобова кількість поїздів у парному, непарному напрямку;

$N_{0пар}$, $N_{0неп}$ – максимальна пропускна спроможність ділянки в парному, непарному напрямку;

$W_T$ – витрати електроенергії на тягу поїздів за період $T$, кВт·год, з урахуванням припущення про однотипність поїздів:

$$W_T = W_{пар} N_{пар} + W_{неп} N_{неп}, \quad (1.16)$$

де $W_{пар}$, $W_{неп}$ – витрати електроенергії на рух поїзда в парному, непарному напрямку, кВт·год:

$$W_{пар(неп)} = I_{пар(неп)} \cdot U_{ном} \cdot t_{пар(неп)}, \quad (1.17)$$

де $I_{пар}$, $I_{неп}$ – середні струми поїздів під час руху розрахунковою міжпідстанційною зоною, А.

Підставляючи значення у формули (1.12) - (1.17) отримаємо результати для різних схем живлення:

$$I_{неп} = \frac{1}{2 \cdot 34,2}\left[\begin{matrix}(135+150)4,2+(150+180)6,2+(180+285)5+(285+240)3,8+\\(240+180)2,5+(180+150)3,8+(150+180)2,5+(180+195)5,5\end{matrix}\right]$$

$$I_{неп} = 186,5 \text{ А};$$

$$I_{пар} = \frac{1}{2 \cdot 31,3}\left[\begin{matrix}(240+240)0,6+(240+210)3,8+(210+120)5,4+(180+210)4,3+\\(210+180)8,1+(180+270)7,1+(270+240)0,6\end{matrix}\right]$$

$$I_{пар} = 193,6 \text{ А}.$$

Витрати електроенергії на рух поїзда у парному і непарному напрямках становитимуть:

$$W_{неп} = 186,5 \cdot 25 \cdot 0,558 = 2601,7 \text{ кВт·год};$$

$$W_{пар} = 193,6 \cdot 25 \cdot 0,497 = 2405,5 \text{ кВт·год}.$$

Витрата електроенергії на рух поїздів:

$$W_m = 2601,7 \cdot 75 + 2405,5 \cdot 75 = 375540 \text{ кВт·год}.$$

Тоді для вузлової схеми:

$$B_0 = \frac{0{,}0228 \cdot 375540^{\,2}}{24 \cdot 25^2}\left[\begin{array}{l} 2{,}95\left[\dfrac{24}{75 \cdot 0{,}558 + 75 \cdot 0{,}497} + 0{,}46\left(0{,}25 - \dfrac{0{,}167}{0{,}57 + 0{,}522}\right)\right] \\ \dfrac{4}{3}\dfrac{0{,}167}{0{,}57 + 0{,}522}\left(1{,}1\dfrac{144 \cdot 0{,}57 + 144 \cdot 0{,}522}{75 \cdot 0{,}558 + 75 \cdot 0{,}497} - 1\right) + 1 \end{array}\right]$$

$$B_0 = 486259{,}4 \ \ \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{Ом} \cdot \text{рік}}.$$

Таким чином, визначимо переріз проводів контактної мережі у мідному еквіваленті:

$F_{ме} = 0{,}46\sqrt{486259} = 320{,}8$ мм$^2$ - для двоколійної ділянки.

$F_{ме} = \dfrac{320{,}8}{2} = 160{,}4$ мм$^2$ - для однієї колії.

Для трьохвузлової схеми:

$$B_0 = \frac{0{,}067 \cdot 375540^{\,2}}{24 \cdot 25^2}\left[\frac{24}{75 \cdot 0{,}558 + 75 \cdot 0{,}497} + 0{,}46\left(1 - \frac{0{,}167}{0{,}57 + 0{,}522}\right)\right]$$

$$B_0 = 436526 \ \ \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{Ом} \cdot \text{рік}}.$$

$F_{ме} = 0{,}46\sqrt{436526} = 303{,}9$ мм$^2$ - для двоколійної ділянки.

$F_{ме} = \dfrac{303{,}9}{2} = 151{,}9$ мм$^2$ - для однієї колії.

Згідно з отриманим перерізом, обирається тип контактної підвіски М95+МФ-100. Данні обраної підвіски заносяться до табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Параметри контактної мережі

| Тип підвіски | Переріз у мідному еквіваленті, мм$^2$ | Тривалий допустимий струм при 15 %-му зношенні контактних проводів, А |
|---|---|---|
| М-95 + МФ-100 | 195 | 1060 |

### 1.1.5 Перевірка контактної підвіски за нагрівом

Прийнятий у проекті переріз контактної підвіски повинен бути перевірений на термічну стійкість. Для цього необхідно вибрати найбільш завантажену міжпідстанційну зону.

В умовах проекту використовується спосіб перевірки контактної підвіски за розрахунковим струмом, який треба порівняти з допустимим для обраної підвіски. Контактна підвіска перевіряється в місці підключення споживаючого фідера для роздільної роботи колій (незалежно від дійсної схеми з'єднання підвісок) та 20-хвилинного періоду інтенсивного струмоспоживання.

Розрахунковий струм фідера:

$$I_{роз} = I_{фід} k'_{i20} k_{ф}, \tag{1.18}$$

де $k_{ф}$ – коефіцієнт, що враховує вплив зміни навантаження під час 20-хвилинного періоду найбільшого струмоспоживання на нагрів проводів контактної підвіски:

$$k_{ф} = \frac{0{,}36\alpha^2}{n_0} + 1, \tag{1.19}$$

де $\alpha$ – відношення часу руху поїзда міжпідстанційною зоною до часу струмоспоживання,

$$\alpha = \frac{t}{t_c}, \tag{1.20}$$

$k'_{i20}$ – коефіцієнт інтенсивності 20-хвилинного навантаження фідера, який визначається в залежності від добової витрати електроенергії фідером у добу інтенсивного електроспоживання.

Підставляючи значення у формули (1.18) - (1.20) отримаємо результати розрахунків.

$$\alpha = \frac{0,57}{0,558} = 1,022 ;$$

$$k_{ф} = \frac{0,36 \cdot 1,022^{2}}{3,43} + 1 = 1,11 ;$$

$$I_{роз} = 537,9 \cdot 2,2 \cdot 1,11 = 1314 \text{ А} > 1060 \text{ А}.$$

Умова перерізу контактної підвіски за нагрівом не виконується, тому приймаємо тип контактної підвіски М95+МФ-100+А185, для якої тривалий допустимий струм при 15% зношенні контактного проводу - 1440 А.

Для даної підвіски умова перерізу контактної підвіски за нагрівом виконується.

### 1.2 Механічний розрахунок анкерної ділянки

Довжина еквівалентного прогону

$$\ell_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \ell_i^3}{\ell_a}}, \qquad (1.21)$$

де $\ell_i$ – довжина $i$ -го прогону, м;

$\ell_{\text{а}}$ – довжина анкерної ділянки, м.

Підставляючи значення у формулу (1.21) отримаємо:

$$\ell_e = \sqrt{\frac{5 \cdot 55^3 + 4 \cdot 60^3 + 5 \cdot 65^3 + 6 \cdot 70^3}{5 \cdot 55 + 4 \cdot 60 + 5 \cdot 65 + 6 \cdot 70}} = 63{,}8\,\text{м}.$$

Розрахунковий режим визначається за формулою:

$$\ell_{кр} = \mathrm{T_{max}} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha(\mathrm{t_г} - \mathrm{t_{min}})}{\mathrm{q_{нг}^2} - \mathrm{g_0^2}}}, \qquad (1.22)$$

де $\alpha$ – коефіцієнт температурного лінійного розширення матеріалу тросу, 1/°С.

Підставляючи значення у формулу (1.22) отримаємо:

$$\ell_{кр} = 1600 \cdot \sqrt{319 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(-5-(-35))}{1{,}918^2 - 1{,}559^2}} = 140{,}1\ \text{м}.$$

Так як $\ell_{кр} > \ell_e$ отже розрахунковим буде режим мінімальної температури.

Натяг навантаженого несучого тросу:

$$t_x = A + \frac{B}{T_x^2} - \frac{T_x}{\alpha ES}; \qquad (1.23)$$

$$A = t_{реж} - \frac{q_{реж}^2 \ell_e^2}{24\alpha T_{\max}^2} + \frac{T_{\max}}{\alpha ES}; \qquad (1.24)$$

$$B = \frac{g_0^2 \ell_e^2}{24\alpha}, \qquad (1.25)$$

де $\alpha ES$ – добуток коефіцієнта температурного лінійного розширення матеріалу троса, модуля пружності Юнга та площі поперечного перерізу, даН/°С.

Підставляючи значення у формули (1.23)-(1.25) отримаємо:

$$A = -35 - \frac{1{,}559^2 \cdot 63{,}8^2}{319 \cdot 10^{-6} \cdot 1600^2} + \frac{1600}{16{,}48} = 49{,}97\ ^\circ\text{C}$$

$$B = \frac{1{,}559^2 \cdot 63{,}8^2}{319 \cdot 10^{-6}} = 31012938 \quad \text{даН}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$$

Змінюючи натяг несучого тросу від максимального до 200 даН з кроком 200 даН заповнюємо таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати розрахунків

| $T_x$, даН | 1600 | 1400 | 1200 | 1000 | 800 | 600 | 400 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_x$, °С | -35 | -19,2 | -1,3 | 20,3 | 49,9 | 99,7 | 219,5 | 813,2 |

Температура, при якій контактний провід не має стріли прогину

$$t_0 = t_{сер} - \Delta t\ ; \tag{1.26}$$

$$t_{сер} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}, \tag{1.27}$$

де $\Delta t = 10 \ldots 15^\circ$С (для одного контактного проводу);

Підставляючи значення у формули (1.26)-(1.27) отримаємо:

$$t_{сер} = \frac{30 + (-35)}{2} = -2{,}5\ ^\circ\text{C}.$$

$$t_0 = -2{,}5 - 10 = -12{,}5\ ^\circ\text{C}.$$

Натяг несучого троса, при якому відсутній прогин контактного проводу:

$$t_0 = A + \frac{B}{T_0^2} - \frac{T_0}{\alpha ES}. \tag{1.28}$$

Значення $T_0$ підбираємо ітераційним методом: $T_0 = 1322$ даН.

Натяг несучого троса при ожеледі з вітром:

$$t_г = A + \frac{B_г}{T_г^2} - \frac{T_г}{\alpha ES}; \tag{1.29}$$

$$B_г = \frac{q_{нг}^2 \ell_e^2}{24\alpha}. \tag{1.30}$$

Підставляючи значення у формули (1.29)-(1.30) отримаємо:

$$B_г = \frac{1{,}918^2 \cdot 63{,}8^2}{319 \cdot 10^{-6}} = 46940519 \quad \text{даН}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$$

$T_г$ = 1339 даН.

Натяг несучого троса при максимальній швидкості вітру:

$$t_v = A + \frac{B_v}{T_v^2} - \frac{T_v}{\alpha ES}; \tag{1.31}$$

$$B_v = \frac{q_{нv}^2 \ell_e^2}{24\alpha}. \tag{1.32}$$

Підставляючи значення у формули (1.31)-(1.32) отримаємо:

$$B_v = \frac{2{,}064^2 \cdot 63{,}8^2}{319 \cdot 10^{-6}} = 54358827 \quad \text{даН}^2 \cdot {}^\circ\text{С}$$

$$T_v = 1285 \text{ даН}.$$

Стріла прогину контактного проводу:

$$f_{xi} = \frac{g_0 (\ell_n - 2e_n)^2}{8(T_x + nK)} \left(1 - \frac{T_x}{T_0}\right), \tag{1.33}$$

де $e_n$ – відстань від осі опори до опорної струни в прогоні $\ell_n$, м;

$\ell_n$ – прогін, в якому розташовується пішохідний місток, м.

Підставляючи значення у формулу (1.33) отримаємо:

$$f_{xi} = \frac{1{,}559(70 - 2 \cdot 10)^2}{8(1600 + 1000)} \left(1 - \frac{1600}{1322}\right) = -0{,}039 \text{ м}.$$

Стріла прогину навантаженого несучого троса:

$$F_{xn} = \frac{1}{T_x} \left( \frac{g_0 \ell_n{}^2}{8} + b_n H - f_{xn} K n \right), \tag{1.34}$$

де $b_n$ – відстань між несучим та ресорним тросом по осі опори в прогоні $\ell_n$, м;

$H$ – натяг ресорного троса, даН.

Підставляючи значення у формулу (1.34) отримаємо:

$$F_{хп} = \frac{1}{1600}\left(\frac{1{,}559 \cdot 70^2}{8} + 0{,}7 \cdot 150 - \left(-0{,}039\right)1000\right) = 0{,}687 \text{ м.}$$

Натяг ненавантаженого несучого троса:

$$t_x = A + \frac{B_p}{T_{px}^2} - \frac{T_{px}}{\alpha ES}; \tag{1.35}$$

$$B_p = \frac{g_н^2 \ell_e^2}{24\alpha}. \tag{1.36}$$

Підставляючи значення у формули (1.35)-(1.36) отримаємо:

$$B_p = \frac{0{,}586^2 \cdot 63{,}8^2}{319 \cdot 10^{-6}} = 4381734 \text{ даН}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$$

$$T_{px} = 1435 \text{ даН.}$$

Стріла прогину ненавантаженого несучого троса

$$F_{pxп} = \frac{g_н \ell_п^2}{8T_{px}}. \tag{1.37}$$

Підставляючи значення у формулу (1.37) отримаємо:

$$F_{pxп} = \frac{0{,}586^2 \cdot 70^2}{8 \cdot 1435} = 0{,}25 \text{ м.}$$

Результати виконаних розрахунків зводяться до табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Монтажна Таблиця

| tx, °C | -35 | -20 | -12,5 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_x$, даН | 1600 | 1410 | 1322 | 1295 | 1190 | 1090 | 1005 | 925 |
| $f_x$, м | -0,039 | -0,013 | 0 | 0,004 | 0,022 | 0,041 | 0,058 | 0,076 |
| $F_{хп}$, м | 0,687 | 0,761 | 0,802 | 0,815 | 0,872 | 0,935 | 0,997 | 1,064 |
| $T_{px}$, даН | 1435 | 1201 | 1090 | 1055 | 907 | 780 | 660 | 560 |
| $F_{px}$, м | 0,25 | 0,299 | 0,329 | 0,34 | 0,396 | 0,46 | 0,544 | 0,641 |

По результатам таблиці 1.4 будуємо монтажні криві на рис.1.3.

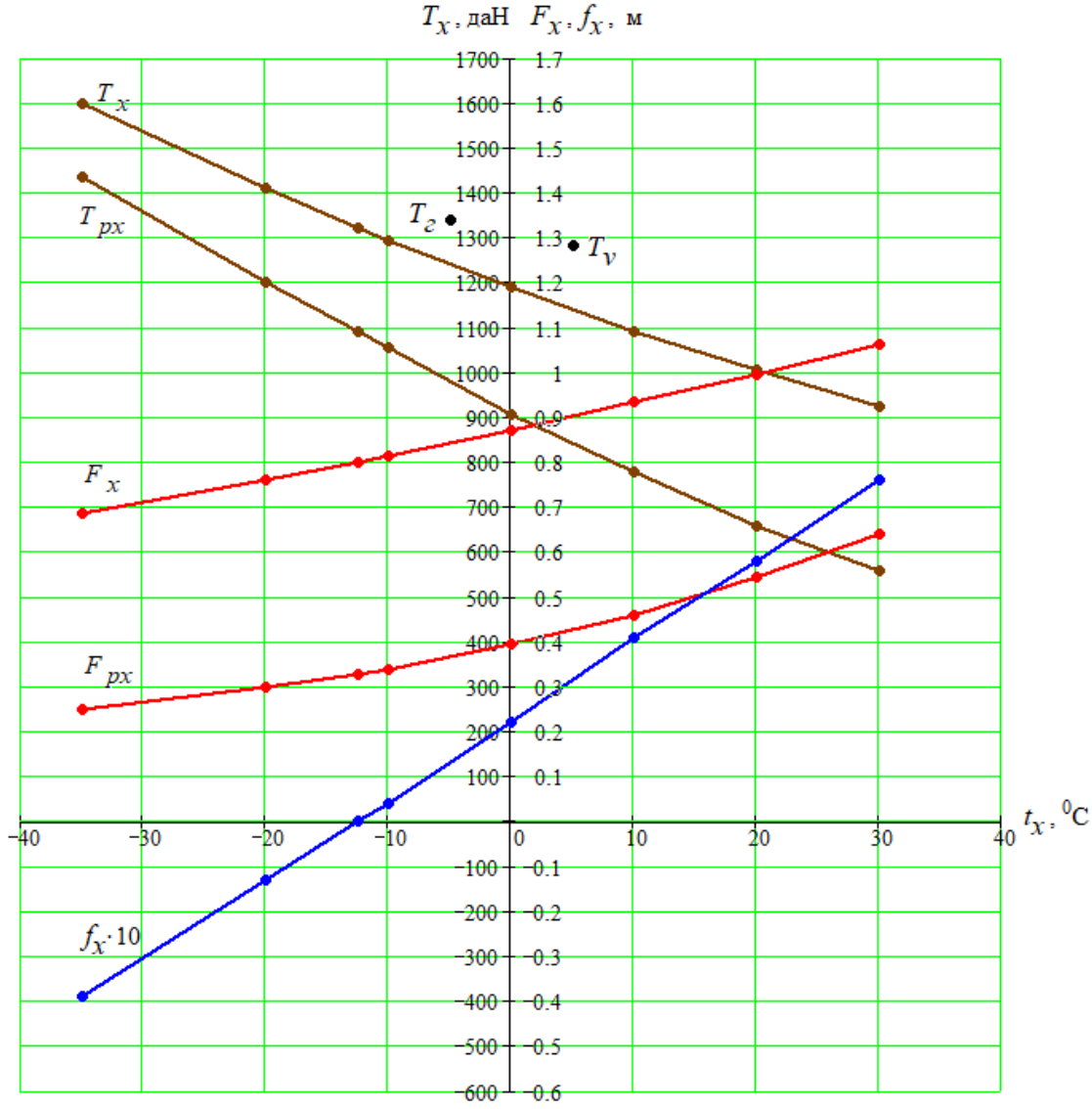



Рисунок 1.3 – Монтажні криві

# 2 ЕЛЕКТРИЧНІ ПІДСТАНЦІЇ ТА СТАНЦІЇ

## 2.1 Розрахунок потужності трансформаторів

Зобразимо структурну схему розрахункової підстанції на рис.2.1.

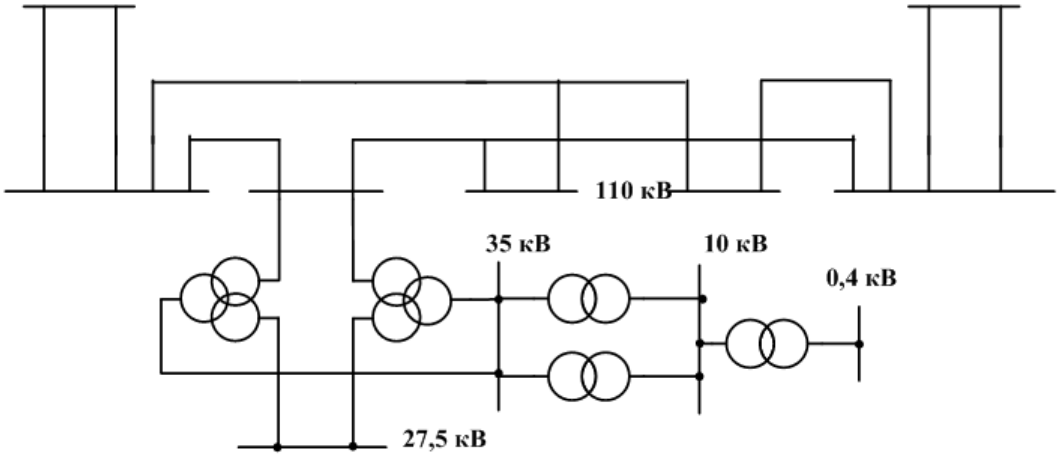



Рисунок 2.1 – Структурна схема розрахункової ТП

Максимальна потужність на шинах 27,5 кВ:

$$S_{\max 27,5} = S_{\text{т}} + S_{\text{дпр}}, \tag{2.1}$$

де $S_{\text{т}}$ - потужність тягового навантаження на шинах 27,5 кВ (кВА);

$S_{\text{дпр}}$ - потужність не тягових споживачів, які живляться від шин 27,5 кВ (кВА);

Потужність тягового навантаження:

$$S_{\text{т}} = U_{ш}\left(2I_{\text{д}}^{'} + 0,65I_{\text{д}}^{''}\right)k_{нр}k_{ку}, \tag{2.2}$$

де $U_{\text{ш}}$ - напруга на шинах РП 27,5 кВ;

$I_{\text{д}}^{'}$ - ефективний струм найбільш завантаженого плеча (фази) трансформатору, А;

$I_д^{''}$- ефективний струм найменш завантаженого плеча (фази) трансформатору, А;

$k_{пр}$- коефіцієнт різночасності навантаження фаз трансформатора, приймається 0,9;

$k_{ку}$ - коефіцієнт компенсованого пристрою, який враховує зниження потрібної на тягу потужності при роботі компенсованого пристрою, (приймається 0,93).

Або перетворивши формулу (2.2) отримаємо:

$$S_т = \left(2S^{'} + 0{,}65S^{''}\right)k_{нр}k_{ку};$$

$$S_т = \left(2 \cdot 8{,}5 + 0{,}65 \cdot 7{,}9\right)0{,}9 \cdot 0{,}93 = 18{,}53 \text{ МВА} = 18530 \text{ кВА}.$$

Потужність фідера ДПР знаходиться по заданої потужності в кВА на 1 км:

$$S_{дпр} = S_{дпр1} \cdot L = 25 \cdot 10 = 250 \text{ кВА}.$$

Відповідно до (2.1) отримаємо:

$$S_{max27,5} = 18530 + 250 = 18780 \text{ кВА}.$$

Потужність на шинах 35 кВ. Згідно вихідних даних потужність нетягового навантаження на шинах 35 кВ складає 20 % від тягового навантаження, а на шинах 10 кВ – 10 %.

$$S_{max35} = 0{,}2 \cdot 18780 = 3756 \text{ кВА}.$$

Потужність на шинах 10 кВ. Маємо транзитну підстанцію, отже потужність ТВП приймаємо 400 кВА.

$$S_{\text{ш.max10}} = S'_{10} + S_{\text{тсн}}.$$

$$S_{\text{ш.max10}} = 1878 + 400 = 2278 \text{ кВА}.$$

У відповідності до потужності на шинах 10 кВ приймаємо районний трансформатор типу ТМ-2500/35 У1. Тоді отримаємо:

$$S_{ш.\ \max\ 35} = (S_{PT} + S_{\max 35})k_p;$$

$$S_{ш.\ \max\ 35} = (2500 + 3756)\cdot 0{,}95 = 5943{,}2 \text{ кВА}.$$

Розрахункова потужність головного понижуючого трансформатора:

$$S_{розрах.\max} = (S_{ш.\ \max\ 27{,}5+} S_{ш.\ \max\ 35})k_p;$$

$$S_{розрах.\max} = (19180+5943{,}2)\cdot 0{,}95 = 23867 \text{ кВА}.$$

Результати вибору трансформаторів зведемо до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вибрані трансформатори та їх паспортні дані

| № п/п | Тип трансформатора | Кіль-кість | $U_1$, кВ | $U_2$, кВ | $U_3$, кВ | $U_к$, % | | | Схема з'єднання |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | В-С | В-Н | С-Н | |
| 1 | ТДТНЖ - 25000/110 У1 | 2 | 115 | 38,5 | 27,5 | 18 | 10,5 | 6,8 | $Y_0 / Y_H / \Delta_0 - 11$ |
| 2 | ТМ - 2500/35 У1 | 2 | 35 | | 10,5 | | 6,5 | | $Y / \Delta - 11$ |
| 3 | ТМ-400/10 У1 | 2 | 10 | | 0,4 | | 4,5 | | $Y / Y_0 - 0$ |

Потужність підстанції:

$$S_{\text{тп}} = 4 \cdot 25000 = 100000 \text{ кВА}.$$

## 2.2 Розрахунок струмів к.з.

Схема заміщення представлена на рис.2.2.

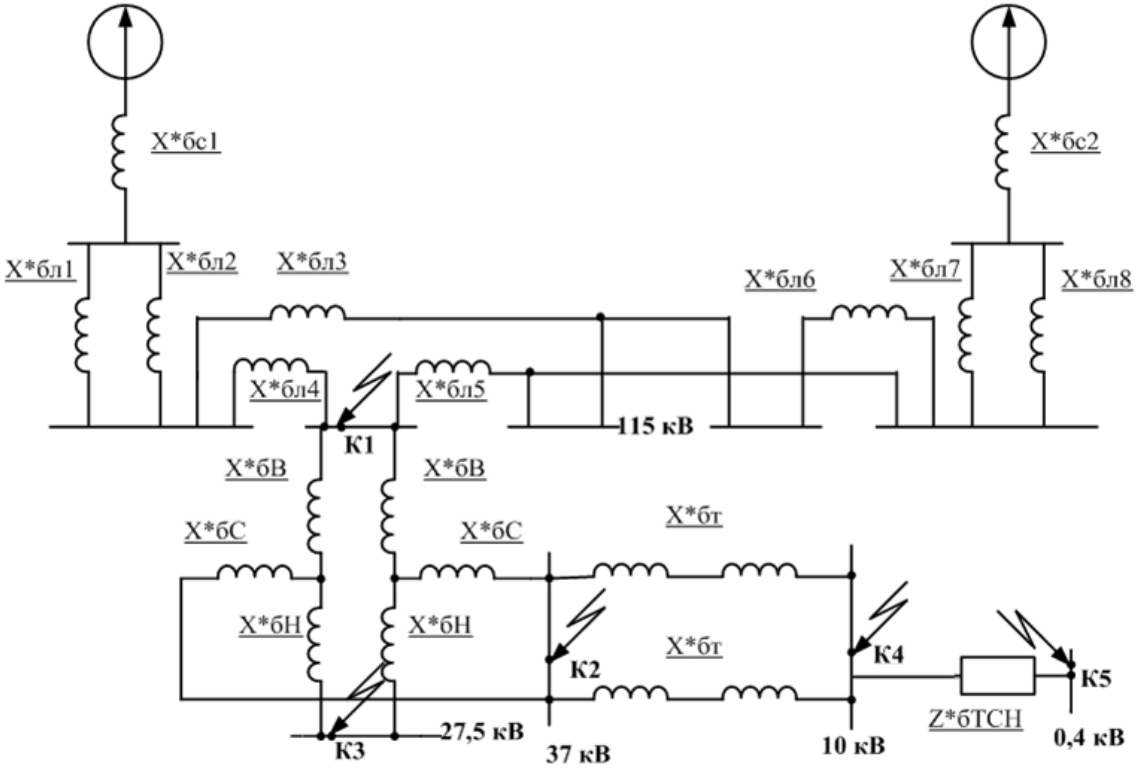



Рисунок 2.2 – Схема заміщення

Приймаємо базисну потужність $S_б = 100$ МВА.

Як базисну напругу приймаємо середню лінійну напругу тієї ступені, де проводиться розрахунок струму к.з.

$U_{ср.ш.110} = 115$ кВ, $U_{ср.ш.35} = 37$ кВ, $U_{ср.ш.25} = 26{,}2$ кВ, $U_{ср.ш.0{,}4} = 0{,}4$ кВ.

Базисний струм знаходимо за формулою:

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{ср}}. \qquad (2.3)$$

Струм короткого замикання визначимо по формулі:

$$I_{к} = \frac{I_{б}}{x_{*б}}. \quad (2.4)$$

Базисний опір системи має таку формулу:

$$x_{*бсист} = \frac{S_{б}}{S_{к}}. \quad (2.5)$$

Схема заміщення до точки к1 представлена на рис.2.3.

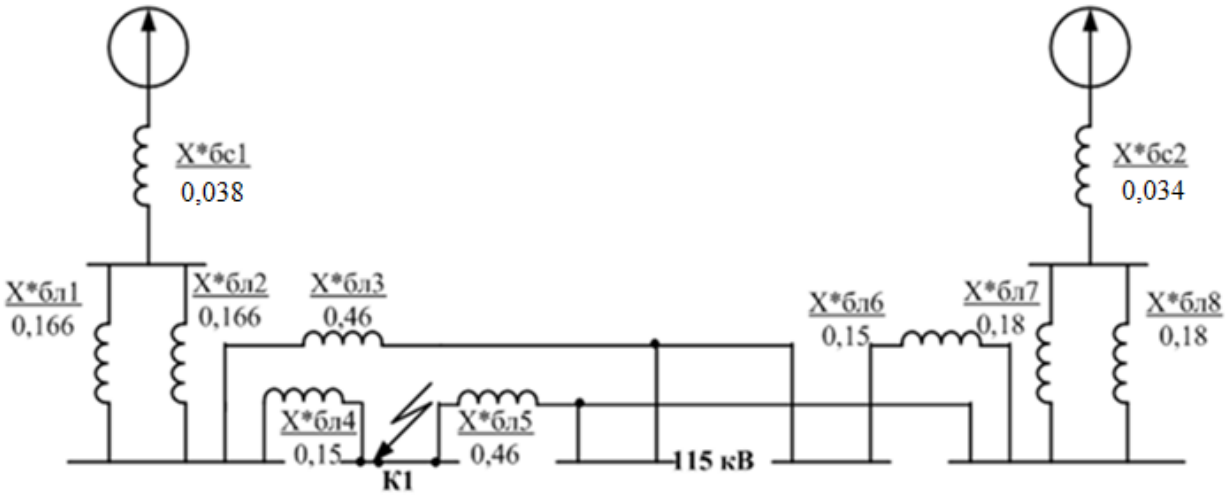



Рисунок 2.3 – Схема заміщення до точки к1

Відповідно до (2.5) базисний опір системи 1:

$$x_{*бсист1} = \frac{100}{2600} = 0{,}038.$$

Базисний опір системи 2:

$$x_{*бсист2} = \frac{100}{2900} = 0{,}034.$$

Базисний струм:

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.ш.110}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0{,}502 \text{ кА.}$$

Опори ліній:

$$X_{*бл1} = X_{*бл2} = X_0 \cdot L_5 \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0{,}4 \cdot 55 \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}166;$$

$$X_{*бл3} = X_0 \cdot (L_1 + L_2 + L_3) \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0{,}4 \cdot (50 + 50 + 52) \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}46;$$

$$X_{*бл4} = X_0 \cdot L_1 \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0{,}4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}15;$$

$$X_{*бл5} = X_0 \cdot (L_2 + L_3 + L_4) \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0{,}4 \cdot (50 + 52 + 49) \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}46;$$

$$X_{*бл6} = X_0 \cdot L_4 \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0{,}4 \cdot 49 \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}15;$$

$$X_{*бл7} = X_{*бл8} = X_0 \cdot L_6 \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2} = 0{,}4 \cdot 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}18.$$

Будемо поступово згортати схему до точки к1 (рис.2.4):

$$X_{*бл9} = 0{,}5 X_{*бл1} = 0{,}5 \cdot 0{,}166 = 0{,}083;$$

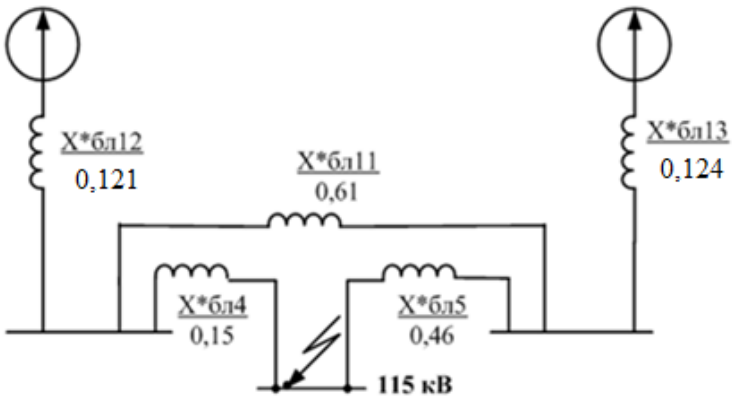



Рисунок 2.4 – Перетворена схема заміщення до точки к1

$$X_{*бл10} = 0{,}5X_{*бл7} = 0{,}5 \cdot 0{,}18 = 0{,}09;$$

$$X_{*бл11} = X_{*бл3} + X_{*бл6} = 0{,}46 + 0{,}15 = 0{,}61;$$

$$X_{*бл12} = X_{*бс1} + X_{*бл9} = 0{,}038 + 0{,}083 = 0{,}121;$$

$$X_{*бл13} = X_{*бс2} + X_{*бл10} = 0{,}034 + 0{,}09 = 0{,}124.$$

Після деяких перетворень отримаємо схему на рис. 2.5.

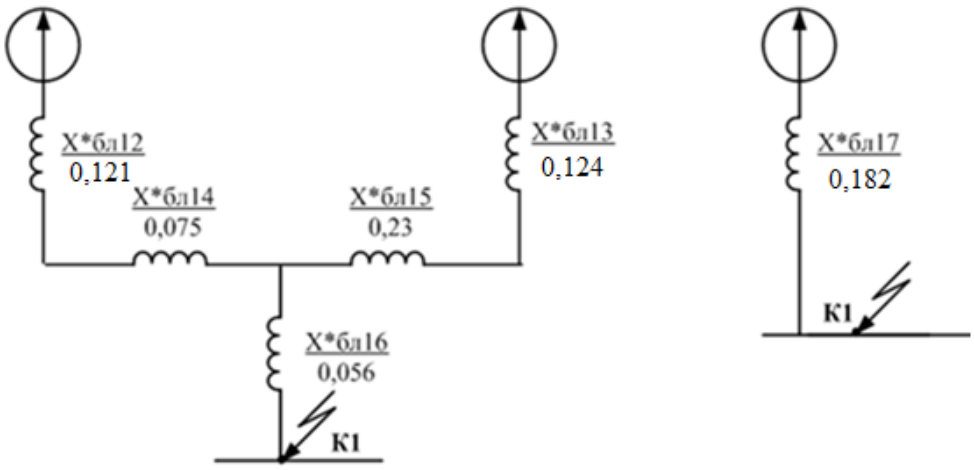



Рисунок 2.5 – Згорнута схема заміщення до точки к1

$$X_{*бл14} = \frac{X_{*бл4} \cdot X_{*бл11}}{X_{*бл4} + X_{*бл5} + X_{*бл11}} = \frac{0{,}15 \cdot 0{,}61}{0{,}15 + 0{,}61 + 0{,}46} = 0{,}075\ ;$$

$$X_{*бл15} = \frac{X_{*бл5} \cdot X_{*бл11}}{X_{*бл4} + X_{*бл5} + X_{*бл11}} = \frac{0{,}46 \cdot 0{,}61}{0{,}15 + 0{,}61 + 0{,}46} = 0{,}23;$$

$$X_{*бл16} = \frac{X_{*бл4} \cdot X_{*бл5}}{X_{*бл4} + X_{*бл5} + X_{*бл11}} = \frac{0{,}15 \cdot 0{,}46}{0{,}15 + 0{,}61 + 0{,}46} = 0{,}056\ ;$$

$$X_{*бл17} = X_{*бл16} + \frac{\left(X_{*бл12} + X_{*бл14}\right) \cdot \left(X_{*бл13} + X_{*бл15}\right)}{X_{*бл12} + X_{*бл14} + X_{*бл13} + X_{*бл15}} =$$

$$= 0{,}056 + \frac{\left(0{,}121 + 0{,}075\right) \cdot \left(0{,}124 + 0{,}23\right)}{0{,}121 + 0{,}075 + 0{,}124 + 0{,}23} = 0{,}182.$$

Знайдемо струм короткого замикання в точці К1 відповідно до (2.4):

$$I_{к1} = \frac{I_{б1}}{X_{*бК1}} = \frac{0{,}502}{0{,}182} = 2{,}76\ \text{кА}.$$

Знайдемо ударний струм в точці К1:

$$i_{у1} = 2{,}55 \cdot I_{к1} = 2{,}55 \cdot 2{,}76 = 7{,}04\ \text{кА};$$

$$I_{Куст1} = 1{,}52 \cdot I_{к1} = 1{,}52 \cdot 2{,}76 = 4{,}2\,\text{кА}.$$

Розрахунок струмів КЗ до точки К2, на шинах 35 кВ.

Знайдемо напруги обмоток трансформатора:

$$u_{кв} = 0{,}5 \cdot \left(u_{квс} + u_{квн} - u_{ксн}\right) = 0{,}5 \cdot \left(10{,}5 + 18 - 6{,}5\right) = 10{,}75;$$

$$u_{кн} = 0{,}5 \cdot \left(u_{квн} + u_{ксн} - u_{квс}\right) = 0{,}5 \cdot \left(18 + 6{,}5 - 10{,}5\right) = 6{,}75;$$

$$u_{кс} = 0{,}5 \cdot \left(u_{квс} + u_{ксн} - u_{квн}\right) = 0{,}5 \cdot \left(10{,}5 + 6{,}5 - 18\right) = -0{,}25.$$

Визначимо опір обмоток трансформатора:

$$X_{*бВ} = \frac{u_{кв}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{номтр}} = \frac{10{,}75}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0{,}43;$$

$$X_{*бН} = \frac{u_{кн}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{номтр}} = \frac{6{,}75}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0{,}27;$$

$$X_{*бС} = \frac{u_{кв}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{номтр}} = \frac{0{,}25}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0{,}01.$$

Схема заміщення до точки к2 представлена на рис. 2.6.

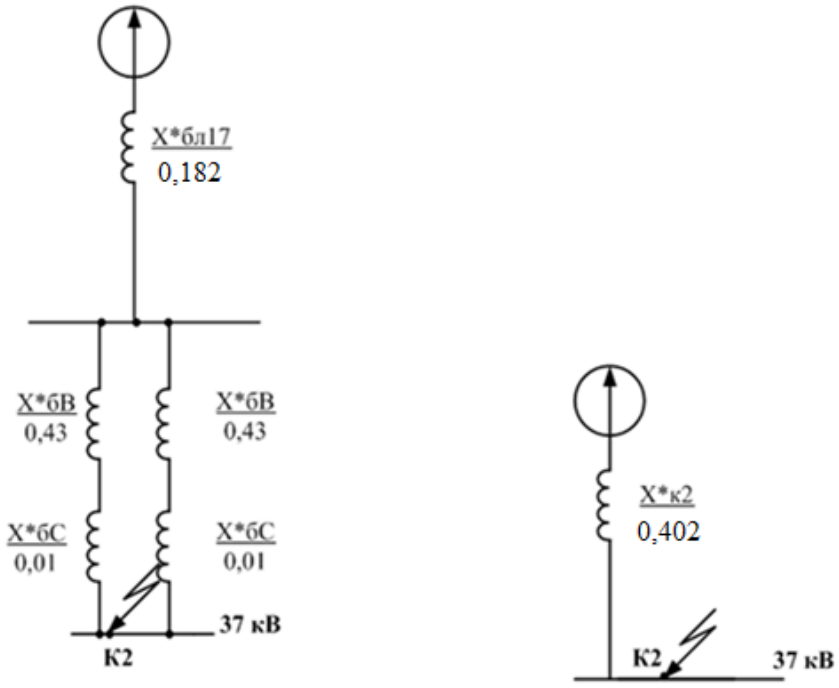



Рисунок 2.6 – Схема заміщення до точки к2

Визначимо базисний струм для точки к2:

$$I_{б2} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{ср}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1{,}56 \text{ кА};$$

$$X_{*бК2} = X_{*бК1} + \frac{X_{*бВ} + X_{*бС}}{2} = 0{,}182 + \frac{0{,}43 + 0{,}01}{2} = 0{,}402 .$$

Знайдемо струм короткого замикання в точці к2:

$$I_{к2} = \frac{I_{б2}}{X_{*бК2}} = \frac{1{,}56}{0{,}402} = 3{,}881 \text{ кА}.$$

Знайдемо ударний струм в точці к2:

$$i_{у2} = 2{,}55 \cdot I_{к2} = 2{,}55 \cdot 3{,}881 = 9{,}9 \text{ кА};$$

$$I_{Куст2} = 1{,}52 \cdot I_{к2} = 1{,}52 \cdot 3{,}881 = 5{,}9 \text{ кА}.$$

Розрахунок струмів к.з. до точки К3, на шинах 27,5 кВ.

Схема заміщення до точки к3 представлена на рис. 2.7.

Загальний опір визначається:

$$X_{*бК3} = X_{*бК1} + \frac{X_{*бВ} + X_{*бН}}{2} = 0{,}182 + \frac{0{,}43 + 0{,}27}{2} = 0{,}532 .$$

Визначимо базисний струм для точки К3:

$$I_{б3} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{ср}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 27{,}5} = 2 \text{ кА}.$$

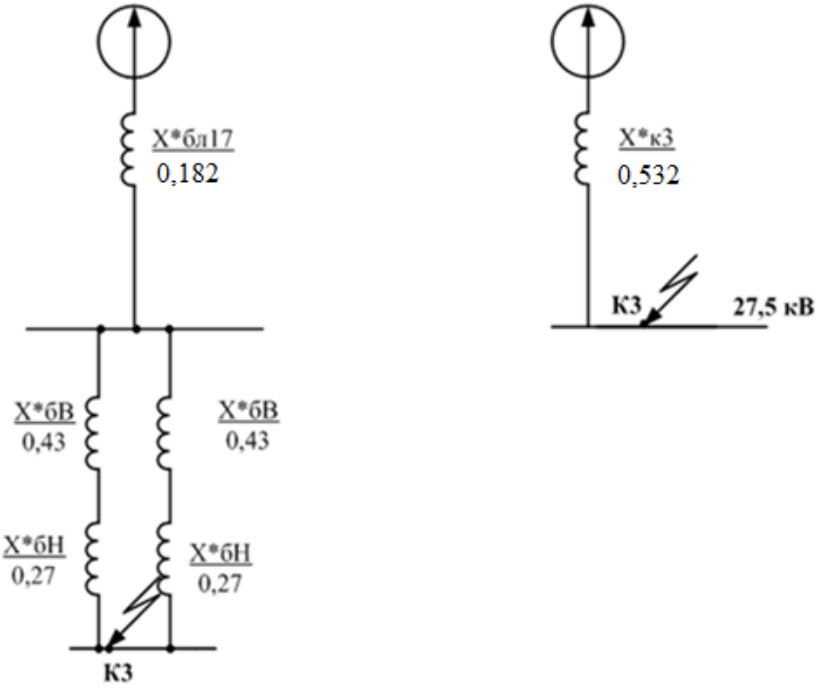



Рисунок 2.7 – Схема заміщення до точки к3

Знайдемо струм короткого замикання в точці К3:

$$I_{к3} = \frac{I_{б3}}{X_{*бК3}} = \frac{2}{0{,}532} = 3{,}76 \text{ кА}.$$

Знайдемо ударний струм в точці К3:

$$i_{у3} = 2{,}55 \cdot I_{к3} = 2{,}55 \cdot 3{,}76 = 9{,}59 \text{ кА};$$

$$I_{Куст3} = 1{,}52 \cdot I_{к3} = 1{,}52 \cdot 3{,}76 = 5{,}72 \text{ кА}.$$

Розрахунок струмів К3 до точки К4, на шинах 10 кВ.

Схема заміщення представлена на рис. 2.8.

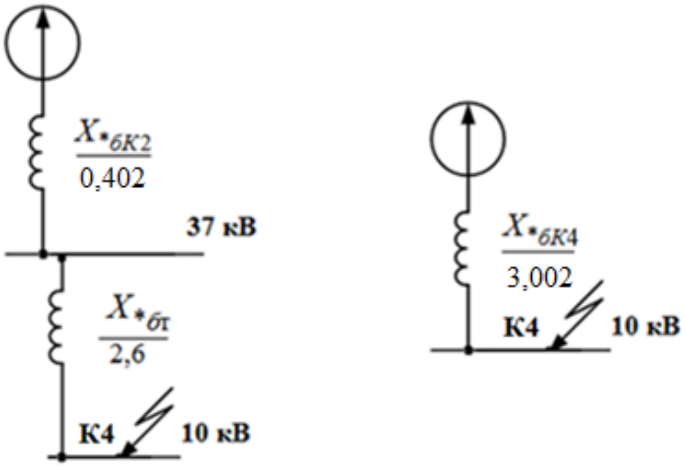



Рисунок 2.8 – Схема заміщення до точки к4

Знайдемо опір трансформатора по формулі:

$$X_{*бт} = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{100}{2,5} = 2,6.$$

Визначимо загальний опір до шин 10 кВ:

$$X_{*бК4} = X_{*бК2} + X_{*бт} = 0,402 + 2,6 = 3,002.$$

Визначимо базисний струм для точки к4:

$$I_{б4} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{ср}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}.$$

Знайдемо струм короткого замикання в точці к4:

$$I_{к4} = \frac{I_{б4}}{X_{*бК4}} = \frac{5,5}{3,002} = 1,832 \text{ кА}.$$

Знайдемо ударний струм в точці к4:

$$i_{y4} = 2{,}55 \cdot I_{к4} = 2{,}55 \cdot 1{,}832 = 4{,}67 \text{ кА};$$

$$I_{Куст4} = 1{,}52 \cdot I_{к4} = 1{,}52 \cdot 1{,}832 = 2{,}78 \text{ кА}.$$

Розрахунок струмів КЗ до точки К5, на ТВП сторона 0,4 кВ.

Схема заміщення представлена на рис. 2.9.

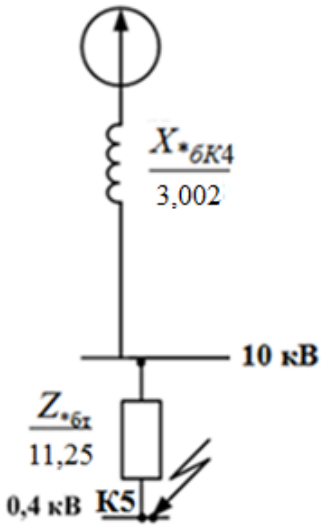



Рисунок 2.9 – Схема заміщення до точки к5

В ТВП активна і індуктивна складові опору співрозмірні.

$$Z_{*бт} = \frac{u_к}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{номтр.}} = \frac{4{,}5}{100} \cdot \frac{100}{0{,}4} = 11{,}25;$$

$$R_{*бт} = \frac{\Delta P_{кз}}{S_{номтр.}} \cdot \frac{S_б}{S_{номтр.}} = \frac{5{,}5}{400} \cdot \frac{100}{0{,}4} = 3{,}44;$$

$$X_{*бт} = \sqrt{Z_{*бт}^2 - R_{*бт}^2} = \sqrt{11{,}25^2 - 3{,}44^2} = 10{,}7;$$

$$Z_{*бт\Sigma} = \sqrt{\left(X_{*бК4} + X_{*бт}\right)^2 + R_{*бт}{}^2} = \sqrt{\left(3{,}002 + 10{,}7\right)^2 + 3{,}44^2} = 14{,}13.$$

Визначимо базисний струм для точки К5:

$$I_{б5} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_{ср}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 144,34 \text{ кА}.$$

Знайдемо струм короткого замикання в точці К5:

$$I_{к5} = \frac{I_{б5}}{Z_{*бт\Sigma}} = \frac{144,34}{14,13} = 10,22 \text{ кА}.$$

Знайдемо ударний струм в точці К5:

$$i_{у5} = 1,84 \cdot I_{к5} = 1,84 \cdot 10,22 = 18,8 \text{ кА};$$

$$I_{Куст5} = 1,52 \cdot I_{к5} = 1,52 \cdot 10,22 = 15,53 \text{ кА}.$$

Обчислимо теплові імпульси:

$$B_к = I_к{}^2 (t_{от кл} + T_a);$$

К1: $B_к = 2,76^2 (2 + 0,05) = 15,62 \text{ кА}^2\text{с};$

К2: $B_к = 3,881^2 (1,5 + 0,05) = 23,35 \text{ кА}^2\text{с};$

К3: $B_к = 3,76^2 (0,5 + 0,05) = 7,78 \text{ кА}^2\text{с};$

К4: $B_к = 1,832^2 (1,5 + 0,05) = 5,2 \text{ кА}^2\text{с};$

К5: $B_к = 10,22^2(0,5+0,05) = 57,45$ кА$^2$с.

Результати розрахунків точок к.з. заносимо в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків точок к. з.

| Точки короткого замикання | Струми короткого замикання при $S_б$=100 МВА | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $I_б$,кА | $I_к$,кА | $I_{Куст}$, кА | $i_y$, кА | $B_к$, кА$^2$с |
| К1 | 0,502 | 2,76 | 4,2 | 7,04 | 15,62 |
| К2 | 1,56 | 3,881 | 5,9 | 9,9 | 23,35 |
| К3 | 2 | 3,76 | 5,72 | 9,59 | 7,78 |
| К4 | 5,5 | 1,832 | 2,78 | 4,67 | 5,2 |
| К5 | 144,34 | 10,22 | 15,53 | 18,8 | 57,45 |

## 2.3 Розрахунок максимальних робочих струмів приєднань

Розрахунок максимальних робочих струмів зведемо до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Максимальні робочі струми приєднань

| № | Найменування збірних шин | Розрахункова формула та числова підстановка | Максимальний робочий струм |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Введення на ТП 110 кВ | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пр} \cdot S_{ш.розр.\max}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,4 \cdot 50000}{\sqrt{3} \cdot 110}$ | 367,8 А |
| 2 | Сторона ВН ТП | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,4 \cdot 25000}{\sqrt{3} \cdot 110}$ | 183,9 А |
| 3 | Сторона СН ТП | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,4 \cdot 25000}{\sqrt{3} \cdot 35}$ | 578,05 А |
| 4 | Сторона НН ТП | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,4 \cdot 25000}{\sqrt{3} \cdot 27,5}$ | 735,7 А |
| 5 | Збірні шини 27,5 кВ | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{рн} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{0,5 \cdot 50000}{\sqrt{3} \cdot 27,5}$ | 525,5 А |
| 6 | Сторона ВН РТ 35/10 | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,4 \cdot 2500}{\sqrt{3} \cdot 35}$ | 57,8 А |

Закінчення таблиці 2.3

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| 7 | Сторона НН РТ 35/10 | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot k_{рн} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1{,}4 \cdot 0{,}7 \cdot 2500}{\sqrt{3} \cdot 10}$ | 141,6 А |
| 8 | Сторона ВН ТВП | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1{,}4 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 10}$ | 32,33 А |
| 9 | Сторона НН ТВП | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1{,}4 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0{,}4}$ | 808,3 А |
| 10 | Збірні шини 35кВ | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{рн} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{0{,}5 \cdot 50000}{\sqrt{3} \cdot 35}$ | 413 А |
| 11 | Збірні шини 10кВ | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{рн} \cdot \sum S_{ш.ном.пт}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{0{,}7 \cdot 5000}{\sqrt{3} \cdot 10}$ | 202,3 А |
| 12 | Лінії ДПР | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot \sum S_{ном.ДПР}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1{,}4 \cdot 250}{2\sqrt{3} \cdot 27{,}5}$ | 7,3А |
| 13 | Фідер К.М. праве плече | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot P_{ПР}}{2\sqrt{3} \cdot \cos\varphi \cdot U_{ном}} = \frac{1{,}4 \cdot 8500}{2\sqrt{3} \cdot 0{,}85 \cdot 27{,}5}$ | 121,17 А |
| 14 | Фідер К.М. ліве плече | $I_{роб.ш.\max} = \frac{k_{пер} \cdot P_{ЛВ}}{2\sqrt{3} \cdot \cos\varphi \cdot U_{ном}} = \frac{1{,}4 \cdot 7900}{2\sqrt{3} \cdot 0{,}85 \cdot 27{,}5}$ | 117,7 А |

## 2.4 Вибір електричних апаратів вище 1000 В

Вибір вимикачів.

Вимикачі вибираються по номінальній напрузі, струму і перевіряються на властивість відключення:

$$I_{відкл.\max} \geq I_к,$$

де $I_{відкл.\max}$ - найбільше значення струму відключення по довідниковим даним, кА;

$I_к$ - струм к.з., кА.

Високовольтні вимикачі, встановлювані в розподільчому пристрої повинні відповідати таким умовам:

1) $U_{ном} \geq U_р$; 2) $I_{ном} \geq I_р$; 3) $I_{номвідкл} \geq I_к$; 4) $i_д \geq i_{уд}$; 5) $I_T^2 \cdot t_T \geq B_к$;

де $B_к = I_к^2 \cdot (t_{відкл} + T_a)$.

Приведемо приклад розрахунку для вводу 110 кВ:

$$I_T = I_{відкл}\sqrt{\frac{t_{відкл}}{t_T}} = 40\sqrt{\frac{2,58}{3}} = 37,094 \text{ кА},$$

$$B_{кдоп} = I_T^2 \cdot t_T = 37,094 \cdot 2,58 = 3550 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Подальші розрахунки та вибір вимикачів зведемо до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вибрані вимикачі

| № | Найменування приєднань | Тип вимикача | Співвідношення паспортних і розрахункових даних | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\frac{U_{ном}}{U_{роб}}$ | $\frac{I_{ном}}{I_{роб.\max}}$ | $\frac{I_д}{I_у}$ | $\frac{I_{ном.відк}}{I_к}$ | $\frac{I_T^2 t_T}{B_К}$ |
| 1 | Вводи в РУ-110 кВ | ВГТ-110 II*-40/2500 У1 | 110 | 2500 | 102 | 40 | 3550 |
| | | | 110 | 367,8 | 7,04 | 2,76 | 15,62 |
| 2 | Сторона СН ГПТ | ВР35-35-20/1250 У2 | 35 | 1250 | 52 | 20 | 2560 |
| | | | 35 | 578,1 | 9,9 | 3,881 | 23,35 |
| 3 | Сторона НН ГПТ | ВБЗО-27,5-20/1000 У1 | 27,5 | 1000 | 52 | 20 | 1200 |
| | | | 27,5 | 735,7 | 9,59 | 3,76 | 7,78 |
| 4 | Споживачі 35 кВ | ВР35-35-20/1250 У2 | 35 | 1250 | 52 | 20 | 1200 |
| | | | 35 | 18 | 9,9 | 3,881 | 23,35 |
| 5 | Споживачі 10 кВ | ВР1-10-20/630 У1 | 10 | 630 | 52 | 20 | 1200 |
| | | | 10 | 37,4 | 4,67 | 1,832 | 5,2 |
| 6 | Сторона ВН РТ 35/10 | ВР35-35-20/1250 У2 | 35 | 1250 | 52 | 20 | 1200 |
| | | | 35 | 57,8 | 9,9 | 3,881 | 23,35 |
| 7 | Фідер к.м. 27,5 кВ | ВБЗО-27,5-20/1000 У1 | 27,5 | 1000 | 52 | 20 | 1200 |
| | | | 27,5 | 121,7 | 9,59 | 3,76 | 7,78 |
| 8 | Сторона НН РТ 35/10 | ВР1-10-20/630 У1 | 10 | 630 | 52 | 20 | 1200 |
| | | | 10 | 141,6 | 4,67 | 1,832 | 5,2 |
| 9 | Сторона ВН ТВП | ВР1-10-20/630 У1 | 10 | 630 | 52 | 20 | 1200 |
| | | | 10 | 32,3 | 4,67 | 1,832 | 5,2 |

## 2.5 Проектування сонячної електростанції

Проектування сонячної електростанції виконуємо за допомогою програми PVsyst. Результати представлені на рис.2.10-рис.2.18.

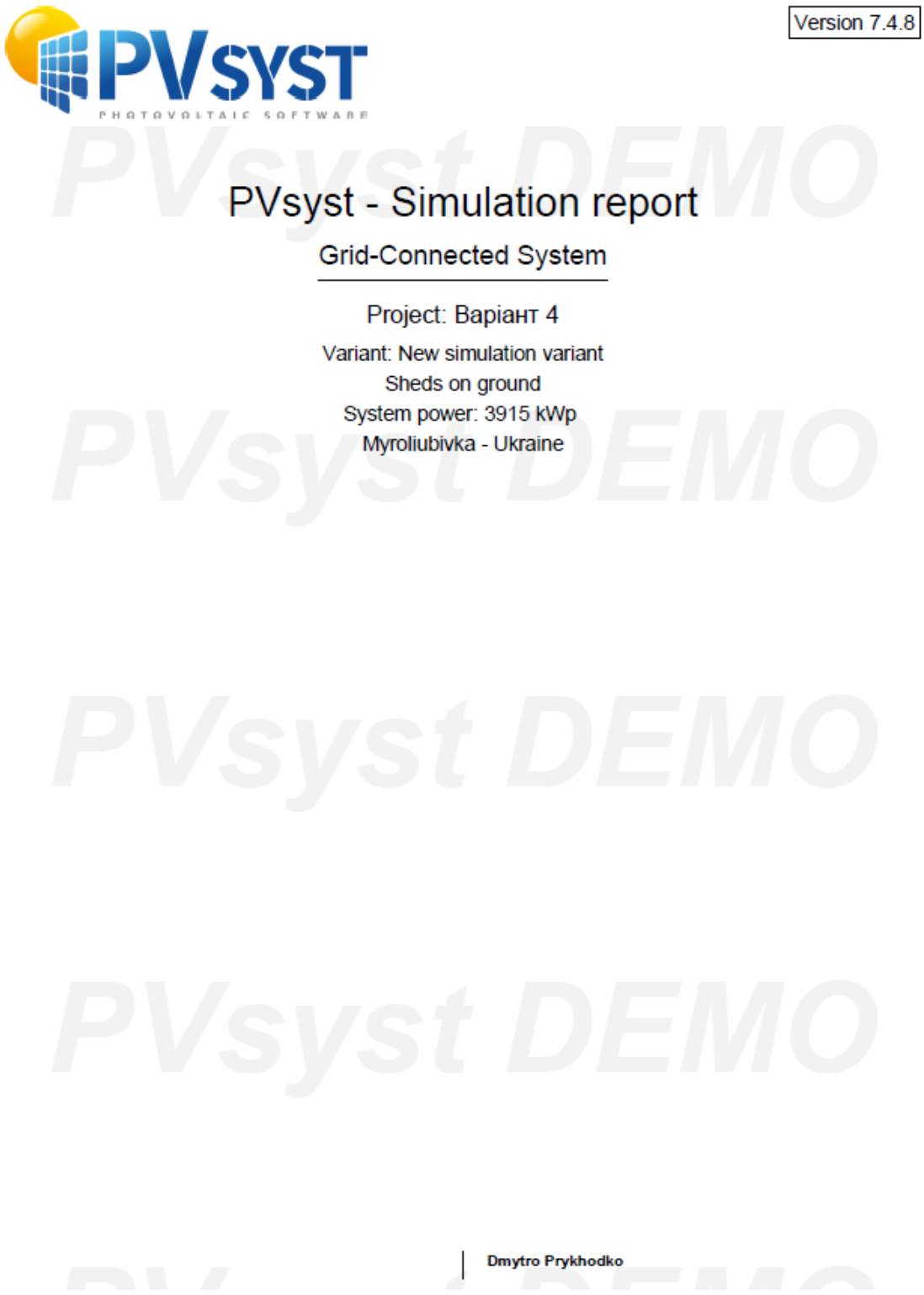



Рисунок 2.10 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

PVsyst V7.4.8
VC0, Simulation date:
09/05/25 11:43
with V7.4.8

# Project: Варіант 4

Variant: New simulation variant

UDUNT

PVsyst DEMO

## Project summary

**Geographical Site**
**Myroliubivka**
Ukraine

**Situation**

| | |
|---|---|
| Latitude | 48.42 °N |
| Longitude | 33.53 °E |
| Altitude | 135 m |
| Time zone | UTC+2 |

**Project settings**

| | |
|---|---|
| Albedo | 0.20 |

**Weather data**
Myroliubivka
Meteonorm 8.1 (1996-2015), Sat=100% - Synthetic

## System summary

**Grid-Connected System**

**Sheds on ground**

**PV Field Orientation**
Fixed plane
Tilt/Azimuth 30 / 0 °

**Near Shadings**
Linear shadings : Slow (simul.)

**User's needs**
Unlimited load (grid)

**System information**

| **PV Array** | | **Inverters** | |
|---|---|---|---|
| Nb. of modules | 7830 units | Nb. of units | 35 units |
| Pnom total | 3915 kWp | Pnom total | 3500 kWac |
| | | Pnom ratio | 1.119 |

## Results summary

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Produced Energy | 5042086 kWh/year | Specific production | 1288 kWh/kWp/year | Perf. Ratio PR | 86.07 % |

## Table of contents


Project and results summary ........ 2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses ........ 3
Near shading definition - Iso-shadings diagram ........ 5
Main results ........ 6
Loss diagram ........ 7
Predef. graphs ........ 8
P50 - P90 evaluation ........ 9




Рисунок 2.11 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

## General parameters

**Grid-Connected System**

**Sheds on ground**

**PV Field Orientation**

| Orientation | |
|---|---|
| Fixed plane | |
| Tilt/Azimuth | 30 / 0 ° |

| Sheds configuration | |
|---|---|
| Nb. of sheds | 435 units |
| **Sizes** | |
| Sheds spacing | 12.0 m |
| Collector width | 4.37 m |
| Ground Cov. Ratio (GCR) | 36.4 % |
| **Shading limit angle** | |
| Limit profile angle | 14.9 ° |

| Models used | |
|---|---|
| Transposition | Perez |
| Diffuse | Perez, Meteonorm |
| Circumsolar | separate |

**Horizon**
Free Horizon

**Near Shadings**
Linear shadings : Slow (simul.)

**User's needs**
Unlimited load (grid)

## PV Array Characteristics

**PV module**

| | |
|---|---|
| Manufacturer | Trina Solar |
| Model | TSM-DE18M-(II)-500 |
| (Original PVsyst database) | |
| Unit Nom. Power | 500 Wp |
| Number of PV modules | 7830 units |
| Nominal (STC) | 3915 kWp |
| Modules | 435 string x 18 In series |
| **At operating cond. (50°C)** | |
| Pmpp | 3564 kWp |
| U mpp | 701 V |
| I mpp | 5082 A |

**Inverter**

| | |
|---|---|
| Manufacturer | Huawei Technologies |
| Model | SUN2000-100KTL-M1-400Vac |
| (Original PVsyst database) | |
| Unit Nom. Power | 100 kWac |
| Number of inverters | 35 units |
| Total power | 3500 kWac |
| Operating voltage | 200-1000 V |
| Max. power (=>33°C) | 110 kWac |
| Pnom ratio (DC:AC) | 1.12 |
| Power sharing within this inverter | |

**Total PV power**

| | |
|---|---|
| Nominal (STC) | 3915 kWp |
| Total | 7830 modules |
| Module area | 18708 m² |

**Total inverter power**

| | |
|---|---|
| Total power | 3500 kWac |
| Max. power | 3850 kWac |
| Number of inverters | 35 units |
| Pnom ratio | 1.12 |

## Array losses

**Array Soiling Losses**
Loss Fraction 1.0 %

**Thermal Loss factor**
Module temperature according to irradiance
Uc (const) 29.0 W/m²K
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

**DC wiring losses**
Global array res. 3.0 mΩ
Loss Fraction 2.0 % at STC

**Module Quality Loss**
Loss Fraction -0.8 %

**Module mismatch losses**
Loss Fraction 2.0 % at MPP

**IAM loss factor**
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

| 0° | 30° | 50° | 60° | 70° | 75° | 80° | 85° | 90° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.000 | 0.999 | 0.987 | 0.962 | 0.892 | 0.816 | 0.681 | 0.440 | 0.000 |



Рисунок 2.12 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

## AC wiring losses

**Inv. output line up to MV transfo**

| | |
|---|---|
| Inverter voltage | 400 Vac tri |
| Loss Fraction | 1.75 % at STC |

**Inverter: SUN2000-100KTL-M1-400Vac**

| | |
|---|---|
| Wire section (35 Inv.) | Alu 35 x 3 x 185 mm² |
| Average wires length | 150 m |

**MV line up to Injection**

| | |
|---|---|
| MV Voltage | 35 kV |
| Average each inverter | |
| Wires | Alu 3 x 35 mm² |
| Length | 300 m |
| Loss Fraction | 0.04 % at STC |

## AC losses in transformers

**MV transfo**

| | |
|---|---|
| Medium voltage | 35 kV |

**One transfo parameters**

| | |
|---|---|
| Nominal power at STC | 1.92 MVA |
| Iron Loss (24/24 Connexion) | 1.75 kVA |
| Iron loss fraction | 0.09 % at STC |
| Copper loss | 38.40 kVA |
| Copper loss fraction | 2.00 % at STC |
| Coils equivalent resistance | 3 x 1.67 mΩ |

**Operating losses at STC (full system)**

| | |
|---|---|
| Nb. identical MV transfos | 2 |
| Nominal power at STC | 3.84 MVA |
| Iron loss (24/24 Connexion) | 3.49 kVA |
| Copper loss | 76.80 kVA |



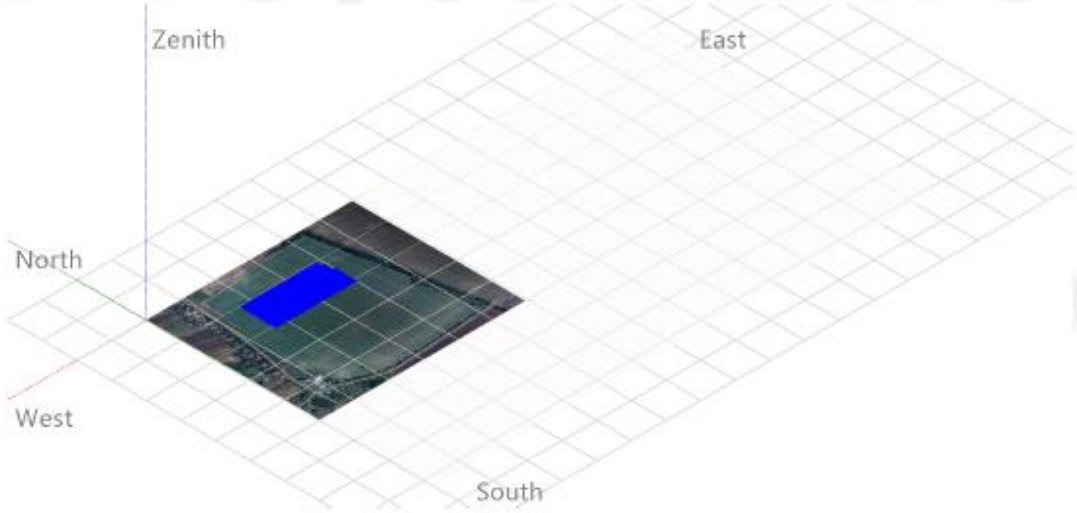
PVsyst DEMO

Рисунок 2.13 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

PVsyst DEMO

**Near shadings parameter**

**Perspective of the PV-field and surrounding shading scene**




**Iso-shadings diagram**

**Orientation #1**

**Fixed plane, Tilts/azimuths: 30°/ 0°**

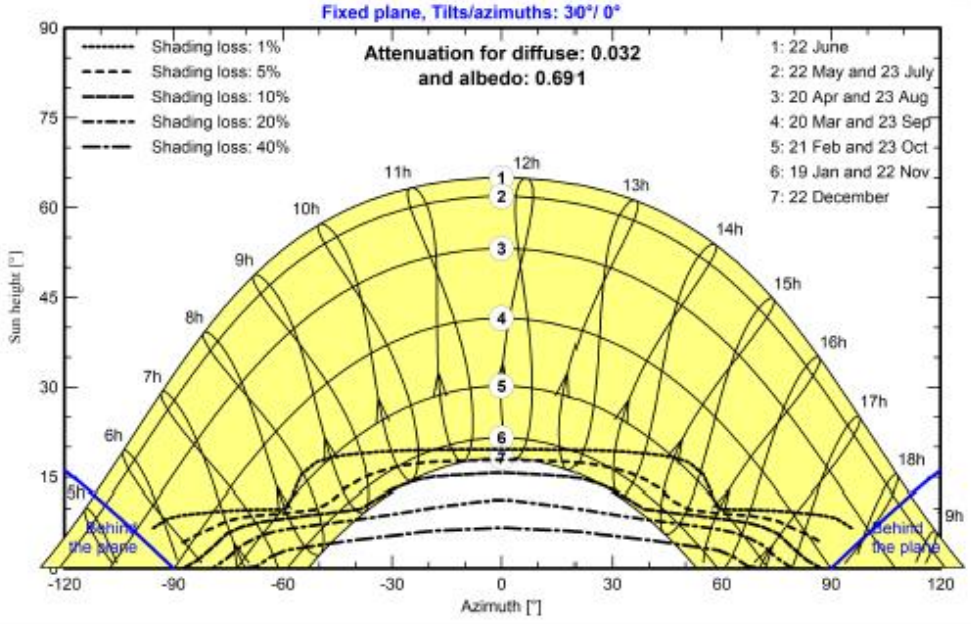





Рисунок 2.14 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

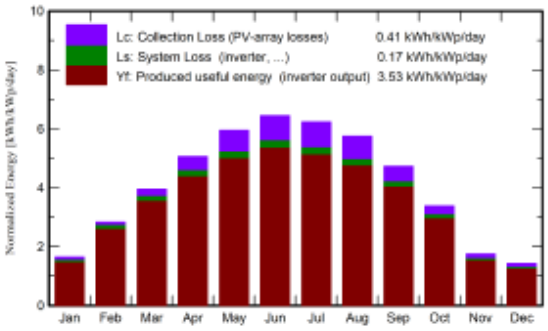
**PVsyst V7.4.8**
VC0, Simulation date:
09/05/25 11:43
with V7.4.8

## Main results

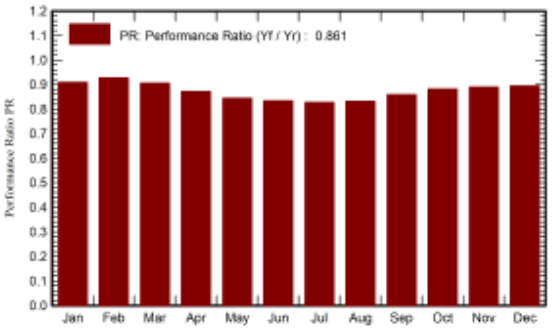
**System Production**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Produced Energy | 5042086 kWh/year | Specific production | 1288 kWh/kWp/year |
| | | Perf. Ratio PR | 86.07 % |

**Normalized productions (per installed kWp)**




**Performance Ratio PR**




**Balances and main results**

| | GlobHor kWh/m² | DiffHor kWh/m² | T_Amb °C | GlobInc kWh/m² | GlobEff kWh/m² | EArray kWh | E_Grid kWh | PR ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| January | 29.7 | 17.87 | -3.51 | 51.1 | 47.7 | 190715 | 181701 | 0.909 |
| February | 50.9 | 24.04 | -2.80 | 79.3 | 75.9 | 302252 | 288141 | 0.928 |
| March | 93.7 | 47.16 | 2.52 | 122.3 | 116.8 | 454249 | 433805 | 0.906 |
| April | 132.4 | 65.42 | 10.06 | 151.7 | 144.3 | 541943 | 517680 | 0.872 |
| May | 178.5 | 80.57 | 16.80 | 184.1 | 174.5 | 637037 | 609088 | 0.845 |
| June | 194.3 | 81.08 | 20.04 | 193.4 | 183.6 | 660867 | 631444 | 0.834 |
| July | 191.2 | 78.46 | 22.54 | 193.3 | 183.6 | 654620 | 625673 | 0.827 |
| August | 162.9 | 73.41 | 22.11 | 178.2 | 169.6 | 606221 | 579955 | 0.832 |
| September | 114.4 | 55.26 | 15.76 | 141.8 | 135.1 | 497784 | 476301 | 0.858 |
| October | 72.9 | 35.18 | 9.10 | 104.8 | 100.3 | 378727 | 361879 | 0.882 |
| November | 33.0 | 19.70 | 3.57 | 52.4 | 49.5 | 191756 | 182538 | 0.890 |
| December | 24.4 | 14.32 | -0.89 | 44.0 | 41.0 | 162207 | 153880 | 0.894 |
| Year | 1278.5 | 592.47 | 9.68 | 1496.2 | 1422.0 | 5278378 | 5042086 | 0.861 |

**Legends**

| | | | |
|---|---|---|---|
| GlobHor | Global horizontal irradiation | EArray | Effective energy at the output of the array |
| DiffHor | Horizontal diffuse irradiation | E_Grid | Energy injected into grid |
| T_Amb | Ambient Temperature | PR | Performance Ratio |
| GlobInc | Global incident in coll. plane | | |
| GlobEff | Effective Global, corr. for IAM and shadings | | |



Рисунок 2.15 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

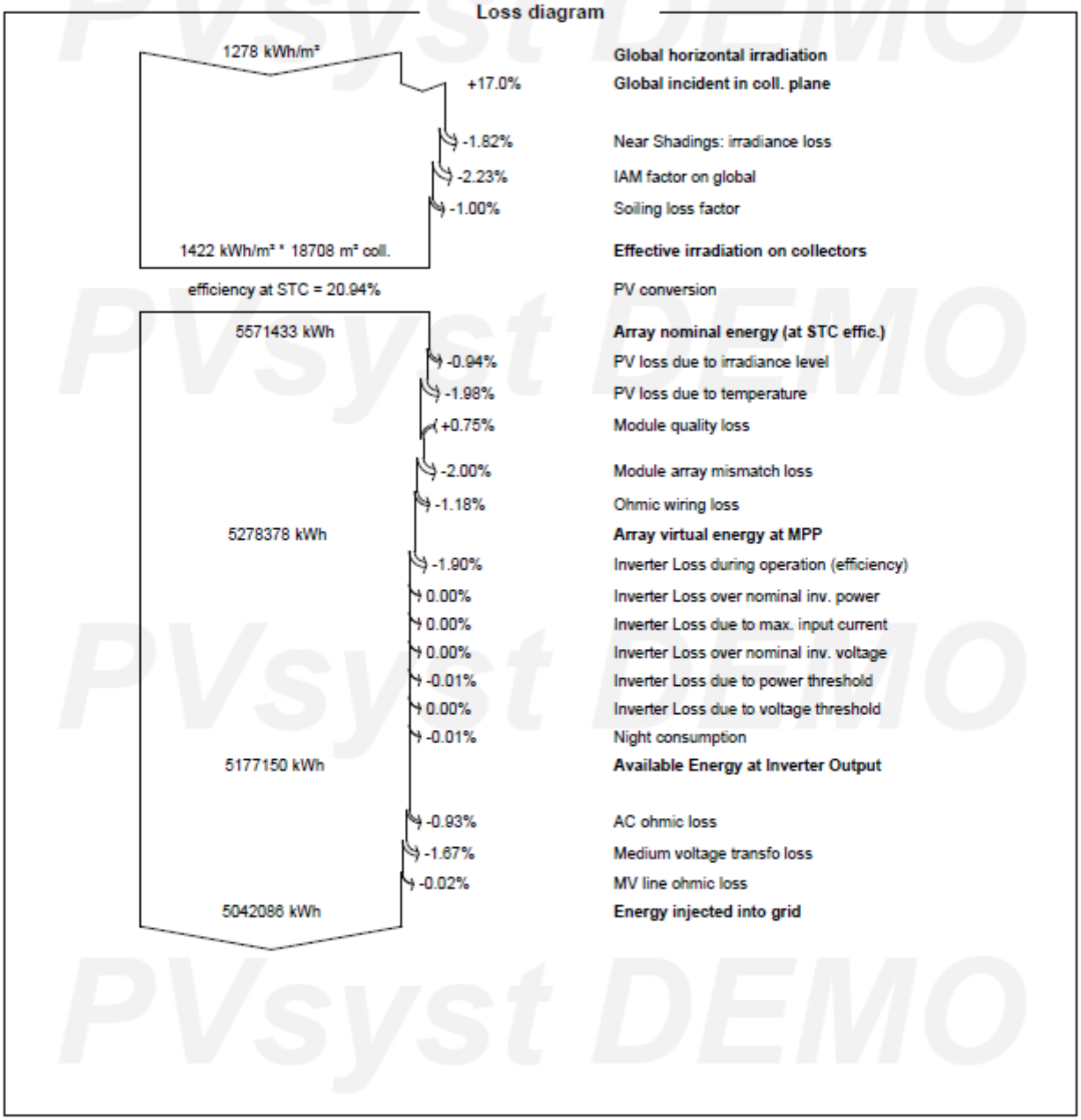


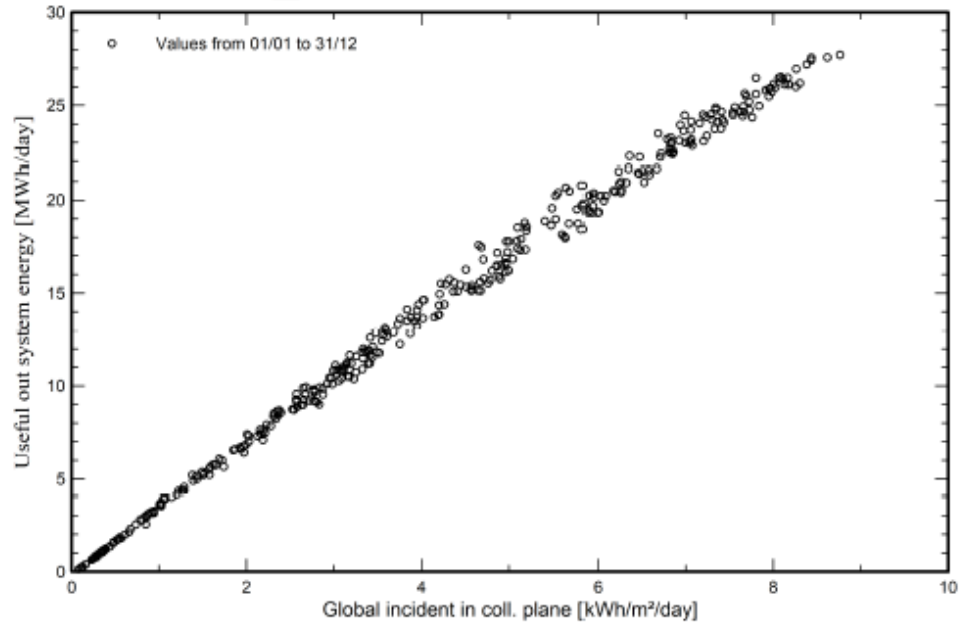



Рисунок 2.16 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

PVsyst DEMO

Predef. graphs

Daily Input/Output diagram




System Output Power Distribution

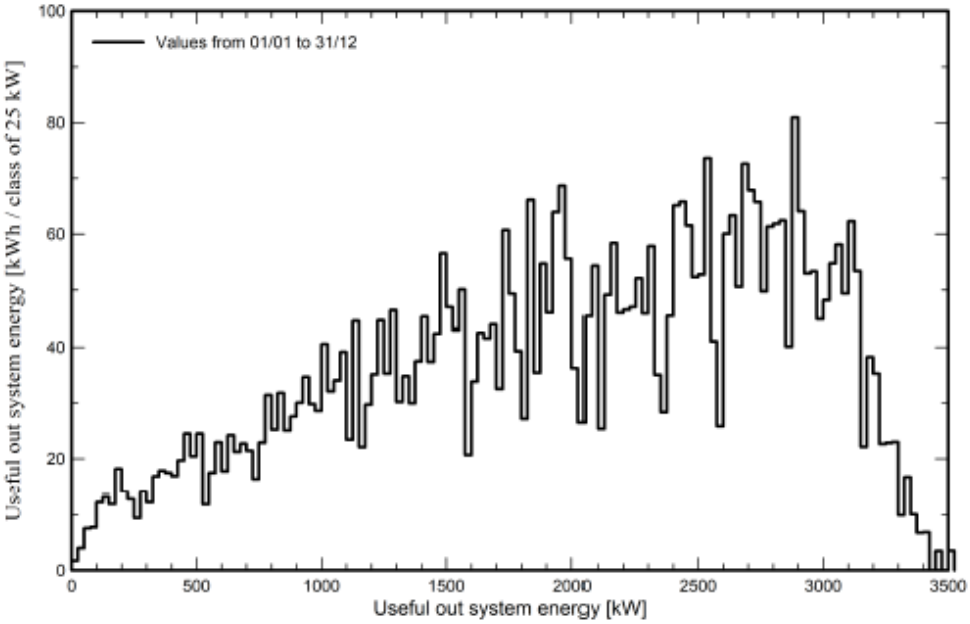





Рисунок 2.17 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

**PVsyst V7.4.8**
VC0, Simulation date:
09/05/25 11:43
with V7.4.8

## P50 - P90 evaluation

**Weather data**

| | |
|---|---|
| Source | Meteonorm 8.1 (1996-2015), Sat=100% |
| Kind | Monthly averages |
| Synthetic - Multi-year average | |
| Year-to-year variability(Variance) | -1.0 % |

**Specified Deviation**

| | |
|---|---|
| Climate change | 0.0 % |

**Global variability (weather data + system)**

| | |
|---|---|
| Variability (Quadratic sum) | 2.1 % |

**Simulation and parameters uncertainties**

| | |
|---|---|
| PV module modelling/parameters | 1.0 % |
| Inverter efficiency uncertainty | 0.5 % |
| Soiling and mismatch uncertainties | 1.0 % |
| Degradation uncertainty | 1.0 % |

**Annual production probability**

| | |
|---|---|
| Variability | 104 MWh |
| P50 | 5042 MWh |
| P90 | 4909 MWh |
| P95 | 4871 MWh |

**Probability distribution**

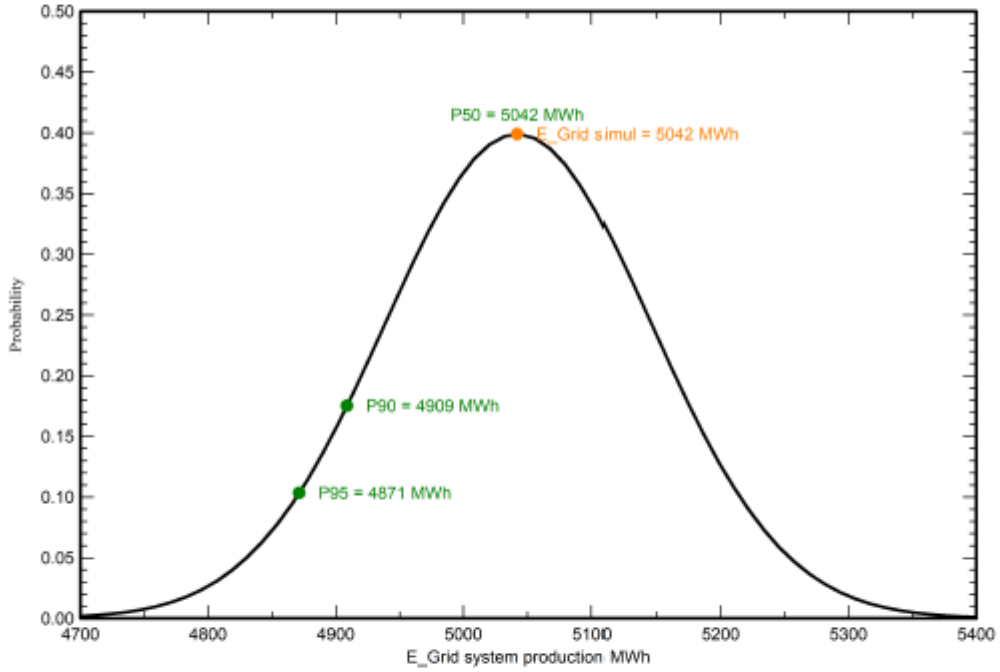





Рисунок 2.18 – Проектування сонячної електростанції в програмі PVsyst

# 3 ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ТА РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ

## 3.1 Розрахунок кабельної лінії електропересилання

Кабель з ізоляцією із зшитого поліетилену для мереж 10 кВ перевіряється за наступними показниками:

1. За допустимим тривалим струмом навантаження.
2. За допустимим струмом короткого замикання по жилі кабелю.
3. За допустимим струмом короткого замикання по екрану кабелю.
4. За падінням напруги в кінці КЛ.
5. Розрахунок вибору способу заземлення екрану кабелю.

Інші вихідні данні представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

| № вар | Напруга мережі, кВ | Максимальний струм 3-ф КЗ, кА | Повний час тривалості короткого замикання, с | Максимальна розрахункова потужність, кВт | Довжина кабельної лінії, км |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 10 | 1,832 | 0,65 | 3500 | 1,9 |

Розрахунок за тривалим струмом навантаження.

Розрахунковий робочий струм КЛ в амперах у режимі номінального навантаження, розраховується за формулою:

$$I_0 = \frac{P_{\max.c}}{\sqrt{3} \cdot U_g \cdot \cos\varphi}, \qquad (3.1)$$

де $P_{\max.c}$ - максимальна розрахункова потужність кВт;

$U_g$ - напруга мережі, кВ;

$\cos\varphi$ - кут зсуву фаз між напругою та струмом (коефіцієнт потужності).

Результати розрахунку по формулі (3.1) зводимо в таблицю 3.2.

Розрахунок виконується згідно СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49-2011 (редакція 2017 року) "Проектування кабельних ліній напругою до 330кВ".

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку струму КЛ та підбору перетину жили кабелю

| № КЛ | $P_{max.c}$, кВт | $U_g$, кВ | $\cos\varphi$ | $I_0$, А | $S$, мм² | $I_c$, А |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3500 | 10 | 0,99 | 204,1 | 95 | 221 |

Для кабелів, прокладених у землі за схемою «у трикутник» тривалий допустимий струм у амперах у заданих умовах прокладання кабелю розраховуємо за значень коригувальних коефіцієнтів, отриманих з відповідних таблиць $k_2$ (Таблиця 8.7), $k_{3з}$ (Таблиця 8.10), $k_4$ (Таблиця 8.11), $k_5$ (Таблиця 8.16) за формулою:

$$I_{cg} = I_c \cdot k_2 \cdot k_{3з} \cdot k_4 \cdot k_5 \ . \tag{3.2}$$

Результати розрахунку по формулі (3.2) зводимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку тривалого допустимого струму КЛ при прокладенні у землі за схемою в трикутник

| № КЛ | $I_c$, А | $k_2$ | $k_{3з}$ | $k_4$ | $k_5$ | $I_0$, А | $I_{cg}$, А | Виконання умови |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 221 | 0,98 | 1 | 1,18 | 1 | 204,1 | 255,6 | виконується |

Для кабелів, прокладених у землі в окремих трубах за схемою «у трикутник» тривалий допустимий струм у амперах у заданих умовах прокладання кабелю розраховуємо за значень коригувальних коефіцієнтів, отриманих з відповідних таблиць $k_1$ (Таблиця 8.6), $k_2$ (Таблиця 8.8), $k_{3з}$ (Таблиця 8.10), $k_4$ (Таблиця 8.12), $k_5$ (Таблиця 8.18) за формулою:

$$I_{cg} = I_c \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_{3з} \cdot k_4 \cdot k_5. \tag{3.3}$$

Результати розрахунку по формулі (3.3) зводимо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку тривалого допустимого струму КЛ при прокладенні в окремих трубах за схемою в трикутник

| № КЛ | $I_c$, А | $k_1$ | $k_2$ | $k_{3з}$ | $k_4$ | $k_5$ | $I_0$, А | $I_{cg}$, А | Виконання умови |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 210 | 0,928 | 0,98 | 1 | 1,13 | 1 | 204,1 | 215,8 | виконується |

Для кабелів, прокладених у повітрі (на драбинах) тривалий допустимий струм у амперах у заданих умовах прокладання кабелю розраховуємо за значень коригувальних коефіцієнтів, отриманих з відповідних таблиць $k_{зп}$ (Таблиця 8.9), $k_7$ (Таблиця 8.21) за формулою:

$$I_{cg} = I_c \cdot k_{зп} \cdot k_7. \tag{3.4}$$

Результати розрахунку по формулі (3.4) зводимо в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку тривалого допустимого струму КЛ при прокладенні у повітрі (на драбинах)

| № КЛ | $I_c$, А | $k_{зп}$ | $k_7$ | $I_0$, А | $I_{cg}$, А | Виконання умови |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 287 | 1,08 | 1 | 204,1 | 310 | виконується |

За допустимим тривалим струмом навантаження кабель перевірку проходить.

Розрахунок за допустимим струмом короткого замикання по жилі кабелю.

Перевірка відповідності обраного перетину жили КЛ, струму 3-ф КЗ на шинах живлячої ПС здійснюється за наступною умовою:

$$I_{sc}^{(3)} < I_{\text{csc}}, \tag{3.5}$$

де $I_{sc}^{(3)}$ - 3-ф струм КЗ на шинах живлячої ПС, кА;

$I_{\text{csc}}$ - допустимий струм короткого замикання по жилі кабелю з урахуванням часу спрацювання захисту, кА, розраховується за формулою:

$$I_{\text{csc}} = \frac{I_{tsc}}{\sqrt{t}}, \tag{3.6}$$

де $I_{tsc}$ - допустимий струм короткого замикання по жилі кабелю, кА (табличне значення);

*t* - час спрацювання захисту, с.

Результати розрахунку по формулі (3.6) зводимо в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунку допустимого струму короткого замикання по жилі кабелю

| № КЛ | $I_{tsc}$, кА | *t*, с | $I_{\text{csc}}$, кА | $I_{sc}^{(3)}$, кА | Виконання умови |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8,9 | 0,65 | 11,04 | 1,832 | виконується |

Розрахунок за допустимим струмом короткого замикання по екрану кабелю.

Перевірка відповідності обраного перетину екрану КЛ, струму 2-ф КЗ на шинах живлячої ПС здійснюється за наступною умовою:

$$I_{sc}^{(2)} < I_{ssc}, \tag{3.7}$$

де $I_{ssc}$ - допустимий струм короткого замикання по екрану кабелю з урахуванням часу спрацювання захисту, кА, розраховується за формулою:

$$I_{ssc} = \frac{I_{tsc}}{\sqrt{t}}, \tag{3.8}$$

де $t$ - час спрацювання захисту, с;

$I_{tsc}$ - допустимий струм короткого замикання по екрану кабелю, кА (табличне значення);

$I_{sc}^{(2)}$ - 2-ф струм КЗ на шинах живлячої ПС, кА, розраховується за формулою:

$$I_{sc}^{(2)} = I_{sc}^{(3)} \cdot 0{,}87 . \quad (3.9)$$

Результати розрахунку по формулі (3.9) зводимо в таблицю 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати розрахунку допустимого струму короткого замикання по екрану кабелю та вибору його перетину

| № КЛ | Перетин екрану, мм² | $I_{tsc}$, кА | $t$, с | $I_{ssc}$, кА | $I_{sc}^{(2)}$, кА | Виконання умови |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 25 | 5,1 | 0,65 | 6,33 | 1,59 | виконується |

Розрахунок за падінням напруги в кінці КЛ.

Розрахунок падіння напруги проводиться для підтвердження відповідності обраного перетину провідника допустимим значенням падіння напруги від джерела живлення до споживача в максимальному режимі лінії та у відповідності до ДСТУ 13109-97, ДСТУ EN 50160:2014.

Граничне падіння напруги в максимальному режимі розраховується за формулою:

$$\Delta U\,\% = \frac{10^5 \cdot P \cdot L \cdot (r_0 \cdot \cos\varphi + x_0 \cdot \sin\varphi)}{U_g^2}, \quad (3.10)$$

де $P$ - максимальна розрахункова потужність, кВт;

$L$ - довжина лінії, км;

$r_0$ - активна складова опору лінії, Ом/км;

$x_0$ - індуктивна складова опору лінії, Ом/км;

$U_g$ - напруга мережі, В.

Результати розрахунку по формулі (3.10) зводимо в таблицю 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати розрахунку падіння напруги в кінці КЛ

| № КЛ | $U_g$, В | $L$, км | $r_0$,Ом/км | $x_0$, Ом/км | $\Delta U$, В | $\Delta U$, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10000 | 1,9 | 0,411 | 0,124 | 282,21 | 2,82 |

Розрахунок вибору способу заземлення екрану кабелю.

Для унеможливлення значних втрат електроенергії в струмопровідних екранах кабелів під час експлуатації КЛ в якості способу заземлення екрану кабелю обрано заземлення екрану з одного кінця КЛ.

Розрахунок проводиться для таких режимів роботи КЛ:

- нормального (трифазного);
- зовнішнього КЗ із найбільшим струмом;
- ремонтного (за наявності паралельно прокладених КЛ або кіл тієї ж самої КЛ).

Наведена напруга на незаземленому кінці екрану не повинна перевищувати допустимого діючого значення напруги змінного струму, що становить 70% значення випробувальної напруги постійного струму для оболонки кабелю.

**У** разі нормального трифазного режиму роботи КЛ, наведена напруга на незаземленому кінці екрану визначається за формулою:

$$U_1^{(3)} = I_0 \cdot L \cdot X_{m1}, \tag{3.11}$$

де $X_{m1}$ - погонний індуктивний опір екрану кабелю, Ом/км, розраховується за формулою:

$$X_{m1} = 0{,}0628 \cdot \gamma_1, \tag{3.12}$$

де $\gamma_1$ - безрозмірний параметр впливу конфігурації взаємного розташування жил і екранів кабелів у просторі, який розраховуються за формулою:

$$\gamma_1 = 0{,}5 \cdot \ln\left(\beta^2 \cdot \sqrt{\left(1+\left(\sqrt{3}+\frac{1}{\beta}\right)^2\right)\cdot\left(1+\frac{1}{\beta^2}\right)}\right), \quad (3.13)$$

де $\beta$ - безрозмірний параметр, який визначається як відношення відстані між центрами жил кабелів до зовнішнього діаметру.

У разі зовнішнього КЗ із найбільшим струмом, наведена напруга на незаземленому кінці екрану визначається за формулою:

$$U_2 = I_{sc} \cdot L \cdot X_{m2}, \quad (3.14)$$

де $X_{m2}$ - погонний індуктивний опір екрану кабелю, Ом/км, розраховується за формулою:

$$X_{m2} = 0{,}0628 \cdot \gamma_2, \quad (3.15)$$

де $\gamma_2$ - безрозмірний параметр впливу конфігурації взаємного розташування жил і екранів кабелів у просторі, який розраховуються за формулою:

$$\gamma_2 = 4{,}725 + 0{,}5 \cdot \ln \rho - \ln(0{,}5 \cdot D), \quad (3.16)$$

де $\rho$ - питомий електричний опір, який за замовчуванням приймається рівним 1000 Ом·м.

У разі ремонтного - за наявності паралельно прокладених КЛ або кіл тієї ж самої КЛ, наведена напруга на незаземленому кінці екрану не має бути більшою за 24 В, визначається за формулою:

$$U_3 = I_0 \cdot L \cdot X_{m3}, \tag{3.17}$$

де $X_{m3}$ - погонний індуктивний опір екрану кабелю, Ом/км, розраховується за формулою:

$$X_{m3} = 0{,}0628 \cdot \gamma_3, \tag{3.18}$$

де $\gamma_3$ - безрозмірний параметр впливу конфігурації взаємного розташування жил і екранів кабелів у просторі, який розраховуються за формулою:

$$\gamma_3 = \ln\left(\frac{0{,}87 \cdot \beta + \alpha + 0{,}5}{0{,}25 \cdot \beta^2 + (0{,}5 + \alpha)^2}\right), \tag{3.19}$$

де α - безрозмірний параметр, який визначається як відношення найменшої відстані між двома КЛ до діаметру кабелю.

Результати розрахунку по формулам (3.11)-(3.19) зводимо в таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати розрахунку вибору способу заземлення екрану кабелю

| № КЛ | $I_0$, А | L, км | $\gamma_1$ | $U_1^{(3)}$, В | $\gamma_2$ | $U_2$, В | $\gamma_3$ | $U_3$, В | Виконання умови |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 204,1 | 1,9 | 0,7 | 1,51 | 12,4 | 2,72 | 0,22 | 5,43 | виконується |

Для захисту оболонки кабелю при заземленні з одного кінця оберемо ОПН за розрахунком наведеної напруги на кінці екрану кабелю, з урахуванням тривалості режиму зовнішнього КЗ. ОПН обирають за умовою, що наведена напруга на незаземленому кінці екрану не повинна перевищувати допустимого діючого значення напруги змінного струму, що становить 70% значення випробувальної напруги постійного струму для оболонки кабелю.

Захист зовнішньої ізоляційної оболонки кабелю за допомогою ОПН можливий за виконання умов:

$$U_1^{(3)} < U_{1t.v},$$

$$U_2 < U_{1t.v} \cdot T(t_{sc}),$$

де $U_{1t.v}$ - тривало допустима напруга ОПН, кВ.

$T(t_{sc})$- кратність напруги (приймаємо 1,8).

Умова виконується, обираємо обмежувач перенапруги на 6 кВ.

### 3.2 Вибір параметрів релейного захисту кабельної лінії

Вихідні дані для розрахунку короткого замикання на СЕС:

1. Однолінійна схема СЕС (Р=3,5 МВт)
2. Розрахункова напруга на шинах 10 кВ - 10,5 кВ
3. Трансформатор ТМГ-1000/10/0,4 кВ (uк =6 %)
4. Повна потужність інверторного обладнання – 2 МВА
5. Довжина кабельної лінії – 1,9 км
6. Струм трифазного короткого замикання в максимальному режимі на шинах 10 кВ ПС 35/10 кВ - 1,832 кА.
7. В якості провідників для розрахунку струму короткого замикання на шинах проектованої СЕС прийнято 3хСІП-3-20 1х50 мм та кабель 3хАПвЕгаПу-12/20 1х120/25 мм, прокладка в трикутник
8. Довжина КЛ-10 кВ – 1900 м.

Розрахунок опорів схеми заміщення в максимальному режимі роботи системи.

Опір системи:

$$z_C \approx x_c = \frac{U_н}{\sqrt{3} \cdot I_{кз}^{(3)}}, \text{ Ом} \quad (3.20)$$

Опір повітряно-кабельної лінії.

Активна складова:

$$r_л = r_0 \cdot \ell_л, \text{ Ом} \quad (3.21)$$

Реактивна складова:

$$x_л = x_0 \cdot \ell_л, \text{ Ом} \quad (3.22)$$

Сумарний опір до розрахункової точки К2:

$$z_{К2} = \sqrt{z_c^2 + (r_л + x_л)^2}, \text{ Ом}, \quad (3.23)$$

Опір трансформатора:

$$z_m \approx x_m = \frac{u_к \cdot U_н^2}{100 \cdot S_{ном}}, \text{ Ом} \quad (3.24)$$

Сумарний опір до розрахункової точки К3:

$$z_{К3} = z_{К2} + z_m, \text{ Ом} \quad (3.25)$$

Результати розрахунку по формулам (3.21)-(3.25) зводимо в таблицю 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати розрахунків опорів схеми заміщення в максимальному режимі роботи системи

| $z_C$, Ом | $r_л$, Ом | $x_л$, Ом | $z_{К2}$, Ом | $z_m$, Ом | $z_{К3}$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|
| 3,31 | 1,56 | 0,28 | 3,787 | 6,615 | 10,402 |

Розрахунок струмів короткого замикання в розрахункових точках в максимальному роботи системи.

Розрахункова точка К1.

Струм КЗ в розрахунковій точці К1 приймаємо рівним струму короткого замикання на шинах 10 кВ ПС 35/10 кВ - $I_{К1}^{(3)}$ = 1,832 кА.

Розрахункова точка К2.

Струм КЗ питомий зі сторони ПС 35/10 кВ в точці К2

$$I_{К2ПС}^{(3)} = \frac{U_н}{\sqrt{3} \cdot z_{К2}}. \quad (3.26)$$

Струм КЗ питомий зі сторони СЕС приведений до сторони 10 кВ

$$I_{КСЕС}^{(3)} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_н}. \quad (3.27)$$

Сумарний струм КЗ в точці К2

$$I_{К2}^{(3)} = I_{К2ПС}^{(3)} + I_{КСЕС}^{(3)}. \quad (3.28)$$

Розрахункова точка К3.

Струм КЗ питомий зі сторони ПС 35/10 кВ в точці К3 – на шинах 0,4 кВ СЕС, приведений до сторони 10 кВ:

$$I_{K3ПС}^{(3)} = \frac{U_н}{\sqrt{3} \cdot z_{K3}}. \quad (3.29)$$

Сумарний струм КЗ в точці К3:

$$I_{K3}^{(3)} = I_{K3ПС}^{(3)} + I_{KCEC}^{(3)}. \quad (3.30)$$

Результати розрахунку по формулам (3.26)-(3.30) зводимо в таблицю 3.11 та таблицю 3.12.

Таблиця 3.11 – Результати розрахунків трифазних струмів КЗ в максимальному режимі роботи системи

| $I_{K1}^{(3)}$,кА | $I_{K2ПС}^{(3)}$, кА | $I_{KCEC}^{(3)}$, кА | $I_{K2}^{(3)}$, кА | $I_{K3ПС}^{(3)}$, кА | $I_{K3}^{(3)}$, кА |
|---|---|---|---|---|---|
| 1,832 | 1,601 | 0,192 | 1,793 | 0,583 | 0,775 |

Таблиця 3.12 – Результати розрахунків двофазних струмів КЗ в максимальному режимі роботи системи

| $I_{K1}^{(2)}$,кА | $I_{K2ПС}^{(2)}$, кА | $I_{KCEC}^{(2)}$, кА | $I_{K2}^{(2)}$, кА | $I_{K3ПС}^{(2)}$, кА | $I_{K3}^{(2)}$, кА |
|---|---|---|---|---|---|
| 1,594 | 1,393 | 0,167 | 1,56 | 0,507 | 0,674 |

Розрахунок уставок спрацювання захисту.

Вихідні дані для розрахунку уставок спрацювання захисту:

1.Допустимий робочий струм $I_{доп}$ = 46,19 А

2.Струми короткого замикання

I ст. СВ (струмова відсічка)

Струм спрацювання захисту обирається за умовами:

- відстроювання від стрибка струму намагнічення трансформатору КТП 1000/10/0,4 У1 при наявності напруги в лінії.

Максимальна величина струму при включенні може скласти $I_{БТН} = (3...5) \cdot I_{ном.тр}$.

Приймаємо коефіцієнт відстроювання захисту $k_{від}$ = 1,2.

Номінальний струм трансформатору:

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}. \quad (3.31)$$

Струм спрацювання захисту:

$$I_{с.з.} = k_{від} \cdot I_{БТН} \cdot I_{ном}. \quad (3.32)$$

Результати розрахунку по формулам (3.31)-(3.32) зводимо в таблицю 3.13.

Таблиця 3.13 – Результати розрахунку відстроювання від струму намагнічування трансформатору

| $I_{ном}$,А | $I_{сз\min}$,**А** | $I_{сз\max}$,А | $I_{сз}$, А для відстроювання |
|---|---|---|---|
| 54,99 | 197,96 | 329,94 | 330 |

- відстроювання від струму трифазного КЗ на шинах 0,4 кВ КТП 1000/10/0,4 У1, приведеного до напруги 10,5 кВ.

Струм спрацювання захисту:

$$I_{с.з.} = k_{від} \cdot I_{КЗ}^{(3)}. \quad (3.33)$$

Струм уставки:

$$I_{у} = \frac{k_{сх} \cdot I_{с.з.}}{k_{ТА}}. \quad (3.34)$$

Коефіцієнт чутливості при двофазному КЗ на шинах 10 кВ КТП 1000/10/0,4 У1:

$$k_ч = \frac{k_{сх} \cdot I_{К2}^{(3)}}{I_{с.з.}}. \quad (3.35)$$

Результати розрахунку по формулам (3.33)-(3.35) зводимо в таблицю 3.14.

Таблиця 3.14 – Результати розрахунку відстроювання від струму трифазного КЗ на шинах 0,4 кВ, приведеного до напруги 10,5 кВ

| $I_{с.з.}$, А | $I_у$, А | $k_ч$ |
|---|---|---|
| 930 | 31 | 1,93 |

У відповідності п. 3.2.26 ПУЕ-2017 найменші коефіцієнти для резервних захистів у разі КЗ у кінці суміжного елемента або найбільш віддаленого з декількох послідовних елементів, які входять до зони резервування мають бути близькими до 1,2.

Умова забезпечення чутливості захисту виконується.

Витримку часу спрацьовування першого ступеню захисту ВС для забезпечення швидкого відключення приймаємо рівній мінімально можливому значенню – менше 0,1 с.

II ст. МСЗ (максимальний струмовий захист)

Струм спрацювання захисту

$$I_{с.з.} = \frac{k_н \cdot k_{від} \cdot I_{доп}}{k_п}. \quad (3.36)$$

де $k_н$ - коефіцієнт надійності (1,1);

$k_{від}$ - коефіцієнт відстроювання захисту (1,2);

$k_п$ - коефіцієнт повернення (0,95).

Струм уставки:

$$I_y = \frac{k_{сх} \cdot I_{с.з.}}{k_{TA}}. \quad (3.37)$$

Коефіцієнт чутливості при двофазному КЗ на шинах 10 кВ КТП 1000/10/0,4 У1:

$$k_ч = \frac{I_{К2}^{(3)}}{I_{с.з.}}. \quad (3.38)$$

Результати розрахунку по формулам (3.36)-(3.38) зводимо в таблицю 3.15.

Таблиця 3.15 – Результати розрахунку відстроювання від струму трифазного КЗ на шинах 0,4 кВ, приведеного до напруги 10,5 кВ

| $I_{с.з.}$, А | $I_y$, А | $I_{сз}$, А для відстроювання | $k_ч$ |
|---|---|---|---|
| 76,4 | 7,64 | 80 | 9,8 |

Умова забезпечення чутливості захисту виконується.

Витримку часу спрацьовування максимального струмового захисту приймаємо рівній значенню 0,5 с. Зведену інформацію про уставки заносимо в таблицю 3.16.

Таблиця 3.16 – Зведена інформація про уставки

| Назва | Величина |
|---|---|
| Уставка СВ1, А | 330 |
| Витримка часу СВ1, с | <0,1 |
| Уставка МЗС2, А | 80 |
| Витримка часу МЗС2, с | 0,5 |
| Уставка ЗНЗ, А | 3 |
| Витримка часу ЗНЗ на подачу сигналу, с | 9 |

Розрахунок ємнісних струмів.

Ємнісний погонний струм замикання на землю в місці пошкодження

$$I_C = 3 \cdot \omega \cdot C_ф \cdot U_ф \cdot 10^{-6}, \quad (3.39)$$

де $\omega$ - кутова швидкість вектору напруги, с ;

$C_ф$ - ємність фази мережі, мкФ;

$U_ф$ - фазна напруга мережі, В.

Ємнісний струм замикання на землю в місці пошкодження для розглядуваної кабельної лінії

$$I_{СКЛ} = I_C \cdot \ell_{КЛ}. \quad (3.40)$$

Результати розрахунку по формулам (3.39)-(3.40) зводимо в таблицю 3.17.

Таблиця 3.17 – Результати розрахунку ємнісних струмів

| $C_{фКЛ}$ ,мкФ | $\omega$, с$^{-1}$ | $U_ф$,В | $I_C$, А/км | $I_{СКЛ}$, А |
|---|---|---|---|---|
| 0,229 | 314 | 6062,18 | 1,308 | 2,485 |

У відповідності з ГКД 34.20.172-95 «Типова інструкція по компенсації ємнісного струму замикання на землю в електричних мережах 6-35 кВ» компенсація повинна застосовуватись в кабельних мережах 10 кВ при значеннях ємнісного струму більше 20 А. Оскільки сумарний ємнісний струм замикання на землю мереж 10 кВ СЕС не перевищує даного значення, встановлення пристроїв компенсації ємнісних струмів не передбачається.

Функціонування інверторного обладнання.

Контролер виконує наступні функції автоматики та захисту (згідно керівництва по експлуатації):

- моніторинг параметрів вхідної напруги постійного струму та вихідної напруги змінного струму;

- контроль технологічних параметрів інвертора;

- контроль реактивної потужності;

- контроль активної потужності;

- інтерфейс заземлення;

- відхилення напруги/частоти;

- максимальний струмовий захист;

- захист від min/max частоти;

- захист від перенапруги (при перевищенні напруги змінного струму (значення встановленої уставки) інверторне обладнання блокує видачу потужності в мережу. Уставку спрацювання захисту від підвищення напруги обираємо виходячи з умови недопущення підвищення напруги більш ніж на 10 %;

- відключення від електророзподільної мережі протягом 2 с в разі переривання напруги в електророзподільної мережі;

- після відключення в результаті відхилення від норми параметрів електророзподільної мережі фотоелектрична система не повинна бути повторно підключена до мережі протягом інтервалу часу від 20 с до 5 хв з моменту відновлення нормальних значень напруги і частоти.

Контролер інверторного обладнання виконує функції синхронізації з мережею, контроль параметрів якості напруги, релейного захисту при нормальних, аварійних та післяаварійних режимах роботи. В нормальному режимі інверторне обладнання вмикається в роботу автоматично за наявності відповідної інтенсивності освітлення та наявності напруги в мережі, синхронізуючись з її параметрами. При аварійних ситуаціях і зниженні напруги в мережі інверторне обладнання відключається.

Таким чином, встановлене на СЕС інверторне обладнання запобігає несинхронному включенню в мережу.

# ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

## Акумуляторні батареї

### 4.1 Призначення та основні типи

Електричний акумулятор це хімічне джерело електричного струму багаторазової дії, основна специфіка якого полягає в зворотності внутрішніх хімічних процесів, що забезпечує його багаторазове циклічне використання (через заряд-розряд) для накопичення електричної енергії та автономного електроживлення різноманітних електротехнічних пристроїв та систем. Електричний акумулятор належить до категорії вторинних хімічних джерел струму.

Принцип дії акумулятора заснований на зворотності хімічної реакції. Найпоширеніші електричні акумулятори накопичують хімічну енергію (внаслідок зворотних хімічних реакцій між речовиною електродів та електролітом), і віддають електричну енергію, будучи гальванічними елементами. Працездатність акумулятора може бути відновлена шляхом заряду, тобто пропусканням електричного струму в напрямку, зворотному напрямку струму при розряді: на від'ємному електроді (катоді) реакція окиснення замінюється реакцією відновлення, а на позитивному електроді (аноді) реакція відновлення змінюється на реакцію окиснення.

Акумулятор, як і будь-яке хімічне джерело струму, складається з позитивного і негативного електродів та електроліту, в який вони занурені. Різниця потенціалів, що виникають на межі стикання електродів з електролітом, утворює ЕРС акумулятора (або напругу акумулятора при розімкнутому колі). Під час розряду акумулятора енергія хімічних реакцій перетворюється на електричну енергію; при зарядці, навпаки, електрична енергія перетворюється на хімічну.

Електричні та експлуатаційні характеристики акумулятора залежать від матеріалу електродів і складу електроліту.

На сьогоднішній день найбільш популярні кислотні (свинцеві), лужні та літій-іонні акумулятори.

За складом електродів (активної маси) лужні акумулятори поділяють на: кадмій-нікелеві; залізо-нікелеві; цинк-нікелеві; срібло-цинкові.

Найбільш поширеними акумуляторними батареями є свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, нікель-метал-гідридні та літій-іонні, усередненні характеристики яких представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики акумуляторів

| Тип | Номінальна напруга | Щільність енергії | | Потужність | ККД | Саморозряд | Кількість циклів розряду | Тривалість використання |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | В | Вт·год/кг | Вт·год/л | Вт/кг | % | %/міс | | років |
| Кислотний | 2,1 | 30-60 | 60-75 | 180 | 70-92 | 3-4 | 500-800 | 4-5 (автомобільний акумулятор), 20 (стаціонарний) |
| Ni-залізо | 1,2 | 50 | 350 | 100 | 65 | 20 -40 | Не впливає | 20-50 |
| Ni-кадмій | 1,2 | 45-65 | 50-150 | 150 | 70-90 | 10 | 900-1500 | 10-20 |
| NiMH | 1,2 | 30-80 | 140-300 | 250-1000 | 66 | 20 | 1000 | 3-5 |
| Ni-цинк | 1,7 | 60 | 170 | 900 | 80 | 3-10 | 250-500 | 5 |
| Li-іонний | 3,6 | 160 | 270 | 1800 | 99,9 | 4-10 | 1200 | 3-10 |

### 4.2 Особливості свинцево-кислотних акумуляторних батарей

Свинцево-кислотні акумулятори це найстаріша електрохімічна система для батарей, що перезаряджаються. Свинцево-кислотні батареї надійні, невибагливі та економічні. Електрорушійна сила зарядженого акумулятора складає 2,1-2,3 В, а розрядженого 1,7-1,8 В. ККД даного типу акумуляторів складає до 80%

при саморозряді на добу 1-2%. Термін служби (кількість циклів заряд-розряд) 500-800.

До недоліків відноситься низька питома енергоємність та обмежений цикл життя. У зв'язку з тим, що свинець є токсичним, ці акумулятори потребують спеціальної утилізації.

Хоча свинцево-кислотний акумулятор може мати найвищу ємність при температурах понад 30°C, але тривала експлуатація при таких умовах скорочує функціональність акумулятора.

В залежності від потрібної напруги і загальної ємності дані акумулятори збирають з кількох елементів. Тому у більшості випадків акумулятор виконується у вигляді послідовного (або паралельного) з'єднання кількох «елементів» – кожен з яких має напругу у 2 В і складається з кількох груп свинцевих пластин вкритих окисом свинцю і кислотою. Свинцеву решітку покриту окисом свинцю називають пластиною. Кожен свинцевий елемент, який є групою пластин, має по дві клеми на позитивній стороні елемента, і на негативній. Пластини елемента акумулятора виконують зі свинцю і його двоокису, а роль електроліту належить сірчаній кислоті. Пластини з металевого свинцю мають негативний заряд, а пластини, покриті двоокисом (перекисом) свинцю – позитивний заряд. Пластини чергують таким чином, щоб між пластинами зі свинцю розташовувалися пластини з покриттям з двоокису свинцю. Щоб запобігти короткому замиканню між позитивними і негативними пластинами через фізичний контакт їх розмежовують сеператорами у вигляді листів або загортають у матеріал з волокнами скловолокна, а потім у пластикову оболонку. Пластини поміщають в контейнер (зазвичай з пластика) і заливають водним розчином кислоти.

Акумулятори мають аварійний клапан через який у небезпечних ситуаціях скидається надлишок газу (так званий «герметизований акумулятор»).

У гель-свинцевих акумуляторах застосовують гелеподібний електроліт.

Під час розряду акумулятора в результаті реакції відбувається вихід води, а на пластинах обох типів утворюється сірчанокислий свинець. Через

розбавлення водою розчину сірчаної кислоти падає її концентрація і різниця потенціалів між виводами. Оскільки сірчанокислий свинець володіє низькою питомою провідністю – зростає внутрішній опір акумулятора.

### 4.2.1 Загальна характеристика акумуляторної батареї тягових підстанцій

На тягових підстанціях передбачається установка тільки свинцево-кислотних акумуляторів. Свинцево-кислотний одиничний акумуляторний елемент складається з наступних основних частин: позитивні й негативні пластини, прокладки - сепаратори що ізолюють, посудина та електроліт. Активними речовинами, що беруть участь в електролітичних реакціях, є перекис свинцю $PbO_2$ на позитивних пластинах, губчатий свинець $Pb$ на негативних пластинах і розчин сірчаної кислоти у воді (рис. 4.1).

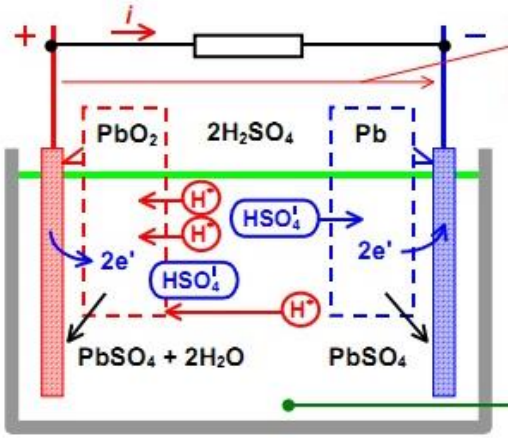



Рисунок 4.1 – Принцип роботи свинцево-кислотної акумуляторної батареї

Перекис свинцю та губчатий свинець мають кристалічну будову й не міцні, вони втримуються на основі у вигляді пластини або каркаса зі свинцю або сплаву свинцю із сурмою. Пластини кожної полярності спаюються сполучними смугами у дві ізольовані групи. Для запобігання виникнення к. з. між позитивними й негативними пластинами поміщають ізолюючі прокладки – сепаратори. Пластини поміщають у посудині так, щоб вони не торкалися його

дна, тому що в противному випадку при випаданні активної маси на дно посудини між ними також відбудеться к. з.

Ємність акумулятора визначається кількістю електрики $Q_{розр}$(А·год) яке можна одержати від зарядженого акумулятора при повному його розряді за час $t_{розр}$ (год) при струмі $I_{розр}$(А):

$$Q_{розр} = I_{розр} \cdot t_{розр}.$$

Номінальна ємність акумуляторного елемента – ємність при 10 годинному розряді. Тобто ємність елемента – величина змінна, залежна від розрядного струму. Зі збільшенням розрядного струму ємність зменшується й навпаки.

Ємність акумуляторних батарей, зібраних з одиничних елементів, визначається сумарною ємністю всіх позитивних пластин у банку.

Число послідовно з'єднаних банок - елементів у батареї визначається напругою одного елемента й напругою, що необхідна для акумуляторної батареї. З'єднані паралельно - послідовно елементи акумуляторної батареї заливають електролітом і піддають електрохімічній обробці, у результаті чого в заряджених позитивних пластин утвориться перекис свинцю $PbO_2$, а в негативних – губчатий свинець $Pb$. Процес заряду й розряду акумуляторної батареї представляє зворотну реакцію:

$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb \leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O.$$

При розряді на обох пластинах утворюється сірчанокисле з'єднання свинцю $PbSO_4$ і виділяється вільна вода, що знижує концентрацію електроліту. Реакція заряду відбувається при проходженні струму через акумуляторну батарею від стороннього джерела постійного струму, підключеного до затискачів батареї однойменної полярності. Заряд вважається закінченим, якщо при не відключеному заряджаючому джерелі живлення напруга на елементі

встановилась рівною зарядній напрузі для даного типу акумуляторів. Розряд акумуляторної батареї допускається до напруги на елементі для даного типу акумуляторів.

### 4.2.2 Типи акумуляторних батарей, застосовуваних на тягових підстанціях

На існуючих тягових підстанціях застосовують відкриті акумулятори типу СК Рисунок 4.2 (С - стаціонарні, К - для коротких розрядів).

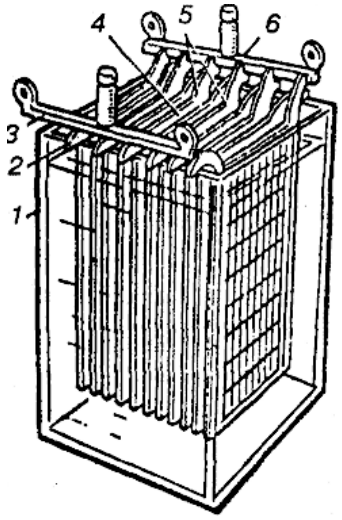



Рисунок 4.2 – Свинцево-кислотний акумулятор типу СК

Свинцево-кислотний акумулятор типу СК складається з позитивних 4 і негативних 5 пластин, поміщених у посудину 1 з електролітом. Кожна позитивна пластина 4 поміщена між двома негативними 5. Середні позитивні й негативні пластини мають по дві активні сторони, а крайні негативні – тільки одну активну сторону. Це роблять із метою створення однакових умов роботи позитивних пластин. Таким чином, число негативних пластин завжди на одну більше позитивних. Пластини кожної полярності об’єднують сполучними смугами 3 і 6 у дві ізольовані групи й виступами 2 вільно обпираються на краї посудин.

На нових споруджуваних та реконструйованих тягових підстанціях як джерело постійного оперативного струму передбачають закриті акумуляторні батареї.

Класичні свинцево-кислотні акумулятори серії OPzS відноситься до класу свинцево-кислотних батарей з рідким електролітом, виготовляють як у вигляді моноблоків, так і окремих елементів, представлених на рисунку 4.3.

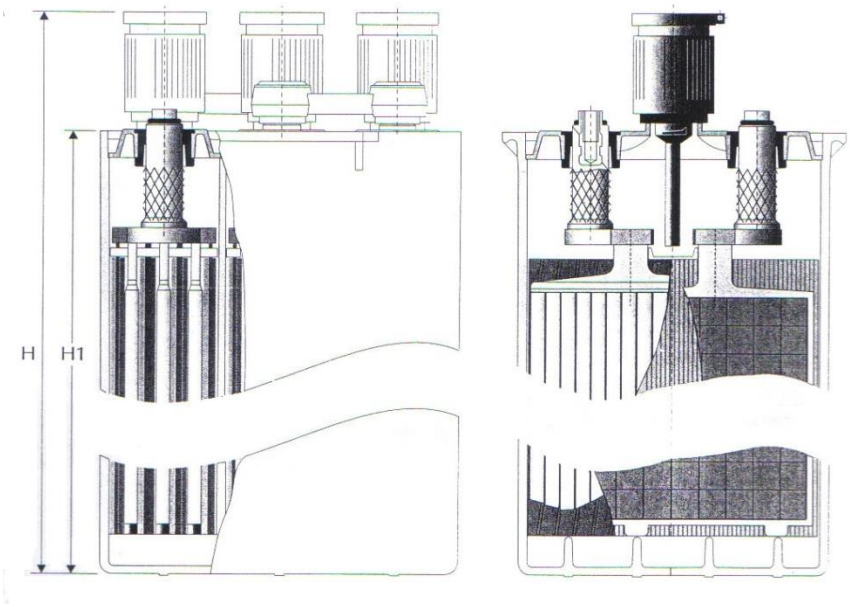



Рисунок 4.3 – Свинцево-кислотний акумулятор OPzS

Позитивний електрод батареї типу *OPzS* – трубчаста пластина. Ґрати відливаються машинами для лиття під тиском зі спеціального свинцевого сплаву. Після насадження пакетів труб із пластмаси. Свинець у формі порошку завантажується вібраторами в простір між траверсами ґрат і стінкою труби. Цей свинцевий порошок перетворюється в ході електрохімічного процесу, так званого формування, в окис свинцю й утворює, таким чином, активну масу.

Негативний електрод – пастирована ґратчаста пластина. Ґрати, відлиті зі свинцевого сплаву і являється носієм маси, а також електричним провідником, покриваються активною масою у вигляді пасти, зробленої з порошку окису свинцю. У процесі формування паста перетворюється в чистий свинець, що відрізняється пористою структурою з великою поверхнею і який міцно з'єднується із ґратами.

Сепаратор з мікропористого матеріалу й гофрований, перфорований аркуш із пластмаси відокремлюють обидва електроди один від одного, забезпечують певну відстань між ними й запобігають короткому замиканню. Більша пористість сепаратора, однак, забезпечує гарний потік іонів в електроліті від одного електрода до іншого.

Разом із сепаратором комплект позитивних і негативних пластин відповідної полярності приварюються до полюсних містків і з'єднуються паралельно.

Баки для електролітів складаються із прозорих, стійких до ударів і кислот пластмаси або ебоніту. Вони щільно закриваються кришкою з того ж матеріалу. Отвори в кришці оснащені пористими керамічними пробками, що очищають газ від крапель електроліту, що може виходити в ході заряду.

Батарея типу OPzS вимагає вкрай незначного техобслуговування. Воно обмежується оптичною оцінкою пакетів пластин через прозорий бак, періодичним виміром напруги на елементах і щільності кислоти, а також доливкою чистої води, коли досягнута низька оцінка рівня електроліту. Доливка чистої води необхідна через кожні 1-3 роки.

У режимі безперервної роботи батареї типу OPzS постійно заряджаються напругою від 2,23 до 2,25 В. Цієї напруги досить, щоб повністю зарядити батарею після розряду. Керамічні пробки на отворах для заливання мають подвійну функцію: вони очищають газ, що утвориться, і захищають елемент від зворотного запалювання. У випадку запалювання вихідної займистої газової суміші, що складається з водню й кисню, полум'я не може проникнути в елементи через пористу керамічну пробку.

Позначення акумуляторної батареї $108\times 4OPzS200$: 108 – число стаціонарних елементів; 4 – число позитивних пластин; *z* – тип акумулятора із трубчастим позитивним електродом; 200 – номінальна ємність 200 А·год у режимі 10 годинного розряду.

Основні технічні характеристики акумуляторних батарей типу OPzS представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні данні акумуляторних батарей типу OPzS

| Тип АБ | Значення струму і ємності при режимах розряду до припустимої кінцевої напруги 1,87 В | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10-ти год. | | 5-ти год. | | 3-х год. | | 1-год. | | 0,5-год. | |
| | Струм А | Ємність А·год | Струм А | Ємність А·год | Струм А | Ємність А·год | Струм, А | Ємність А·год | Струм А | Ємність А·год |
| 2 OPzS100 | 10,0 | 100 | 16,6 | 83 | 23,5 | 70,5 | 52,0 | 52,0 | 70,0 | 35,0 |
| 3 OPzS150 | 15,0 | 150 | 25,8 | 129 | 36,9 | 110,7 | 70,2 | 70,2 | 96,0 | 48,0 |
| 4 OPzS200 | 20,0 | 200 | 34,4 | 172 | 49,2 | 147,6 | 93,6 | 93,6 | 128,0 | 64,0 |
| 5 OPzS250 | 25,0 | 250 | 43,0 | 215 | 61,5 | 184,5 | 117,0 | 117,0 | 160,0 | 80,0 |
| 6 OPzS300 | 30,0 | 300 | 51,6 | 258 | 73,8 | 221,4 | 140,4 | 140,4 | 192,0 | 96,0 |
| 5 OPzS350 | 35,0 | 350 | 63,0 | 31 | 88,0 | 264,0 | 166,5 | 166,5 | 217,0 | 108,5 |
| 6 OPzS420 | 42,0 | 420 | 75,6 | 378 | 105,6 | 316,8 | 199,8 | 199,8 | 260,4 | 130,2 |
| 5 OPzS500 | 49,0 | 490 | 88,2 | 441 | 123,2 | 369,6 | 233,1 | 233,1 | 303,8 | 151,9 |
| 6 OPzS600 | 60,0 | 600 | 103,0 | 515 | 144,6 | 433,8 | 260,4 | 260,4 | 331,2 | 165,6 |
| 8 OPzS800 | 80,0 | 800 | 137,6 | 688 | 192,8 | 578,4 | 347,2 | 437,2 | 441,6 | 220,8 |
| 10OPzS1000 | 100,0 | 1000 | 172,0 | 860 | 241,0 | 723,0 | 434,0 | 434,0 | 552,0 | 261,0 |

Для комплектації батарей джерел постійного струму на електричних станціях і підстанціях також широко використовуються стаціонарні свинцево-кислотні герметичні акумуляторні батареї, що не обслуговуються, типу LS Харківського акумуляторного заводу «Владар», представлених на рисунку 4.4.

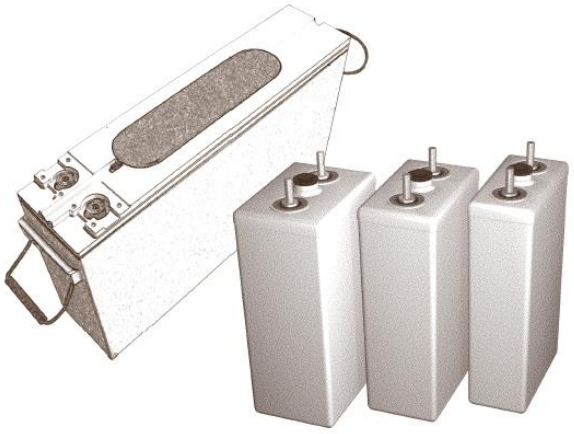


Рисунок 4.4 – Свинцево-кислотний акумулятор типу LS

У герметичних не обслуговуваних на протязі всього терміну служби акумуляторах типу LS використовується електроліт, іммобілізований у вигляді гелю.

Електроди представляють із себе пастировані ґратчасті пластини складної променевої геометрії зі свинцово-кальцієво-оловянистого сплаву. Мікропористий сепаратор DARK-5000 виробництва фірми DRAMI (Німеччина) зі стекломатом, має вкрай низький електричний опір, запобігає опливанню активної маси.

Корпус і кришка виготовляються з ударного міцного морозистого ABS-пластику. Спеціальна пробка з регулювальним клапаном забезпечує підтримку надлишкового тиску усередині батареї й рекомбінацію кисню, що виділяється в процесі роботи, і, як наслідок, втрат води. Це приводить до повної відсутності викидів пар кислоти в навколишнє середовище при роботі батареї.

Сірчанокислотний електроліт іммобілізований у вигляді гелю, що сприяє відсутності його витоку навіть при ушкодженні корпуса.

Батарея не вимагає доливки води й перевірки рівня електроліту, що дає можливість безпечної експлуатації батарей в одному приміщенні із іншим устаткуванням і персоналом.

При паралельному резервному режимі джерело постійного струму й батарея підключені завжди паралельно.

При цьому зарядна напруга є одночасно й напругою експлуатації батареї, і напругою споживаючого устаткування. У паралельному резервному режимі джерело постійного струму завжди в стані забезпечити максимальний струм споживача та заряд батареї. Батарея розряджається тільки тоді, коли не працює джерело постійного струму.

У буферному режимі експлуатації джерело постійного струму не завжди може забезпечити максимальний струм споживача. Струм споживання часом може перевищувати номінальний струм споживання джерела постійного струму, тоді батарея забезпечує дане перевищення.

Позначення акумуляторної батареї LS 02 200 G: L – свинцево-кислотна батарея; S – стаціонарна; 02 – номінальна напруга, В; 200 – номінальна ємність в А·год у режимі 10 годинного розряду; G – електроліт іммобілізований у вигляді гелю.

Технічні характеристики батареї наведені в таблиці 4.3:

Таблиця 4.3 – Технічні данні акумуляторних батарей типу LS

| Тип | Режим розряду | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Кінцева напруга (Us) 1,80 В | | | | | | Кінцева напруга (Us) 1,75 В | | | | | |
| | 10-год. | | 5- год. | | 3- год. | | 1- год. | | 0,5-год. | | 0,25- год. | |
| | Струм, А | Ємність, Агод | Струм, А | Ємність, Агод | Струм, А | Ємність, Агод | Струм, А | Ємність, Агод | Струм, А | Ємність, Агод | Струм, А | Ємність, Агод |
| LS02240G | 24 | 240 | 69,6 | 198 | 60 | 180 | 120 | 120 | 168 | 84 | 212 | 53 |
| LS02300G | 30 | 300 | 49,5 | 247,5 | 75 | 225 | 150 | 150 | 210 | 105 | 264 | 66 |
| LS02360G | 36 | 360 | 59,4 | 297 | 90 | 270 | 180 | 180 | 252 | 126 | 335 | 83,7 |
| LS02560G | 56 | 560 | 92,4 | 465 | 140 | 420 | 280 | 280 | 392 | 196 | 492,8 | 132,2 |
| LS02600G | 60 | 600 | 108 | 640 | 150 | 450 | 300 | 300 | 420 | 204 | 528 | 122 |
| LS02640G | 64 | 640 | 105 | 528 | 160 | 480 | 320 | 320 | 448 | 224 | 563,2 | 142 |
| LS02900G | 90 | 900 | 162 | 810 | 225 | 675 | 450 | 450 | 630 | 306 | 792 | 198 |

### 4.3 Нікель-кадмінієві акумуляторні батареї

Перевірені часом нікель-кадмієві акумулятори (NiCd) використовуються там, де потрібна довговічність, високий струм розряду та стійкість до екстремальної температури. NiCd батареї є одними з найстійкіших і довговічніших, це єдина електрохімічна система, яка дозволяє надшвидку зарядку з мінімальним стресом для батареї.

Через екологічні проблеми (кадмій дуже токсичний) нікель-кадмієві акумулятори поступово поступаються своїми ролями іншим електрохімічним системам.

Нікель-метал-гідридний акумулятор (NiMH) розроблений як заміна неекологічному акумулятору NiCd, та має у своєму складі тільки помірно токсичні метали і забезпечує більш високу питому енергоємність.

За будовою NiCd акумулятор є схожим на нікель-метал-гідридний акумулятор. Конструкція корпусів Ni-MH акумуляторів і NiCd акумуляторів однакова, конструкція позитивних електродів та склад електроліту – однакові.

Нікель-метал-гідридний акумулятор – електричний акумулятор з категорії вторинних батарей у якому позитивним електродом є оксидно-нікелевий електрод, а негативним – електрод зі сплавів нікелю з металами рідкоземельної групи, здатних до адсорбції водню і десорбції його при зміні полярності.

На відміну від нікель-кадмієвого акумулятора, в якому негативним електродом є кадмієвий електрод, нікель-метал-гідридні акумулятори мають вищі енергетичні характеристики, однак мають вужчий температурний діапазон експлуатації і до того ж мають трохи більший саморозряд і більш чутливі до перегріву, що призводить до необхідності вбудовування в батареї елементів захисту.

Вартість однієї А·год нікель-метал-гідридних акумуляторів на 30-50% вища, ніж у нікель-кадмієвих. NiMH акумулятори можуть мати ємність в 2-3 рази більшу від NiCd, а їх густина енергії наближується до густини енергії літій-іонних акумуляторів.

Напруга елемента: максимальна – 1,4 В (повний заряд); мінімальна −0,9 В (повний розряд).

Анодом в даних акумуляторів є металічний кадмій Cd (у вигляді порошку), електролітом – гідроксид калію KOH з додаванням гідроксиду літію LiOH (для утворення нікелатів літію і збільшення ємності на 21-25 %), катод – гідрат окису нікелю NiOOH з графітовим порошком (близько 5-8 %). ЕРС нікель-кадмієвого акумулятора близько 1,45 В, питома енергія близько 45-65 Вт·год/кг. В залежності від конструкції, режиму роботи (тривалі чи короткі розряди), і чистоти матеріалів, що застосовуються, термін служби становить від 100 до 3500 циклів заряд-розряд.

Сучасні промислові нікель-кадмієві батареї можуть служити до 20-25 років. Нікель-кадмієві акумулятори це єдиний тип акумуляторів, який може зберігатися розрядженним – на відміну від нікель-метал-гідридних акумуляторів, які потрібно зберігати повністю зарядженними, та літій-йонних акумуляторів, які необхідно зберігати при 40%-ому заряді від ємності акумулятора.

При зберіганні у розрядженому стані нікель-кадмієві акумулятори не втрачають працездатності протягом тривалого періоду – до 10 років.

Недоліки нікель-кадмієвих акумуляторів:

- NiCd батареї коштують значно дорожче за ват-годину, ніж свинцево-кислотні батареї;

- відносно швидко втрачають заряд, коли не використовуються, такий саморозряд може спричинити втрату до 10% заряду на місяць, що набагато більше, ніж літій-іонні батареї, які втрачають лише 2-3% на місяць;

- якщо батарею багаторазово заряджати, перш ніж повністю розрядити, вона «запам'ятує» меншу ємність, що призводить до погіршення продуктивності з годиною. Ефект пам'яті може призвести до зменшення ємності на 20-30% після кількох зарядок.

- нікель-кадмієві батареї містять кадмій, токсичну речовину, яка шкідлива як для здоров'я людини, так і для довкілля.

Зважаючи на перераховані недоліки нікель-кадмієві батареї не є найкращим вибором для зберігання енергії на тягових підстанціях.

### 4.4 Особливості літій-іонних акумуляторних батарей

Назву літій-іонні акумулятори одержали через те, що електричний струм в зовнішньому колі з'являється через переміщенні позитивно заряджених іонів літію Li+ між позитивними та негативними електродами в процесі розрядки та зарядки (рис.4.5). Металевий літій у цих процесах участі не бере, тому не

виникає будь-яких проблем з відновленням електродів, що забезпечує стабільність і безпеку при використанні батареї.

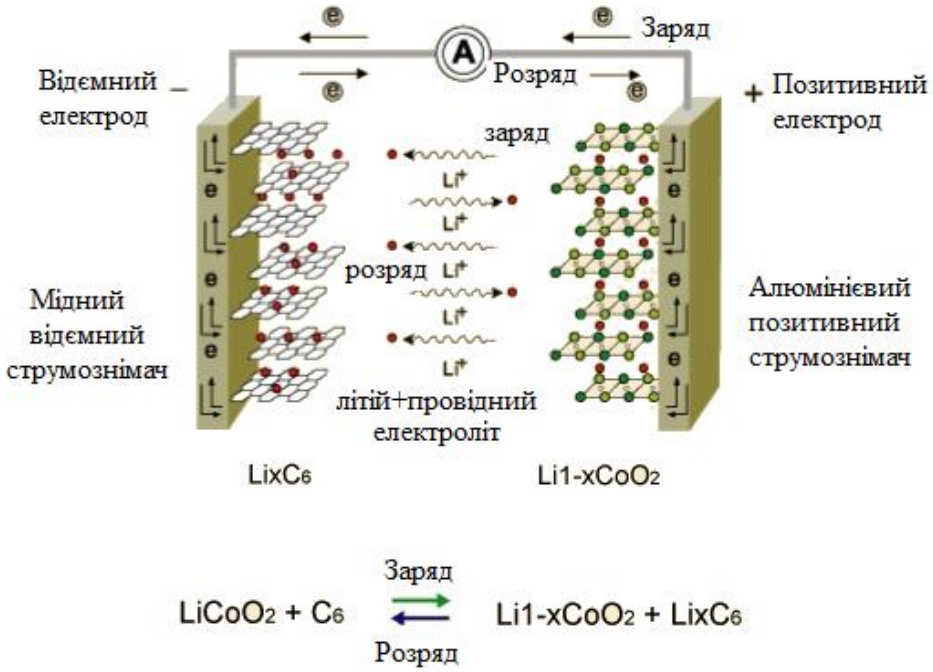



Рисунок 4.5 – Схема роботи літієвого акумулятора

Літій-іонні акумулятори виділяються своєю значною енергетичною щільністю, що вимірюється в тому, скільки енергії вони здатні зберігати щодо своїх розмірів та ваги. Ця характеристика робить їх ідеальними для застосування в областях, де важливі компактність та низька вага, таких як у мобільних пристроях та електромобілях. Висока енергетична щільність забезпечує тривалий час роботи та підвищену ефективність.

Сучасні літій-іонні акумуляторні батареї мають відносно високі показники: енергетична ємність 100-180 Вт·год/кг і 250-400 Вт·год/дм$^3$, внутрішній опір 150-250 мОм (для батареї 7,2 В), робоча напруга – 3,5-4,2 В.

Літій-іонні батареї виділяються своїм тривалим терміном служби. На відміну від традиційних батарей, які можуть втрачати ємність з часом, літій-іонні батареї здатні витримувати безліч циклів заряджання та розряджання без істотної втрати продуктивності. Число циклів заряд/розряд до втрати 20 % ємності складає 500-1000, а саморозряд при кімнатній температурі може досягати 7 % в рік. Ця довговічність робить їх економічно ефективними у

довгостроковій перспективі, особливо в областях, де потрібні часті цикли заряджання та розрядки.

Літій-іонні батареї спроектовані з урахуванням можливості швидкої зарядки, а час швидкого заряду може складати 2-4 години.

Діапазон робочих температур складає від −20°C до +60°C. Але багато виробників вже розробили акумулятори, працездатні при −40°C. Можливе розширення температурного діапазону і в бік вищих температур. В основному Li-ion акумулятори краще всього функціонують при кімнатній температурі. Робота при підвищеній температурі скорочує термін дії їх використання. Підвищена температура тимчасово протидіє внутрішньому опору акумулятора, збільшення якого призводить до його зносу.

Якщо ще кілька років тому розробники вважали досяжною ємність літій-іонних акумуляторів не більше кількох ампер-годин, то нині більшість причин, що обмежують збільшення ємності, подолано і багато виробників почали випускати акумулятори ємністю в сотні ампер-годин.

У сучасних літієвих акумуляторах чистий літій не застосовується. Зараз поширені три типи літієвих акумуляторів:

- літій-іонні (Li-ion). Номінальна напруга ($U_{ном}$) -3,6 В;

- літій-залізо-фосфатні (Li-Fe або LFP). $U_{ном}$ -3,3 В;

- літій-полімерні (Li-Po, Li-polymer). $U_{ном}$ -3,7 В.

Всі ці типи літієвих акумуляторів розрізняють за матеріалом катода або типом електроліту. В Li-ion використовується катод з кобальтата літію $LiCoO_2$, в Li-Po застосований електроліт з гелеподібного полімеру, а в Li-Fe використовується катод з літій-феро-фосфату $LiFePO_4$.

**Li-Ion акумулятори.**

Такі акумулятори широко використовуються в промисловому обладнанні та повсякденному використанні. Вони мають високу енергетичну щільність, порядку 100 Вт·г/кг, і забезпечують приблизно 300-500 циклів заряд/розряд.

Акумулятори мають дуже низьку швидкість саморозряду (приблизно 3-5 % в перший місяць, потім зменшення до 1-3 % в місяць, додатково близько 3 %

споживає схема управління). Крім того, при однакових габаритах, літієві джерела живлення працюють втричі довше, у порівнянні з Ni-Cd-акумуляторами, і у них абсолютно відсутній ефект пам'яті. Що стосується недоліків – насамперед, це висока ціна. Такі батареї необхідно зберігати в зарядженому стані, і у них є ефект старіння, навіть якщо акумулятор не використовується. Цей ефект проявляється в тому, що через рік після виготовлення знижується його ємність, а через три роки він іноді виходить з ладу.

**Літій-залізо-фосфатний акумулятор.**

Дані акумулятори являються аналогічними за структурними особливостями до Li-Ion акумуляторів і відрізняються лише використанням феро-фосфату літію в якості катоду. Але застосування такої речовини додає переваг у технічних характеристиках. Наприклад, напруга повністю зарядженого елемента в $LiFePO_4$ становить близько 3,65 В. Ці елементи значною мірою менш залежні від перезарядження, хоча виробники вкрай не рекомендують заряд вище 3,9 В і тільки кілька зарядів до 4,2 В за весь час життя елемента. Напруга повністю розрядженого елемента може становити до 2,5-2 В.

На відміну від інших літій-іонних, Li-Fe акумулятори, як і нікелеві, мають дуже стабільну напругу розряду. Напруга на виході залишається близько до 3,2 В під час розряду, поки заряд акумулятора не буде повністю вичерпано. І це може значно спростити або навіть усунути необхідність регулювання напруги в ланцюгах, але ускладнити контроль заряду акумулятора, що залишився.

У зв'язку з постійною напругою 3,2 В на виході, чотири акумулятори можуть бути з'єднані послідовно для отримання номінальної напруги на виході в 12,8 В, що наближається до номінальної напруги свинцево-кислотних акумуляторів з шістьма осередками. Це, поряд із хорошими характеристиками безпеки Li-Fe акумуляторів, робить їх гарною потенційною заміною для свинцево-кислотних акумуляторних батарей у багатьох галузях, таких як автомобілебудування та сонячна енергетика.

Використання фосфатів дозволяє уникнути витрат кобальту та екологічних проблем, зокрема, при попаданні кобальту у навколишнє середовище при неправильній утилізації.

Li-Fe акумулятор має вищий піковий струм (а, враховуючи стабільність напруги - пікову потужність), ніж у Li-Ion.

$LiFePO_4$ елементи повільніше втрачають ємність, ніж літій-іонні. Li-Fe акумулятори мають нижчу швидкість розряду, ніж свинцево-кислотні або літій-іонні. Так як швидкість розряду визначається у відсотках від ємності акумулятора, то більша швидкість розряду може бути досягнута в більш ємних акумуляторах (більше ампер-годин). Однак можуть бути використані $LiFePO_4$ елементи з високим струмом розряду (що мають вищу швидкість розряду, ніж свинцево-кислотні батареї, або $LiCoO_2$ тієї ж потужності).

Через повільніше зниження щільності енергії, через деякий час експлуатації, $LiFePO_4$ елементи вже мають більшу щільність енергії, ніж $LiCoO_2$ та літій-іонні.

Однією з важливих переваг у порівнянні з іншими видами літій-іонних акумуляторів є термічна та хімічна стабільність, що суттєво підвищує безпеку батареї.

Основні недоліки даних акумуляторів - проблемність заряду при негативних температурах, та відносно велика вартість.

**Li-Pol акумулятори** - це одна з найбільш досконалих конструкцій акумуляторних джерел живлення. Принципово іонно-літієві і полімерно-літієві акумулятори не розрізняються, але останні мають одну важливу перевагу – оскільки їх робочою речовиною є гель, що складається з суміші полімеру і електроліту, то витік рідини стає просто неможливим.

В основі ідеї літій-полімерного акумулятора (Li-pol або Li-polymer) лежить відкрите явище переходу деяких полімерів в напівпровідниковий стан в результаті впровадження в них іонів електроліту. Такі акумулятори забезпечують не гірші питомі характеристики, ніж у літій-іонних акумуляторів, але завдяки відсутності рідкого електроліту вони більш безпечні у

використанні. Li-pol акумулятори компактні і можуть бути виконані в будь-якій конфігурації. Їх контейнер може бути виконаний з металізованого полімеру. Оскільки вони використовують гелієвий електроліт, то можуть мати нетрадиційну форму. Ці джерела мають ще більш високу енергетичну щільність (до 160 Вт·г/кг) і малий струм розряду, причому нинішні зразки здатні витримати дуже велику кількість циклів заряд/розряд - близько 1000. Ще однією перевагою цих акумуляторів є те що вони досить компактні і легкі. Проте недоліком даного типу акумулятора є їх достатньо висока вартість.

**Літій-титанатний акумулятор (LTO)** – це літій-іонна батарея у якій в якості анода використовується титанат літію $Li_4Ti_5O_{12}$. Він широко використовується через його високу безпеку, високу стабільність, чудову продуктивність, тривалий термін служби та екологічність.

Дана акумуляторна батарея має низький саморозряд, високий рівень безпеки, тривалий термін служби, широкий діапазон робочих температур, швидку зарядку та високу швидкість розряду. Рівень залишкової ємності акумулятора LTO, який зберігається при 20 ℃ протягом 90 днів, становить понад 90%, а коефіцієнт відновлення ємності становить понад 95%. Достатньо висока безпека даного типу акумуляторів підтверджена, вогнепальними випробуваннями. Тривалий термін служби забезпечує до 20000 циклів розряду. Широкий діапазон робочих температур знаходиться від -40 ℃ до 60 ℃, також можна заряджати та розряджати при -40 ℃, а 99 % ємності можна розрядити при 60 ℃.

Значною перевагою даного типу акумулятора є дуже низький рівень опору, що дозволяє використовувати надшвидкий заряд, тому є можливість повного заряджання за 6 хвилин. Великим плюсом є також низький саморозряд, приблизно 0,02 % на добу. Проте у технології акумуляторів з титанатом літію є значний недолік – дуже велика вартість.

Враховуючи відносну значну вартість літій-іонних акумуляторів у порівнянні з іншими їх застосування на тягових підстанціях не вигідне з економічної точки зору.

# ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі виконано розрахунок навантажень на систему тягового електропостачання, вибір контактної мережі, проведено механічний розрахунок контактної підвіски, розрахунок струмів короткого замикання та вибір основного обладнання тягової підстанції, виконано проектування сонячної електростанції, розрахунок кабельної лінії електропересилання та вибір параметрів релейного захисту кабельної лінії.

Результати роботи можуть стати основою для розробки системи електропостачання між підстанціями Д-Є.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ


1. Енергетика тягових мереж: монографія / Сиченко В.Г., Кузнецов В.Г., Босий Д.О., Саблін О.І.. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. 210 с.

2. Дьяков В.О., Босий Д. О., Антонов А. В. Контактна мережа електрифікованих залізниць. Улаштування контактної мережі. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. 220 с.

3. Друбецька Т.І., Бойко А.М. Тягові підстанції електрифікованих залізниць. Київ: Каравела, 2022. 338 с.

4. Бондар І. Л., Бондар О. І., Сиченко В. Г. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту: навч.посібник. Д.: Вид-во, 2009. 180 с.

5. Бардик Є.І., Лукаш М.П. Електрична частина станцій і підстанцій. Навч. посібник. К.: НТТУ «КПІ», 2011. 220 с.

6. Кирик В.В. Електричні системи та мережі: навчальний посібник. К: Видавництво «Політехніка», 2014. 131 с.

7. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2013. 533 с.

8. Панченко С. В., Блиндюк В. С., Баженов В. М. Релейний захист і автоматика: навч. посібник. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 250 с.

9. Сінчук І.О., Бойко С.М. Системи накопичення електричної енергії: Підручник. Кривий Ріг, 2020. 219 с.

10. Основні типи акумуляторів: веб-сайт. URL: https://alfa.solar/uk/content/osnovni-tipi-akamulyatoriv-id22?srsltid=AfmBOooimDBDOg8aKwTj-Wwgwtslv65Nr1lW2wwd-5XCtfVxaPyIKTFN (дата звернення: 19.05.2025).

11. Електричний акумулятор: веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BA%D1%8

3%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80 (дата звернення: 19.05.2025).

12. Нікель-кадмієвий акумулятор: вичерпний посібник для покупців веб-сайт. URL: https://uk.shieldenchannel.com/blogs/portable-power-station/nickel-cadmium-battery (дата звернення: 20.05.2025).

13. Порівняльна Таблиця акумуляторних батарей: веб-сайт. URL: https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-107 (дата звернення: 20.05.2025).

14. Особливості літій-іонних акумуляторів: веб-сайт. URL: https://wybor-battery.kz/blog/stati/osobennosti-litiy-ionnyh-akkumulyatorov (дата звернення: 20.05.2025).