

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
«_____» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему:

«Забезпечення надійності функціонування комплектних трансформаторних підстанцій кіоскового типу»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕНМ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Ігор КАЛЮЖНИЙ
«_____» _____ 2023 р.

Керівник роботи
к.т.н., проф.
_____Анатолій ОРЛОВИЧ
«_____» _____ 2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Петро ПЛІШКОВ

« » 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Калюжного Ігора Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Забезпечення надійності функціонування комплектних трансформаторних підстанцій кіоскового типу.

Ensuring reliable operation of complete kiosk-type transformer substations

2. Керівник роботи Орлович Анатолій Юхимович, к.т.н., проф.

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

3. Строк подання роботи до захисту 15.12.2023р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи забезпечення надійності функціонування комплектних трансформаторних підстанцій кіоскового типу шляхом розробки засобів створення нормованих умов їх експлуатації.

Завдання: 1. Провести аналіз умов роботи високовольтної ізоляції КТП. 2. Проаналізувати шляхи та обґрунтувати спосіб підвищення експлуатаційної надійності КТП. 3. Провести теоретичне дослідження зміни параметрів мікроклімату у високовольтному відсіку КТП. 4. Обґрунтувати параметри контролю керування мікрокліматом високовольтного відсіку КТП. 5. Розробити технічні рекомендації щодо побудови системи контролю мікроклімату у високовольтному відсіку КТП кіоскового типу. 6. Розробити технічні заходи з техніки безпеки та охорони праці при експлуатації комплектних трансформаторних підстанцій.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І. В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ. Обґрунтування актуальності дослідження</i>	<i>4.09 – 8.09</i>	
2	<i>Розділ 1. Аналіз умов роботи комплектних трансформаторних підстанцій</i>	<i>11.09 – 22.09</i>	
3	<i>Розділ 2. Теоретичне дослідження зміни параметрів мікроклімату у високовольтному відсіку КТП</i>	<i>25.09 – 27.10</i>	
4	<i>Розділ 3. Розробка системи керування мікрокліматом у високовольтному відсіку КТП</i>	<i>1.11 – 24.11</i>	
5.	<i>Розділ 4. Охорона праці</i>	<i>27.11 – 1.12</i>	
6.	<i>Формулювання загальних висновків</i>	<i>4.12-7.12</i>	
7.	<i>Оформлення списку використаних джерел</i>	<i>6.12 – 8.12</i>	
8.	<i>Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді слайдів</i>	<i>11.12 – 14.12</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис керівника

Орлович А. Ю.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис здобувача

Калюжний І. А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 88 с.; 25 рис.; 3 табл.; 36 джерел.

Калюжний І. А. Забезпечення надійності функціонування комплектних трансформаторних підстанцій кіоскового типу. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єктом дослідження є процеси конденсації вологи на електрообладнанні комплектної трансформаторної підстанції.

Предметом дослідження є параметри мікроклімату та температурні режими роботи ізоляторів високовольтного відсіку комплектної трансформаторної підстанції зовнішньої установки 10/0,4 кВ кіоскового типу.

Метою кваліфікаційної роботи є забезпечення надійності функціонування комплектних трансформаторних підстанцій кіоскового типу шляхом розробки засобів створення нормованих умов їх експлуатації.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз умов роботи комплектних трансформаторних підстанцій. У другому розділі проведено теоретичне дослідження зміни параметрів мікроклімату у високовольтному відсіку КТП кіоскового типу. Третій розділ присвячений розробці системи керування мікрокліматом у високовольтному відсіку КТП. У четвертому розділі проведено аналіз технічних заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках напругою вище 1000 В і спроектовано заземлюючий пристрій КТП 10/0,4 кВ.

За результатами роботи зроблено висновки та рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації високовольтних відсіків КТП за рахунок впровадження системи контролю мікроклімату

Ключові слова: комплектна трансформаторна підстанція, високовольтний відсік, ізолятор, джерела забруднення ізоляторів, роса.

ABSTRACT

Qualification work: 88 p.; 25 Fig.; 3 tables; 36 sources.

Kaliuzhnyi I. A. Ensuring reliable operation of complete kiosk-type transformer substations. – Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of the study is the process of moisture condensation on the electrical equipment of a complete transformer substation.

The subject of the research is the parameters of the microclimate and the operating temperature regimes of the insulators of the high-voltage compartment of the complete transformer substation (CTS) of the external installation of 10/0.4 kV kiosk type.

The purpose of the qualification work is to ensure the reliability of the operation of complete transformer substations of the kiosk type by developing means of creating standardized conditions for their operation.

In the first section of the qualification work, an analysis of the operating conditions of complete transformer substations was carried out. In the second chapter, a theoretical study of microclimate parameters changes in the high-voltage compartment of the kiosk-type CTS is carried out. The third chapter is devoted to the development of the microclimate control system in the high-voltage compartment of the CTS. In the fourth chapter, an analysis of technical measures ensuring the safety of work in electrical installations with a voltage higher than 1000 V was carried out and a grounding device of the CTS 10/0.4 kV was designed.

Based on the results of the work, conclusions and recommendations were made to improve the efficiency of the operation of high-voltage compartments of the KTP due to the implementation of the microclimate control system

Keywords: complete transformer substation, high-voltage compartment, insulator, sources of contamination of insulators, dew

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1. АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ КОМПЛЕКТНИХ ТРАНСФОРМАТОР- НИХ ПІДСТАНЦІЙ	12
1.1. Будова КТП кіоскового типу та аналіз їх експлуатаційних ушкоджень	
1.2. Вплив забруднень на роботу ізоляції КТП	
1.3. Джерела забруднення ізоляторів	
1.4. Шляхи забезпечення надійності функціонування КТП	
1.5. Висновки	30
2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ВІДСІКУ КТП.....	31
2.1. Рівняння теплового балансу високовольтного відсіку КТП	
2.2. Залежність температури ізолятора ВН від температури повітря.....	
2.3. Залежність температури повітря від часу та штучних джерел нагріву...	
2.4. Залежність відносної вологості повітря від його температури.....	
2.5. Моделювання теплових режимів роботи високовольтного відсіку КТП	
2.6. Висновки	55
3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ВІДСІКУ КТП.....	
3.1. Вибір параметрів керування мікрокліматом.....	
3.2. Алгоритм роботи системи.....	
3.3. Обґрунтування архітектури системи	

3.4. Технічні рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації високовольтних відсіків КТП за рахунок впровадження системи контролю мікроклімату	
3.5. Висновки	78
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	
4.1. Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках напругою вище 1000 В	
4.2. Розрахунок заземлюючого пристрою КТП	
4.3 Висновки	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ВН – висока напруга;

ЗРУ – закрыта розподільна установка;

ЗТП – закрыта трансформаторна підстанція;

КЗ – коротке азамикання;

КРУЗ – комплектна розподільна установка зовнішнього устанавлення

КТП – комплектна трансформаторна підстанція;

КТПП – комплектна трансформаторна підстанція прохідна;

КТПТ – комплектна трансформаторна підстанція тупикова;

НН – низька напруга;

ПБЗ – перемикування без збудження

ПС – підстанція;

ПТЕЕС – Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів

ПУЕ – Правила улаштування електроустановок

ПЧР – поверхневий частковий розряд;

РУ – розподільна установка;

ЖКК – житлово-комунальний комплекс.

ВСТУП

Актуальність теми. У системах прийому та перетворення електроенергії комунальних, сільських споживачів важливе місце займають комплектні трансформаторні підстанції (КТП). На сьогодні, в експлуатації знаходяться як одно-, так і двотрансформаторні підстанції, потужністю від 25...630 кВ·А у більшості випадків зовнішньої установки. Для споживачів I-ї категорії за безперебійністю електропостачання [1] та багатоквартирних житлових будинків переважно розповсюдження отримали закриті трансформаторні підстанції (ЗТП).

Відмова від будівництва ЗТП і перехід у свій час до використання КТП зовнішньої установки, зокрема кіоскового типу, забезпечили великий економічний ефект, за рахунок зниження будівельних робіт і прискореного вводу їх в експлуатацію. Однак, такі підстанції виявилися менш захищеними від дії навколишнього середовища, ніж ЗТП. Основною причиною аварій у високовольтних відсіках КТП кіоскового типу є зволоження забруднених ізоляторів. Запобігти цим технологічним відмовам можливо організацією планових чисток ізоляторів. Однак відсутність пристроїв контролю забрудненості ізоляторів робить чистки малоефективним способом зниження аварійності КТП, оскільки з одного боку їх передчасне проведення веде до зайвих витрат висококваліфікованих трудових ресурсів і недоданої електроенергії у зв'язку з плановим відключенням, а з іншого боку перекриття ізоляції може статися раніше терміну чищення. Діючим засобом забезпечення нормальної експлуатації ізоляторів КТП може стати регулювання мікроклімату у високовольтних відсіках. Однак КТП, що знаходяться в експлуатації не обладнані такими системами.

Отже, вирішення задачі забезпечення надійності функціонування комплектних трансформаторних підстанцій кіоскового типу за несприятливих кліматичних факторів є актуальним.

Мета і завдання досліджень – забезпечення надійності функціонування комплектних трансформаторних підстанцій кіоскового типу шляхом розробки засобів створення нормованих умов їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні основні завдання:

- провести аналіз умов роботи високовольної ізоляції КТП;
- проаналізувати шляхи та обґрунтувати спосіб підвищення експлуатаційної надійності КТП;
- провести теоретичне дослідження зміни параметрів мікроклімату у високовольному відсіку КТП;
- обґрунтувати параметри керування мікрокліматом високовольного відсіку;
- розробити технічні рекомендації щодо побудови системи контролю мікроклімату у високовольному відсіку КТП кіоскового типу;
- розробити технічні заходи з техніки безпеки та охорони праці при експлуатації комплектних трансформаторних підстанцій.

Об'єкт дослідження – процес передавання електричної енергії в розподільних мережах 10 кВ.

Предмет дослідження – вплив кліматичних факторів на мікроклімат у високовольному відсіку комплектних трансформаторних підстанції зовнішньої установки 10/0,4 кВ.

Методи досліджень. При розв'язанні намічених задач були використані методи теорії електричних кіл, тепломасообміну, диференційного та інтегрального числення, імітаційного моделювання. Розрахунки проводились у прикладних застосунках Mathcad, Microsoft Excel.

Наукова цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- отримали подальший розвиток математичні моделі параметрів мікроклімату високовольного відсіку КТП, що знаходяться в експлуатації.

Практична цінність результатів, що були отримані в кваліфікаційній роботі для електроенергетичної галузі України полягає в розробці технічних рекомендацій щодо підвищення надійності функціонування високовольтних відсіків КТП за рахунок впровадження системи контролю мікроклімату.

1. АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ КОМПЛЕКТНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

Вплив навколишнього середовища (забруднення, підвищена вологість повітря) на електрообладнання КТП призводить до скорочення його строку служби та є однією з причин його технологічних відмов. Величина цього впливу значною мірою визначається місцем розташування підстанції та порою року. Тому необхідно розглянути конструкцію КТП кіоскового типу та проаналізувати причини технологічних порушень у їх роботі, оцінити вплив забруднень на роботу високовольтної ізоляції та визначити шляхи підвищення її експлуатаційної надійності.

1.1 Будова КТП кіоскового типу та аналіз їх експлуатаційних ушкоджень

Комплектна трансформаторна підстанція кіоскового типу (КТПк) призначена для прийому електроенергії 3-го змінного струму частотою 50 Гц та напругою 6 або 10 кВ, перетворення її на електроенергію напругою 0,4 кВ і живлення окремих промислових об'єктів, населених пунктів, об'єктів будівництва в районах з помірним кліматом. КТПк виготовляються тупикового (КТПТ) та прохідного (КТПП) типів. Основними елементами підстанції є пристрій високої напруги (ВН), силовий трансформатор і РУ 0,4 кВ. КТПк комплектуються оливними трансформаторами потужністю 250-630 кВА з напругою ВН 6 або 10 кВ.

Конструктивно однотрансформаторні КТПП і КТПТ (рис. 1.1-1.3) виконуються у вигляді одного блоку зовнішньої установки, в якому у відповідних окремих відсіках розміщено РУ ВН і НН і силовий трансформатор. Блоки КТПк виготовляються в заводських умовах і мають високий ступінь готовності до установки. Оболонка блоку виготовляється з листової сталі.

Найбільш розповсюдженою є цільнозварна конструкція оболонки з односкатним дахом (рис. 1.2, *a*), двотрансформаторні КТП мають двоскатний дах. В оболонці передбачені двері для установлення силового трансформатора та обслуговування РУ. Для безпечного обслуговування передбачені захисні блокування: блокування приводу головних ножів роз'єднувача з приводом заземлюючих ножів; блокування сітчастих дверей відсіку ВН (за наявності).

Двотрансформаторні КТПк складаються з двох з'єднаних трансформаторних блоків і використовуються для живлення споживачів II-ї категорії за безперебійністю електропостачання.

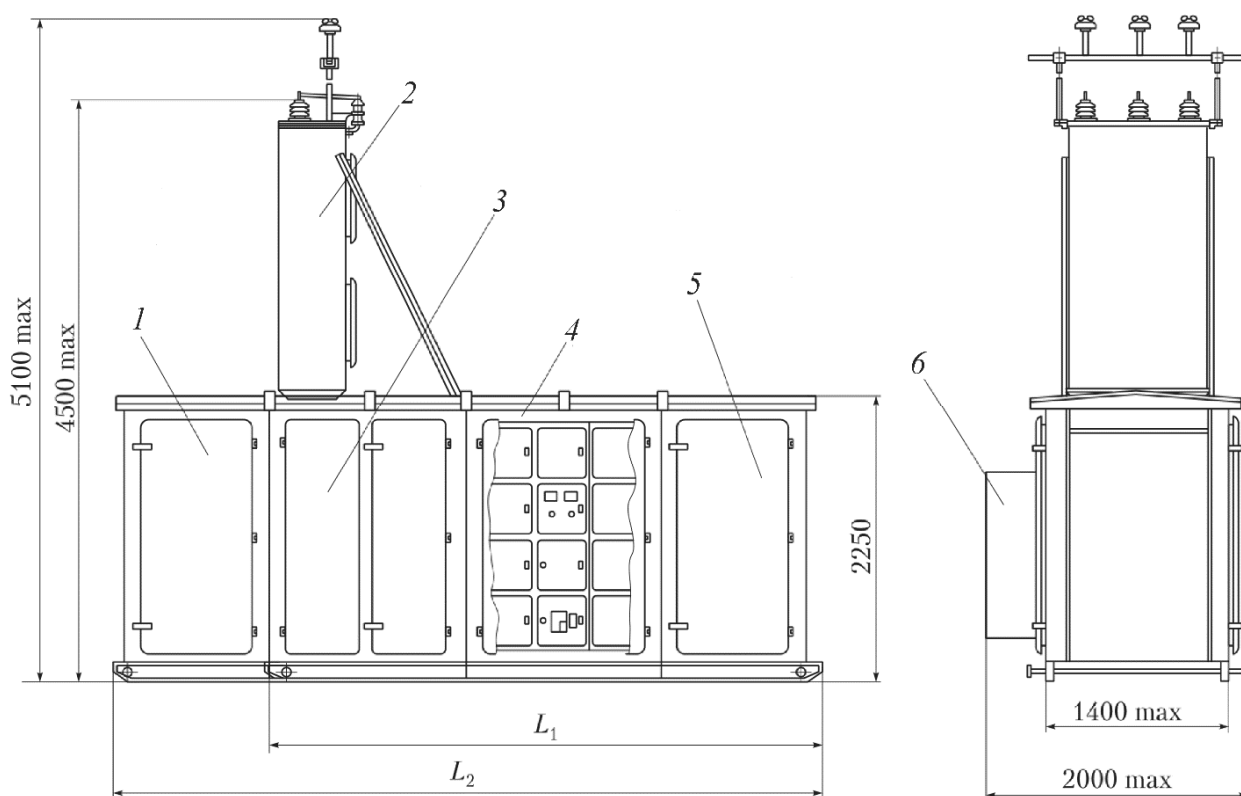


Рисунок 1.1 – Конструкція КТПТ:

- 1 – ввідний відсік ВН (для КТП з кабельним вводом);
- 2 – башта вводу ВН (для КТП з повітряним вводом);
- 3 – відсік трансформатора;
- 4 – відсік РУ НН; 5 – додатковий відсік РУ НН;
- 6 – кожух (для КТП 630 кВА)



а)



б)

Рисунок 1.2 – Виконання КТПТ:

а) – з кабельними вводом; б) повітряним вводом

Ввідний пристрій ВН містить прохідні ізолятори, запобіжники та розрядники. У КТПк з повітряним вводом додатково встановлюється башта, що розміщується над трансформаторним відсіком (рис. 1.1). Вона представляє собою шинопровід, в якому кріпляться до ізоляторів шини. У верхній частині вводу передбачений отвір для повітряного вводу ізольованого проводу. На даху башти кріпиться кронштейн, що складається із приймального порталу зі штировими ізоляторами.

Для КТП з кабельним вводом ввідний відсік виконується у вигляді шафи і розміщується поряд з трансформаторним і може бути укомплектованим лінійним роз'єднувачем або вимикачем навантаження.

Для підключення споживачів електричної енергії передбачено відсік РУ 0,4 кВ, де встановлюються ввідний рубильник (автоматичний вимикач) та підключаються лінії споживачів. Захист відходячих ліній виконується за допомогою запобіжників з плавкими вставками або автоматичних вимикачів. У РУ 0,4 кВ також розташовані комутаційні апарати допоміжних кіл, апаратура автоматики, вимірювальні прилади та лічильники електричної енергії, збірні шини.

КТПк встановлюються нижніми опорними рамами на фундаментні занурені залізобетонні стійки УСО-5А чи бетонні блоки типу ФБС після перевірки корпусу на фундаменті. Рами закріплюють зварюванням до опорних кутиків стійок чи до закладних скоб блоків.

До 2000-х років КТПк випускалися великою кількістю виробників, тому в експлуатації знаходиться значна кількість їх модифікацій, які відрізняються формою оболонки, наявністю подвійних дверей відсіків РУ 10 та 0,4 кВ, видом вводів/виводів, наявністю високовольних роз'єднувачів і т. п.

Експлуатація таких КТП показала, що вони внаслідок недосконалу конструкції та пошкоджень ізоляції, перенапруг, перекриття шин, неполадок силових трансформаторів часто виходили з ладу [2].

На рис. 1.3 представлено відсотковий склад ушкоджень конструктивних елементів КТП 10(6)/0,4, що знаходились в експлуатації енергопостачальної компанії. Дані приведені для одного року експлуатації, за який було зафіксовано 328 випадків технологічних порушень у роботі КТП.

Найбільше експлуатаційних дефектів виникає в РУ 0,4 (35%), ізоляції ВН (21%), силовому трансформаторі (20%), роз'єднувачів ВН (19%) і розрядниках ВН (5%).

Силовий трансформатор КТП є одним з найдорожчих елементів, а його відновлення у випадку ушкодження потребує значних людських і матеріальних ресурсів. До головних дефектів, що виникають у процесі експлуатації силових трансформаторів відносяться: ушкодження шпильок внаслідок поганого контакту з ввідним ошиновуванням, дефекти перемикача системи регулювання напруги типу ПБЗ, КЗ у силових обмотках з повним їх руйнуванням. Причиною більшості аварійних відключень трансформаторів є порушення цілісності та щільності контактних з'єднань, що приводять до перегорання шини або наконечника кабелю та шпильки трансформатора, перевантаження та перекиї фаз. Систематичні перевантаження трансформаторів, динамічні зусилля внаслідок КЗ і старіння ізоляції приводять до міжвиткового замикання та виходу з ладу трансформатора у цілому [3].

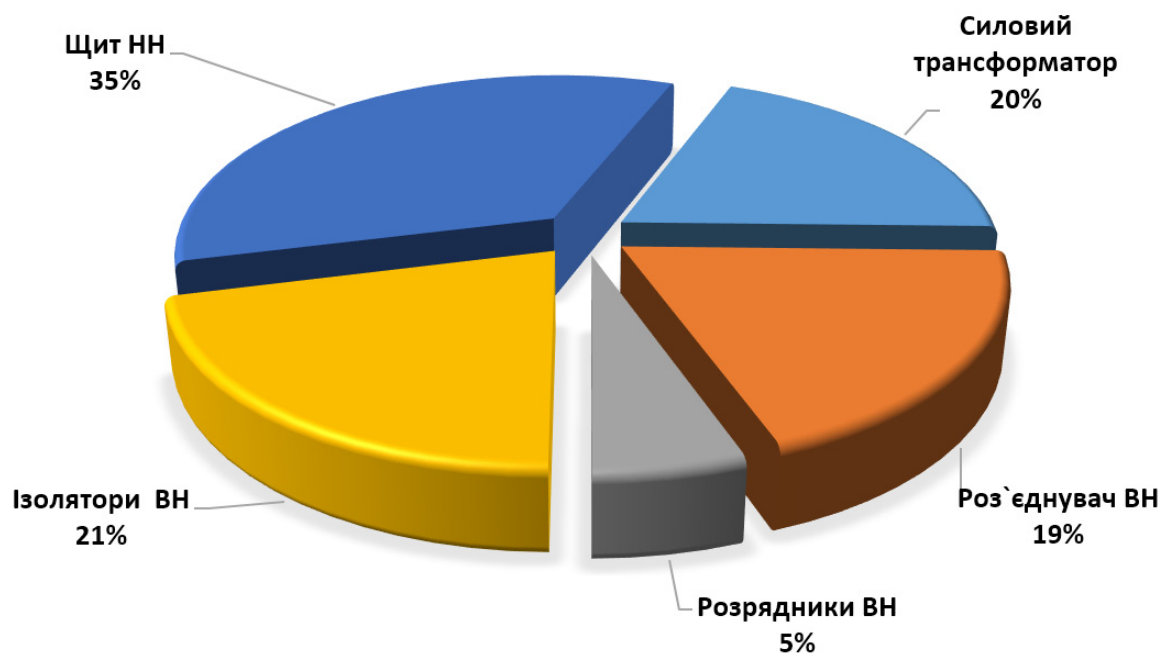


Рисунок 1.3 – Ушкоджуваність елементів КТП 10(6)/0,4 кВ

Експлуатаційні дефекти, що виникають у РУ 0,4 кВ пов'язані з використанням неякісних автоматичних вимикачів, з порушенням правил ПУЕ [1] і заводських інструкцій при підключенні ліній споживачів електричної енергії та ремонті, у відсутності чи невчасному проведенні технічних огляді та поточних ремонтів. Найбільш поширеним дефектом у РУ 0,4 кВ є порушення цілісності та щільності контактних з'єднань внаслідок використання проводів і кабелів без кінцевих наконечників, відсутності контролю затягування гвинтових з'єднань. Що врешті решт призводить до виникнення аварійних дефектів, які завершуються відгоранням фазного проводу на контакті автоматичного вимикача чи запобіжника, а найбільш тяжких випадках – трифазного КЗ.

Ушкодження роз'єднувачів зазвичай носять механічний та електричний характер. Механічні ушкодження виникають внаслідок неправильного регулювання, засмічення та недостатнього змазування рухомих частин роз'єднувача. Електричні дефекти виникають від недостатнього контакту між ножами та губками, його великого перехідного опору, що супроводжується окисленням та нагрівом контактів.

Причини появи експлуатаційних дефектів ізоляторів роз'єднувачів і високовольтної ізоляції КТП у цілому, слід розділити на виробничі та пов'язані з впливом навколишнього середовища.

До перших – відносяться такі: невчасне проведення та в неповному об'ємі поточних ремонтів, відхід від рекомендацій та інструкцій виробників при експлуатації ізоляції, заводський брак ізоляторів, помилки проектування, болтових з'єднань, помилки монтажу, внутрішні перенапруги.

До других – відносяться наступні: вітер і пилові бурі, пожежі та навмисне підпалювання сухої трави, дрібні тварини, зволоження атмосферою вологою та атмосферні перенапруги.

Сильні вітри та пилові бурі інтенсифікують процеси осідання інертних та іонообмінних часток на ізоляторах і тим самим призводять до скорочення планових термінів між їх чищенням. Пожежі є джерелом часток електропровідної сажі після виявлення якої на ізоляторах необхідно проводити позапланове їх чищення.

Дрібні тварини, що проникають через технологічні отвори для кабелів, щілини між дверми РУ оболонкою КТП, а також птахи викликають перекриття, відповідно, зовнішніх і внутрішніх струмоведучих частин. Дрібні тварини – миші, криси, куниці – найчастіше проникають у відсіка КТП через щілини і отвори. Ранні моделі КТП не передбачали ущільнення днищ відсіків, а в заводських інструкціях були відсутні вказівки стосовно виконання їх ущільнення.

Зволоження забруднених ізоляторів рососою є однією з найбільш частих причин виникнення дефектів ізоляції ВН КТП і за оцінками електротехнічного персоналу складає 20-37% від загальної кількості. Очевидно, що цей показник значно залежить від географічного району та місця розташування КТП, і може бути значно вищим. Рівень відмов ізоляції КТП також залежить від повітряних ліній живлячої мережі, так до 70% перекрить виникає в той момент, коли у мережі мали місце внутрішні перенапруги [4, 5].

Серед перенапруг внутрішнього характеру (дугові, комутаційні, ферорезонансні) у електричних мережах переважають дугові перенапруги при нефіксованому замиканні однієї з фаз на землю, причому їх величина може сягти до $3,2U_{\phi}$ [4, 6]. Для сухих ізоляторів така величина перенапруг безпечна. Однак при наявності навіть невеликих забруднень на ізоляторах у сполученні із зволоженням їх поверхні рососою розрядна напруга знижується. У таких умовах при підвищених напругах, що викликані однофазними замиканнями в мережі, за звичай, і виникають перекриття ізоляторів.

Частка атмосферних перенапруг склала до 11% відмов ізоляції в рік. Захист КТП від грозових перенапруг здійснюється за допомогою вентильних розрядників типу РВО, що встановлені на вводах. Розрядники ушкоджуються під час гроз від ударів блискавки поблизу чи безпосередньо в КТП.

Проведений аналіз будови КТПК, що знаходяться в експлуатації та причин і кількості технологічних порушень у їх роботі виявив, що найбільшу кількість технологічних відмов має РУ 0,4 кВ. Це пов'язано в першу чергу з фізичним старінням електроапаратів та електроматеріалів, а також з низькою якістю обслуговування РУ 0,4 кВ. Аналогічні причини появи експлуатаційних дефектів має силовий трансформатор. Отже, усунути появу переважної більшості дефектів у РУ 0,4 кВ, силового трансформатора, роз'єднувача можливо за допомогою проведення організаційних заходів: шляхом корекції графіків проведення технічних оглядів і поточних ремонтів, підвищення їх якості виконання. Також необхідно контролювати перевантаження трансформаторів

Особливістю природних чинників, що викликають відмови ізоляції ВН КТП є те, що на них можливо впливати і таким чином знизити кількість відмов, що в загальному підсумку дасть змогу забезпечити надійність функціонування КТП у цілому. Тому необхідно провести аналіз впливу забруднень, як найбільш, вагомому фактору, на роботу ізоляції ВН КТП.

1.2 Вплив забруднень на роботу ізоляції КТП

У процесі експлуатації КТП тверді частки пилу осідають на ізолятори ВН утворюючи шар забруднення (рис. 1.4). Цьому сприяє багато процесів, але найбільш небезпечними для ізоляторів є виноси викидів промислових підприємств і котелень, підняті в повітря частки ґрунту, сільськогосподарських хімікатів і протиожиледних реагентів. У залежності від кліматичного та географічного району на ізоляторах може виникати досить стійкий шар забруднення. Чисельно рівень забруднення ізолятора оцінюється його середньою поверхневою густиною забруднення, що лежить у межах 10^{-1} - 10^2 мг/см² [7].

Процес осідання забруднення на ізолятори в часі має складний характер, на який впливають сезонні зміни вітру, кількість і частота випадання опадів, наявність щілин корпусі КТП та ін. факторів. На відміну від ізоляції відкритих розподільчих установок (ВРУ) і повітряних ліній електропередавання, що піддається очисній дії дощу та вітру пил, що проникає в високовольтний відсік КТП, поступово накопичується на поверхні ізоляторів (рис. 1.4, 1.5).

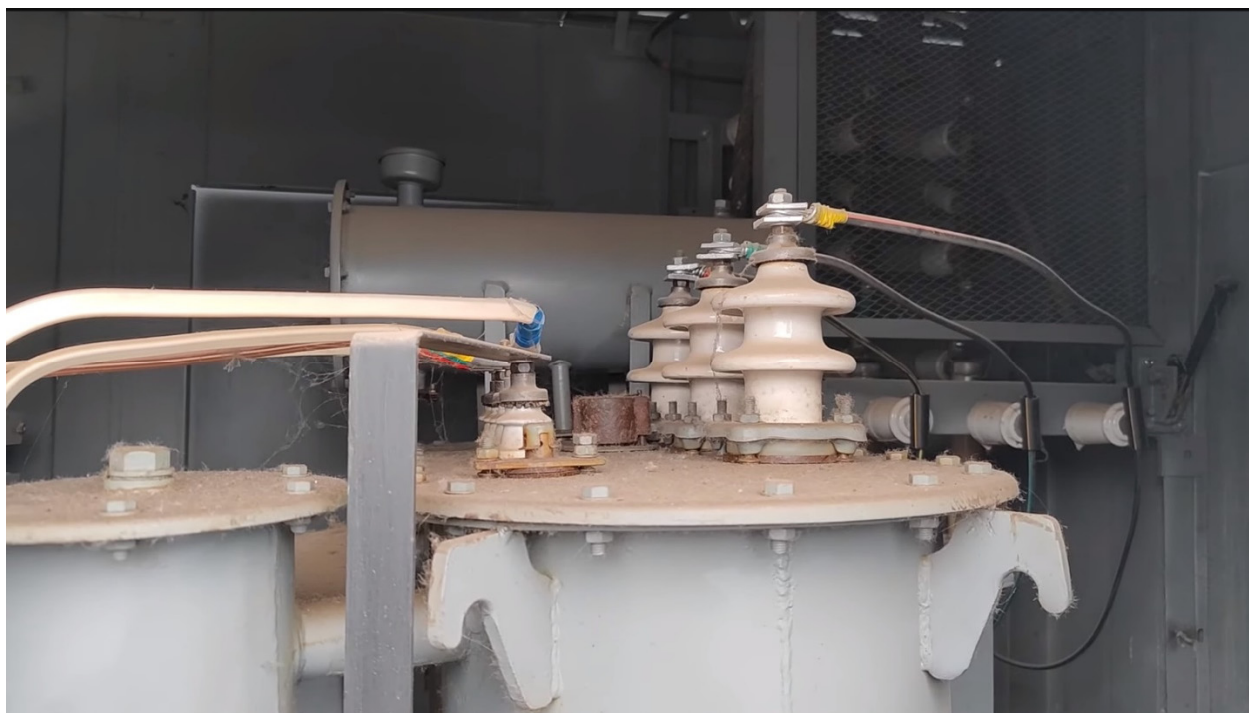


Рисунок 1.3 – Пилове забруднення трансформатора КТП



Рисунок 1.5 – Забруднення ізоляторів ВН КТПк трансформаторного відсіку

Аналіз забруднення прохідних та опорних ізоляторів ВН КТП показує, що більш забрудненими виявляються ізолятори розташовані в нижній частині відсіку, причому ті, що встановлені горизонтально, мають рівень щільності забруднення до 5 разів більше ніж вертикально встановлені.

Це забруднення складається з двох видів речовин [8]:

- іонообмінні з'єднання (кислоти, луги, солі, розчинні силікати), що швидко розчиняються при зволоженні;
- інертні з'єднання (глина, кварцовий глинозем), які виконують роль утримуючої матриці між самими частинками та і частинками з ізолятором.

Наявність сухого шару забруднення практично не змінює розрядну напругу ізоляторів. Однак, ситуація різко змінюється, коли іоноутворюючі речовини, що входять до складу забруднення зволожуються атмосферною вологою, що осідає на ізоляторі [8]. Внаслідок зволоження забруднень на поверхні ізолятора відбувається швидке їх розчинення та утворення електроліту,

що призводить до зростання поверхневого струму витіку ізолятора. Зниження ізолюючої здатності ізоляторів КТП до небезпечних значень відбувається при короткочасних зволоженнях, пов'язаних з випаданням роси на поверхні ізоляторів. При цьому, забруднення на поверхні ізолятора починається нерівномірно прогріватися, внаслідок чого з нього випаровується волога. На тих ділянках ізолятора де густина струму найбільша, відбувається концентрація теплової енергії, а отже їх інтенсивне висушування та утворення ділянки з підвищеним опором. Подальший розвиток цього процесу залежить динаміки висушування шару забруднення, яка в свою чергу, залежить від інтенсивності надходження атмосферної вологи. Якщо забруднення отримає кількість вологи меншу за певну критичну величину, то шар забруднення висохне, а струм витікання впаде до нуля. У протилежному випадку, до вузької, підсушеної ділянки буде прикладена напруга, що перевищує її електричну міцність і виникне частковий пробій повітряного проміжку вздовж поверхні ізолятора та виникне поверхневий частковий розряд. Розряди цього типу короткі (1-3 см), мають синьо-фіолетовий колір і велику кількість паралельних стримерів (рис. 1.6). Далі описаний процес може багаторазово повторюватися. У цілому горіння часткової



Рисунок 1.6 – Часткові розряди вздовж поверхні ізолятора

дуги не призводить до порушення роботи ізоляції, однак викликає в ній додаткові втрати електричної енергії. Коли кільцева зона підсушена зона на ізоляторі збільшиться до кількох сантиметрів розряд згасне. Тому такі розряди безпечні для ізоляції.

При інтенсивному зволоженні шару забруднення на поверхні ізолятора та прикладеній до нього значній напрузі ($2-3,5U_{\text{ном}}$), що за умов експлуатації КТП може бути повзано із замиканням фази на землю або комутаційною перенапругою [4] поверхневі часткові розряди (ПЧР) починають набувати дугового характеру, тобто їх вольт-амперна характеристика (ВАХ) стає падаючою. При цьому виникають кидки струмів розрядів, що перевищують струм витікання в 20-30 разів [7], тобто між ребрами ізолятора в атмосфері водяного пара починають виникати часткові дуги. При появі часткової дуги струм витікання ізолятора значно зростає (до 200 мА), внаслідок чого ПЧР змінюють свій колір з синьо-фіолетового на жовтий (рис. 1.7).



Рисунок 1.7. Формування струмопровідного каналу на ізоляторі із часткових дуг



Рис. 1.8. Перекриття ізолятора дугою (кінцевий пробій)

Зазвичай, часткова дуга переміщується по ізолятору в поперечному напрямку, а її опорна точка рухається по межі підсушеного шара забруднення. Час горіння часткової дуги складає долі секунди. Такі дуги зі струмами витікання більше 100 мА є небезпечними для роботи ізолятора, оскільки з високою ймовірністю призведуть до його повного перекриття дугою (рис. 1.8). На завершальному етапі перекриття ізолятора, відбувається самостійний пробій повітряного проміжку, тобто кінцевий дуговий розряд проходить по найкоротшому шляху – вершинах ребер ізолятора.

Отже, забруднення високовольної ізоляції мають значний вплив на її роботу, а в найбільш тяжких випадках можуть проводити до її повного перекриття і, як наслідок, до технологічних порушень у роботі КТП. Процеси на забрудненій і зволоженій поверхні ізоляторів визначаються рівнем прикладеної напруги та характеристиками забруднення, видом зволоження. Тому необхідно провести аналіз можливих джерел забруднень та видів забруднень, що утворюються на ізоляторах ПЛ, внаслідок їх діяльності.

1.3 Джерела забруднення ізоляторів КТП

За походженням, джерела забруднення ізоляції КТП доцільно поділити на дві групи (рис. 1.9):

- техногенні;
- природні.

Головними джерелами техногенних забруднень небезпечних для ізоляторів КТП є підприємства металургійної, гірничої, хімічної, нафтогазопереробної, електроенергетичної промисловості (ТЕС, ТЕЦ), котельні, також значний вклад у цей процес вносить автотранспорт обладнаний двигунами внутрішнього згорання. Забруднюючі речовини виносяться з підприємств у будь-яких агрегатних станах, а розмір їх частинок коливається в широких межах. Ступінь забруднення ізоляторів КТП внаслідок діяльності промислових підприємств, в першу чергу, визначається їх технологічними процесами та залежить від відстані до них, рози вітрів, також важливими є водність повітря та частота появи сприятливих умови для виникнення інверсії повітря.



Рисунок 1.9 – Класифікація джерел забруднень лінійної ізоляції

Особливо небезпечними для лінійної ізоляції є забруднення від підприємств, ТЕС, ТЕЦ і котелень, що використовують у якості палива вугілля, так як їх викиди містять частки сажі, що характеризується високою електропровідністю.

Відпрацьовані гази двигунів внутрішнього згорання транспортних засобів складаються зі значної кількості речовин і груп речовин. Найнебезпечнішими із яких для високовольної ізоляції КТП, що встановлені поблизу автомобільних доріг з високою інтенсивністю руху є частки сажі та дрібний пил тяжких металів. Частки сажі представляють собою чистий вуглець і мають розмір близько 100 нанометрів. Ці частки мають губчасту структуру і тому захвачують і утримують як органічні речовини – неспалені залишки палива, моторної оливи, так і неорганічні – продукти зносу двигуна, сажу. Внаслідок цього процесу їх маса зростає до 3-х разів, а розмір збільшується до 1 мкм, тобто ці частки сажі перетворюються на агломерати правильної форми. Викиди сажі від дизельних двигунів на 2-3 порядки вищі ніж бензинових двигунів.

До природних джерел забруднення ізоляції КТП прийнято відносити тверді та рідкі частки забруднювачів, що попадають на неї з поверхні землі та поверхні засолених водойм внаслідок дії вітру та випадання роси.

У районах з розвиненим сільським господарством основним джерелом забруднення є пил, що підіймається із землі, а потім осідає на ізоляторах (рис. 1.10, б). Для цих районів характерним є використання значної кількості мінеральних добрив та отрутохімікатів, широке застосування сільськогосподарської техніки. Мінеральні добрива та отрутохімікати значно підвищують вміст розчинних електропровідних сумішей у ґрунті до 0,3-1,5%, а сільськогосподарська техніка піднімає його частки в повітря під час обробки. Особливістю таких забруднювачів є відсутність цементації.

Особливо небезпечними для ізоляції є забруднення пилом із засолених ґрунтів, що знаходяться в районі Північного Криму. До складу такого пилу входить до 20-30% іоноутворюючих речовин, а їх частка з провідністю, що наближається до провідності NaCl сягає 50%. Частинок цих речовин легко розчиняються у воді та утворюють електроліт. Основна маса таких забруднень

знаходиться на нижній частині ізоляторів де їх поверхнева густина забруднення сягає $5-10 \text{ мг/см}^2$. Вміст іоноутворюючих речовин у забрудненні на ізоляторах завжди виявляється вищим у декілька разів, порівняно з ґрунтом. Це пов'язане з тим, що дрібні частинки чистої солі легше відриваються від поверхні землі та піднімаються в повітрі на більшу висоту ніж більш крупні частинки ґрунту.

Рідкі атмосферні опади, зокрема, мряка та сильний туман також сприяють забрудненню ізоляції. Частки забруднення, що викидають промислові підприємства являються ядрами конденсації для водяної пари. Внаслідок накопичення на собі вологи їх маса збільшується і вони опускаються в нижні шари атмосфери. Цей процес призводить до утворення туману, який збільшує концентрацію промислових забруднень в атмосфері.

Також іоноутворюючі частки забруднення, що знаходяться в атмосфері сильно підвищують її провідність, у результаті спостерігається таке явище, як електропровідний туман.



а)



б)

Рис. 1.10. Прохідний ізолятор КТП:

а) чистий; б) забруднений пилом

Якщо КТП встановлена на відстані до декількох кілометрів від берега водойми з солоною водою (моря) то на її електрообладнання будуть осаджуються кристали солі. Це пов'язано з тим, що частина крапель, що захоплює вітер з бризок хвиль випаровується.

У цілому, накопичення забруднень на ізоляторах має складний, тривалий і динамічний характер. Осідання часток бруду на поверхню ізоляторів відбувається безперервно, однак після досягнення певного рівня швидкість накопичення забруднень істотно уповільнюється. Повний цикл накопичення забруднення до критичного рівня може тривати від декількох місяців до декілька років і визначається віддаленістю КТП до джерела забруднення

На території України наявні фактично всі види техногенних і природних джерел забруднення лінійної ізоляції. Максимальний вплив на забруднення ізоляторів чинять промислові підприємства та сільськогосподарське виробництво.

Отже, приведений аналіз показує, що існує науково-технічна проблема зниження ізоляційної стійкості ізоляторів КТП внаслідок їх забруднення викидами штучних і природних джерел. Для вирішення якої необхідно провести аналіз існуючих способів і засобів забезпечення експлуатаційної надійності.

1.4 Шляхи забезпечення експлуатаційної надійності ізоляції КТПк

Експлуатаційна надійність ізоляції КТП визначається станом її функціонування під час роботи і залежить від якості проектування, будівництва, а також умов експлуатації, обслуговування та ремонту. Під час експлуатації КТП можуть виникати пошкодження та технічні порушення в роботі її ізоляції, однак вона відновлюється до працездатного стану шляхом очищення або заміни ізоляторів у випадку їх ушкоджень. Основним показником експлуатаційної надійності є параметр потоку відмов, який відображає частоту і ступінь виникнення відмов під час експлуатації $\omega(t)$.

Параметр потоку відмов – це математичне очікування кількості відмов ізоляторів КТП, які сталися протягом конкретного періоду часу, при умові, що всі вони були відновлені, тобто їх загальна кількість протягом усього терміну експлуатації залишалася незмінною: $n_0 = const$. Потік відмов прийнято розглядати як суму двох складових: $\omega_1(t)$ і ω_2 :

$$\omega = \omega_1(t) + \omega_2, \quad (1.1)$$

де $\omega_1(t)$ – складова, що спричинена природнім старінням і зносом ізоляторів;

ω_2 – складова, що спричинена випадковими зовнішніми чинниками.

Чисельно параметр $\omega_1(t)$ дорівнює відношенню кількості ізоляторів, що відмовили $\Delta n(t)$ до кількості ізоляторів n_0 , що знаходились у роботі впродовж проміжку часу Δt [9]:

$$\omega_1(t) = \frac{\Delta n(t)}{n_0 \cdot \Delta t}, \quad (1.2)$$

Тоді рівність (1.1) матиме вид

$$\omega = \frac{\Delta n(t)}{n_0 \cdot \Delta t} + \omega_2. \quad (1.3)$$

Аналізуючи рівняння (1.3), можна зробити висновок, що підвищення експлуатаційної надійності ізоляції можна досягти шляхом зменшення обох його компонентів. Перший компонент можна зменшити, покращивши якість та ефективність технічного обслуговування ізоляції (проведення своєчасних чисток та заміна дефектних ізоляторів; систематичні перевірки їх стану і т.п.). Другий компонент можна зменшити, використовуючи ізолятори з покращеними розрядними характеристиками.

На практиці підвищення експлуатаційної надійності ізоляції може бути досягнуто шляхом реалізації так званих активного та пасивного підходів (рис. 1.11).

Пасивний підхід передбачає зміну конструкції високовольтного відсіку комплектної трансформаторної підстанції:

- установку ізоляторів з покращеними характеристиками;
- застосування ізоляторів з напівпровідниковою глазур'ю;
- використання полімерних ізоляторів.

Заміна наявних ізоляторів високої напруги в КТП на ізолятори зі збільшеним шляхом струму витікання або на армовані, не усуває проблеми контролю їх забруднення та чищення, а лише збільшує період часу між їх плановим технічним обслуговуванням. Крім того, проведення робіт по демонтажу старих ізоляторів та установці нових потребує до відключення від електропостачання споживачів на тривалий час.



Рисунок 1.11 – Практичні шляхи підвищення експлуатаційної надійності ізоляції КТП

Отже, така реконструкція КТП є економічно недоцільною, оскільки має високу вартість і при цьому не усуває можливих порушень у роботі ізоляції.

З метою запобігання конденсації вологи були розроблені ізолятори вкриті напівпровідниковою глазур'ю, яка є керамічним оксидним напівпровідником з електронною провідністю. Головними функції напівпровідникової глазури полягають у виділенні тепла на поверхні ізолятора при прикладанні напруги та рівномірному розподілу напруги вздовж ізоляційної конструкції. Розрядна напруга таких ізоляторів з навіть при забрудненні їх поверхні може переважати вологорядну напругу звичайних чистих ізоляторів [10,11]. При підвищенні температури на 1 °C її опір знижується на 2,8%, що вважається її негативною властивістю. В умовах інтенсивного забруднення глазур втрачає свої якості через 1,5...2 роки [12], а ізолятори з нею виходять з ладу частіше ніж звичайні. Також поверхневий струм стабілізації, що постійно протікає призводить до значної втрати електричної енергії (до 50 кВт·год) на один ізолятор за рік. Тому встановлення таких ізоляторів у КТПК недоцільне.

Поверхня полімерних ізоляторів є гідрофобною завдяки якій утворення суцільної плівки вологи на них унеможлиблюється під час атмосферних опадів. На ізоляторах під напругою гідрофобна поверхня запобігає утворенню провідних доріжок при вологому та забрудненому стані поверхні ізоляторів від водорозчинних речовин. Гідрофобні властивості виявляються у всіх полімерах, але лише силіконові резини можуть відновлювати та передавати гідрофобність на поверхню за рахунок дифузії компонентів з низькою молекулярною вагою. Це дозволяє їх використовувати для ізоляторів, що працюють в умовах забруднення [13]. Досвід експлуатації полімерних ізоляторів показав, що незважаючи на їх унікальні властивості, вони також потребують періодичного чищення для збільшення терміну служби. Якщо в процесі експлуатації на некерамічних ізоляторах утворився щільний шар забруднення, то його необхідно видаляти обмивання слабким розчином хлорної рідини (відбілювача) у пропорції 1 частина на 4 частини води. Обмив проводиться шляхом легкого оббризування

ізоляторів розчином з ручного пульверизатора. За необхідності, обмив доцільно супроводжувати легким зішкрібанням ганчіркою чи м'якою щіткою. При цьому важливо забезпечити неущкодження кінцевого закладення ізолятора. Після чищення ізолятор необхідно ретельно обмити чистою водою. Використовувати для чищення полімерних ізоляторів будь-які розчинники не рекомендовано.

Таким чином, до головних недоліків полімерних ізоляторів слід віднести їх вищу вартість у порівнянні зі звичайними фарфоровими ізоляторами та складність обслуговування. З урахуванням постійного удосконалення матеріалів з яких виготовляються полімерні ізолятори їх використання може бути доцільним при виробництві нових КТП.

У цілому, заходи пасивного підходу щодо підвищення експлуатаційної надійності КТП шляхом проведення заміни її високовольної ізоляції мають високу вартість, потребують знеструмлення споживачів на тривалий час, а всі альтернативні види ізоляторів також потребують періодичного технічного обслуговування. Отже, даний підхід для КТП є непридатним.

Активний підхід направлений на покращення експлуатаційних характеристик ізоляторів ВН КТП без внесення суттєвих змін у будову КТП і включає наступні заходи:

- планові чищення ізоляторів;
- покриття ізоляторів гідрофобними пастами;
- застосування пристрою для регулювання мікроклімату у високовольних відсіках КТП.

Планові чищення ізоляторів являються традиційним заходом, що знижує ймовірність технологічних відмов КТП. Для більшості КТП, що знаходяться в експлуатації, відсутність пристроїв регулювання мікроклімату у високовольних відсіках, робить планові чищення ізоляторів основним засобом запобігання перекриттям їх дугою.

Згідно до ПТЕЕС [14] терміни очищення ізоляторів встановлюються особою, відповідальною за електрогосподарство, з урахуванням місцевих умов, зазвичай це 6 - 12 місяців. У цілому планові чистки ізоляторів підвищують експлуатаційну надійність ізоляції КТП. З іншої сторони при низькій інтенсивності забруднення ізоляторів їх планова чищення буде передчасним, при цьому відключення споживачів електроенергії та витрата високо кваліфікованих трудових ресурсів виявляться даремними [15]. Підвищити ефективність планових чисток можливо за допомогою контролю забрудненості ізоляторів, однак серійні КТП такими технічними засобами не обладнані.

Позитивний ефект гідрофобних паст заключається в тому, що частинки забруднень, що попадають на ізолятор, огортаються жирною плівкою та ізолюються одна від одної і таким чином не піддаються зволоженню. Досвід застосування гідрофобних покриттів на основі мастила ЦИАТИМ-201 показав їх непридатність для ізоляторів КТП. Перекриття ізоляторів відмічались вже через кілька місяців після нанесення [16]. Інші гідрофобні покриття на основі кремнійорганічних сполук у залежності від інтенсивності забруднення ізоляторів втрачають свої гідрофобні властивості через 1 - 3 роки [10]. Тому багатьма електропостачальними компаніями визнані неефективними для застосування у якості гідрофобного покриття для ізоляторів [17]. Загальним недоліком гідрофобних покриттів являються великі витрати кваліфікованих трудових ресурсів на зняття старого покриття та нанесення нового, а також тривале знаходження КТП у профілактичному ремонті.

Також розроблені так звані «тверді» гідрофобні покриття. Вони створюються шляхом нанесення на ізолятор пульверизатором. Далі рідка плівка полімеризується та утворює тверде гідрофобне покриття ізолятора. Найпоширенішими серед твердих покриттів стали плівки, що зроблені на основі кремнійорганічних смол. Застосування цих покриттів дозволяє збільшити інтервали між чищенням ізоляторів у 3-5 разів [18]. Важливо відзначити, що, незважаючи на високу ефективність, повністю уникнути потреби в очищенні ізоляторів не вдається. Це пов'язано з тим, що при накопиченні забруднення на поверхні ізолятора низькомолекулярні сполуки вже не можуть проникати в шар

забруднення для передачі йому гідрофобних властивостей. Крім того, кремнійорганічна оболонка може відокремлюватися від фарфорової поверхні. На практиці виявлено, що у багатьох випадках спостерігалася швидка втрата гідрофобних властивостей нанесеним захисним покриттям, внаслідок впливу на нього забруднюючих речовин та його руйнування [11].

Процес нанесення та заміни гідрофобних покриттів на ізолятори фактично є тим самим чищенням ізоляторів, різниця полягає лише в періодичності. Проте на його здійснення потрібно витратити більше часу ніж на звичайне чищення і, цей аргумент, практично нівелює всі вигоди від впровадження гідрофобних покриттів.

Вплив на такі параметри як відносна вологість повітря ϕ та температура повітря всередині високовольтного відсіку КТП t_n дозволяє запобігти конденсації вологи з повітря на поверхню ізоляторів, а отже і уникнути розвитку дугового розряду на їх забрудненій поверхні. Потраплянню вологого повітря сприяє недостатня герметичність місць кріплення прохідних ізоляторів, наявність отворів у нижній частині високовольтних відсіків для ввідного кабелю, проникнення вологи через щілини в даху та стінках КТП, порушення герметичності внаслідок старіння гумових ущільнень ввідних ізоляторів, наявність нерегульованих і постійно відкритих решіток у верхній та нижній частині відсіку силових трансформаторів КТП і т. п.

Значний досвід був накопичений під час розробки та впровадження в промислову експлуатацію пристроїв і систем керування мікрокліматом для шаф 6-10 кВ комплектних розподільних установок зовнішнього установлення (КРУЗ) [4, 5, 19] і може бути використаним для високовольтних відсіків КТП. Так були вивчені кліматичні умови роботи ізоляції КРУЗ, проведені лабораторні дослідження ізоляторів КРУЗ в умовах конденсації вологи, отримана залежність рівнів розрядної напруги ізоляторів від довжини шляху струму витікання [20-22]. Також була розрахована номінальна потужність нагрівальних елементів для різних типів шаф КРУЗ і запропоновані пристрої для автоматичного регулювання мікроклімату в них.

У [23] представлені результати аналізу ушкоджень КРУЗ у розподільчих мережах та наведені показники експлуатаційної надійності, встановлена залежність розподілу ймовірності виникнення перекриття ізоляторів від рівня відносної вологості обґрунтована величина уставки спрацювання пристрою автоматичного регулювання мікроклімату ($\varphi > 75-80\%$).

Наступним етапом розвитку систем керування мікрокліматом в КРУЗ була розробка системи з регулюванням за різницею температур повітря всередині та зовні шафи КРУЗ, що дозволило отримати постійне перевищення температури всередині шафи над температурою зовнішнього повітря [24]. Однак, використання цього способу призвело до збільшення приблизно в два рази витрати електроенергії на обігрів і в подальшому основним способом регулювання мікроклімату у КРУЗ залишився спосіб, заснований контролі відносної вологості повітря [25].

Розроблені системи поступово удосконалювалися, у систему регулювання мікроклімату за відотною вологістю було запропоновано додати форсований обігрівом, що вмикався за відотною вологістю $\varphi_{\text{п}} \geq 80\%$. а примусову циркуляцію повітря здійснювати за рахунок роботи штатних чи додатково встановлених вентиляторів [18]. Подібні технічні рішення пропонувалися і закордоном [26]

Загальним недоліком розглянутих систем регулювання мікроклімату в високовольтних шафах комплектних розподільних установок є надлишкова витрата електроенергії на їх обігрів. Це пов'язане з тим, що за параметр контролю мікроклімату в розглянутих пристроях вибрано перевищення температури точки роси над температурою поверхні ізолятора, однак збільшення відотної вологості більше 80% не завжди призводить до конденсації вологи на ізоляторі. Таким чином, на практиці досить часто отримувалася ситуація коли при $\varphi_{\text{п}} \geq 80\%$ нагрівальні елементи в шафі працювали марно.

Для подолання вказаних недоліків був розроблений пристрій автоматичного регулювання мікроклімату шаф КРУЗ [19, 22]. Він вимірював відносну вологість і температуру повітря всередині шафи та температуру

ізолятора. Використовуючи ці параметри мікропроцесор пристрою робив короткостроковий прогноз можливості випадіння роси на ізоляторах шафи. Горизонту прогнозування 2 год було достатньо, щоб завчасно увімкнути обігрів шафи та запобігти утворенню конденсату. Використання такого алгоритму керування мікрокліматом дало змогу значно знизити витрати електроенергії на обігрів шаф.

Таким чином, спираючись на досвід отриманий при розробці систем керування мікрокліматом у шафах КРУЗ, для забезпечення надійності функціонування КТП доцільно їх доукомплектовувати системою контролю мікрокліматом. Таке технічне рішення дозволить виключити випадення роси на високовольтних ізоляторах і дасть змогу проводити їх чищення лише при капітальних ремонтах КТП. Тим самим буде досягнене підвищення експлуатаційної надійності КТП і скорочення витрат часу на чистку ізоляції і планові відключення електроспоживачів.

1.5 Висновки

1. Виявлено, що в експлуатаційні дефекти ізоляції КТП складають 21% у загальному підсумку, а на природні чинники, що їх викликають можливо впливати і тим самим можливо забезпечити надійність функціонування КТП.

2. Встановлено, що забруднення ізоляторів ВН КТПк впливають на їх роботу, а при досягненні критичних значень можуть проводити до повного перекриття ізолятора. Процеси на забрудненій і зволоженій поверхні ізоляторів визначаються рівнем прикладеної напруги та характеристиками забруднення, видом зволоження.

3. Виявлено, що на території України присутні всі основні види техногенних і природних джерел забруднення ізоляції КТП. Максимальний вплив на забруднення ізоляторів чинять промислові підприємства та сільськогосподарське виробництво.

4. Встановлено, що для підвищення експлуатаційної надійності КТП найбільш доцільним є розробка системи керування мікрокліматом, що дасть змогу скоротити витрати часу на чистку ізоляції і планові відключення електроспоживачів.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ВІДСІКУ КТП

За оперативного керування режимом роботи обігріву високовольтного відсіку КТП, а також для моделювання способів керування автоматичним обігрівом на персональному комп'ютері, необхідно отримати залежності параметрів мікроклімату і температури поверхні ізолятора від поточного часу.

2.1 Рівняння теплового балансу ізолятора високовольтного відсіку КТП

Рівняння теплового балансу для високовольтного відсіку КТП має вид [20]:

$$Q_{c.b} + Q_{n.e} + Q_{c.t} + Q_{c.ш} = Q_{c.від} + Q_{щ}, \quad (2.1)$$

де $Q_{c.b}$ – кількість тепла, що отримує високовольтний відсік від сонячного випромінювання;

$Q_{n.e}$ – кількість тепла, що виділяє нагрівальний елемент;

$Q_{c.t}$ – кількість тепла, що виділяє трансформатор;

$Q_{c.ш}$ – кількість тепла, що отримує шафа від струмопровідних шин;

$Q_{c.від}$ – кількість тепла, що втрачається через стінки відсіку;

$Q_{щ}$ – кількість тепла, що втрачається через щілини та отвори відсіку.

З урахуванням (2.1) запишемо рівняння теплового балансу ізолятора, що знаходиться у високовольтному відсіку КТП для моменту часу коли на ньому може випасти роса:

$$Q_{конв} + Q_{i.c.b} + Q_{випр} = Q_{c.ш} + Q_{конд} + Q_{c.вит}, \quad (2.2)$$

де $Q_{конв}$ – кількість тепла, що втрачає ізолятор внаслідок конвенктивного теплообміну;

$Q_{i.c.b}$ – кількість тепла, що втрачає ізолятор внаслідок контакту зі стінкою відсіку;

$Q_{\text{випр}}$ – кількість тепла, що втрачає ізолятор внаслідок випромінювання;

$Q_{c.ш}$ – кількість тепла, що отримує ізолятор від контакту зі струмопровідною шиною, яку утримує;

$Q_{\text{конд}}$ – кількість тепла, що виділяється внаслідок конденсації водяної пари на поверхні ізолятора;

$Q_{c.вит}$ – кількість тепла, що виділяється внаслідок протікання струмів витоку.

Аналіз складових рівнянь (2.1) і (2.2) для можливих сценаріїв випадіння роси на ізоляторі показує, що можливо зробити наступні припущення:

- вважати, що $Q_{c.b} = 0$, оскільки в нічні та ранкові години нагрів КТП сонячною радіацією відсутній;

- вважати, що $Q_{c.ш} = 0$, в нічні та ранкові години струми навантаження не викликають нагріву шин ВН, в першу чергу це стосується КТП електроспоживачів ЖКК, підприємств зі двозмінним графіком роботи;

- вважати, що $Q_{i.c.від} = 0$ та $Q_{c.t} = 0$, оскільки поверхня контакту ізолятора значно більша поверхні контакту з корпусом високовольтного відсіку та струмопровідною шиною. Крім того, в нічні та ранкові години струми навантаження КТП знижені та не викликають значного нагріву шин ВН і трансформатора, також в трансформаторному відсіку за допомогою вентиляційних отворів створюються штучні протяги;

- вважати, що $Q_{c.вит} = 0$ та $Q_{\text{конд}} = 0$ оскільки в порівнянні з іншими складовими вони мають незначну величину [27].

Ізолятор можливо вважати циліндричним тілом з гладкою поверхнею з розвиненою шорсткістю, оскільки виконується умова

$$\bar{h}_p = \frac{h_p}{D_i} < 0,1, \quad (2.3)$$

де h_p – висота ребер ізолятора;

D_i – діаметр ізолятора.

З урахуванням всіх зроблених припущень розрахунок теплообміну ізолятора доцільно виконати за схемою для рівних поверхонь, а шорсткість враховувати при визначенні коефіцієнтів тепловіддачі.

2.2 Залежність температури ізолятора ВН від температури повітря

У відповідності з поставленим вище завданням потрібно здійснити опис теплопередачі в твердому тілі складної форми, що знаходиться в теплообміні з неоднорідним середовищем. Вирішення цього завдання доцільно здійснити на основі загальних підходів теорії тепло- і масопереносу. Зокрема, для знаходження температури тіла, як функції просторових координат і часу, потрібно сформулювати крайову задачу для рівняння теплопровідності та підібрати метод її вирішення. Таким чином, поставлена задача може бути розв'язана в три етапи:

1) перехід від реального об'єкта до моделі, яка зберігала б основні риси оригіналу і одночасно істотно спрощувала розв'язок задачі;

2) математичний запис моделі (формулювання крайової задачі для диференціального рівняння в часткових похідних)

3) вибір методу вирішення крайової задачі. Якщо вдасться сформулювати крайову задачу у формі так, щоб можна підібрати стандартне рішення, то поставлена мета буде досягнута найкоротшим шляхом.

Розглянемо практичну реалізацію цієї методики. Припустимо, що ізолятор – циліндр. Тоді, температура його поверхні у кожній точці буде функцією часу та просторових координат, тобто:

$$t_i = f(\tau, r, \delta, \psi), \quad (2.4)$$

де r – радіус;

δ, ψ – кути повороту радіусу;

τ – час.

Тоді усереднене значення температури по поверхні ізолятора складе

$$t_{\text{п.і}} = \int_S t_i dS, \quad (2.5)$$

де S – площа поверхні ізолятора.

Аналіз рівняння (2.5) показує, що використовувати в якості моделі ізолятора безпосередньо тіло циліндричної форми недоцільно, оскільки це значно ускладнить розв'язок поставленої задачі. Тому приймемо в якості моделі ізолятора високовольтного відсіку КТП геометричне тіло більш простої форми. Аналіз розмірів ізоляторів ВН КТП показує, що співвідношення їх розмірів лежить у межах

$$0,8 \leq \frac{h_i}{D_{\text{ц}}} \leq 1,2, \quad (2.6)$$

де h_i – висота ізолятора;

$D_{\text{ц}}$ – діаметр еквівалентного циліндра.

Виконання умови (2.6) дозволяє використати в якості моделі об'єкта тіло кульової форми. Така модель дозволяє знизити мірність задачі з 3-ї до 1-ї.

Тоді еквівалентний радіус кулі R визначається через радіус циліндра $R_{\text{ц}}$ з наступним чином

$$S = 2\pi R_{\text{ц}} (R_{\text{ц}} + h_{\text{ц}}) = 4\pi R^2. \quad (2.7)$$

Рівняння теплопровідності кулі матиме наступний вигляд

$$\frac{1}{a} \frac{\partial t_{\text{к}}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_{\text{к}}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{dt_{\text{к}}}{d\tau}, \quad 0 < r < R. \quad (2.8)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності;

$t_{\text{к}}$ – температура кулі.

Гранична умова до рівняння (2.8) матиме вигляд

$$\left. \frac{\partial t_{\kappa}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (2.9)$$

і показує, що центрі кулі теплообмін відсутній.

Гранична умова для на поверхні кулі $r = R$ описує процес теплообміну з навколишнім середовищем.

Будемо вважати, що навколишнє середовище ізолятора складається тільки із внутрішнього повітря та огорожувальних елементів високовольтного відсіку КТП, а теплообмін ізолятора з середовищем відсіку здійснюється завдяки механізмів конвекції та випромінювання. За цих умов, рівняння теплового балансу одиничного елемента поверхні об'єкта матиме вигляд:

$$q = q_{\text{конв}} + q_{\text{випр}}, \quad (2.10)$$

де q – потік тепла всередину ізолятора;

$q_{\text{конв}}$ – конвективний тепловий потік тепла;

$q_{\text{випр}}$ – потік тепла внаслідок випромінювання.

Конвективний тепловий потік визначається за виразом [28]:

$$q_{\text{конв}} = \alpha_{\kappa} (t_{\text{п}} - t_{\text{п.в}}), \quad (2.11)$$

де α_{κ} – коефіцієнт конвективного теплообміну;

$t_{\text{п}}$ – температура поверхні;

$t_{\text{п.в}}$ – температура повітря всередині високовольтного відсіку;

Встановимо взаємозв'язок між температурою, тепловим потоком на поверхні кулі з параметрами, що характеризують теплообмін з навколишнім

середовищем (α' та $t_{\text{н.п}}$) наступним чином:

$$\lambda \frac{\partial t_{\text{к}}}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha' (t|_{r=R} - t_{\text{н.п}}), \quad (2.12)$$

де

$$t|_{r=R} = t_{\text{п}}, \quad (2.13)$$

$$\alpha' = c_{\text{випр}} + \alpha_{\text{к}}, \quad (2.14)$$

$$t_{\text{н.п}} = \frac{c_{\text{випр}} t_{\text{о.к}}}{\alpha'}, \quad (2.15)$$

Потік тепла випромінюванням визначимо за формулою Стефана-Больцмана [28]:

$$q_{\text{випр}} = \varepsilon_0 \sigma \left[\left(\frac{t_{\text{п.і}} + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{о.к}} + 273,15}{100} \right)^4 \right], \quad (2.16)$$

ε_0 – відносна випромінювальна здатність тіла;

σ – постійна Стефана-Больцмана;

$t_{\text{п.і}}$ – температура поверхні ізолятора;

$t_{\text{о.к}}$ – температура обмежуючих конструкцій.

З метою спрощення проведемо лінеаризацію (2.16), для цього виконаємо заміни

$$\left(\frac{t_{\text{п}} + 273,15}{100} \right)^4 = n_1 t_{\text{пов}} - p_1; \quad (2.17)$$

$$\left(\frac{t_{\text{о.к}} + 273,15}{100} \right)^4 = n_2 t_{\text{о.к}} - p_2, \quad (2.18)$$

де n_1, n_2, p_1, p_2 – апроксимаційні коефіцієнти.

Для діапазону температур від 0 до 30 °C будуть справедливими наступні співвідношення: $p_1 - p_2 = 0$, $n_1 = n_2 = 0,96$ за похибки апроксимації $\approx 7\%$.

Підставивши (2.17) і (2.18) у (2.16) отримаємо наступну рівність

$$q_{\text{випр}} = c_{\text{випр}} (t_{\text{п}} - t_{\text{о.к}}). \quad (2.19)$$

де

$$c_{\text{випр}} = n_1 \varepsilon_0 \sigma. \quad (2.20)$$

Отже, рівняння (2.12) можливо розглядати як шукану граничну умову. Однак, вхідним параметром згідно умови задачі є $t_{\text{пов}}$, а параметр $t_{\text{о.к}}$ не відноситься до вхідних змінних. З метою усунення цього недоліку встановимо функціональну залежність $t_{\text{п}} = f(t_{\text{о.к}})$.

У загальному випадку $t_{\text{п}} \neq t_{\text{о.к}}$, тобто $t_{\text{п}}/t_{\text{о.к}} = m \neq 1$. У період нічних похолодань $m > 1$, а вдень внаслідок сонячного нагріву $m < 1$. Тоді в першому наближенні залежність між $t_{\text{п}}$ та $t_{\text{о.к}}$ можливо виразити наступним чином

$$t_{\text{о.к}} = \frac{t_{\text{п}}}{m}. \quad (2.21)$$

Тоді на основі (2.12) і (2.21) запишемо остаточний вираз

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha (t|_{r=R} - t_{\text{п.в}}), \quad (2.22)$$

де

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \frac{c_{\text{випр}}}{m}. \quad (2.23)$$

Для завершення формулювання крайової задачі виберемо початкову умову, тобто розподіл температур у момент часу $\tau = 0$. Оскільки характер цього розподілу наперед не відомий, тому сформулюємо початку умову в загальному вигляді

$$t|_{\tau=0} = f(r), \quad (2.24)$$

де $f(r)$ – довільна функція координати.

З метою спрощення розв'язку крайової задачі (2.23) запишемо наступним чином

$$t|_{\tau=0} = t_0, \quad (2.25)$$

де t_0 – константа.

Отже, крайова задача описується рівняннями (2.8), (2.9), (2.22), (2.29). Існує декілька можливих її розв'язків [29, 30], для даного випадку найбільше підходить той в якому температура $t_{\text{пов}}$ на інтервалі часу, що розглядається має лінійну залежність

$$t_{\text{п.в}} = t_0 + b \cdot \tau, \quad (2.26)$$

де b – коефіцієнт.

Використавши відомий розв'язок крайової задачі [31] на основі інтегрального перетворення Лапласа отримаємо

$$t(r, \tau) = t_0 + \frac{bR^2}{a} \left[\text{Fo} - \frac{1}{6} \left[(1 + 0,5\text{Bi}) - \bar{R} \right] \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^3 \bar{R}} \sin(\mu_n \bar{R} \cdot e^{-\mu_n^2 \text{Fo}}), \quad (2.27)$$

де

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2\text{Bi} \sqrt{\mu_n^2 + (\text{Bi}^2 - 1)^2}}{\mu_n^2 + \text{Bi}^2 - \text{Bi}}, \quad (2.28)$$

Значення μ_n для (2.27), (2.28) знайдемо шляхом розв'язування наступного трансцендентного рівняння

$$\operatorname{tg} \mu = -\frac{1}{\operatorname{Bi} - 1} \mu. \quad (2.29)$$

Безрозмірні коефіцієнти Fo , Bi , $\bar{R}$ з виразів (2.27) – (2.29):

$$\operatorname{Fo} = \frac{a\tau}{R^2}; \quad (2.30)$$

$$\operatorname{Bi} = \frac{\alpha R}{\lambda}; \quad (2.31)$$

$$\bar{R} = \frac{r}{R}. \quad (2.32)$$

Зробивши заміну в (2.27)

$$\theta = \left[\operatorname{Fo} - \frac{1}{6} \left[(1 + 0,5\operatorname{Bi}) - \bar{R} \right] \right], \quad (2.33)$$

та прийнявши $R = 1$, отримаємо

$$t(r, \tau) = t_0 + \frac{bR^2}{a} \theta, \quad (2.34)$$

Величина θ – це функція трьох безрозмірних параметрів Fo , Bi , $\bar{R}$. Якщо $\operatorname{Bi} = \infty$, то ця величина відносно параметра Fo лінійна, при зменшенні Bi ця залежність стає нелінійною [30]. Позначимо функцію θ через θ_n для випадку коли $R = 1$ та визначимо діапазон можливої зміни. Для цього визначимо параметри a , α , τ , R , λ , що входять до рівнянь (2.30) і (2.31).

Виходячи з того, що для фарфору зі щільністю 2000 кг/м^3 теплофізичні параметри складають $c = 0,253 \text{ Вт}\cdot\text{год}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{К})$, $\lambda = 0,837 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{К})$, $\alpha = 1,49\cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{год}$, а еквівалентний радіус кулі R лежить у діапазоні від $0,05$ до $0,2 \text{ м}$ прийmemo, що $\tau \leq 1 \text{ год}$.

У вираз (2.23) входять параметри α_k і $c_{\text{випр}}$. Значення коефіцієнту конвективного теплообміну для випадку природньої конвекції можливо знайти з критеріального рівняння [32]

$$\text{Nu} = c' (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n M, \quad (2.35)$$

де Nu – число Нусельта

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_k R}{\lambda_{\text{п}}}, \quad (2.36)$$

Gr – число Грасгофа

$$\text{Gr} = \frac{g \beta_{\text{п}} R^3 (t_{\text{п}} - t_{\text{п.в}})}{\mu_{\text{п}}^2}, \quad (2.37)$$

де $\lambda_{\text{п}}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря;

g – прискорення вільного падіння;

$\beta_{\text{п}}$ – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря;

$\rho_{\text{п}}$ – густина повітря;

$\mu_{\text{п}}$ – динамічна в'язкість повітря;

Pr – число Прандтля для повітря;

c', n, M – постійні.

Використовуючи рівняння (2.35)-(2.37) визначимо коефіцієнт конвективного теплообміну

$$\alpha_k = \frac{\lambda_{\text{п}}}{R} c' (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n M. \quad (2.38)$$

Використовуючи вихідні дані (табл. 2.1) виконаємо розрахунок α_k . Значення констант c' , n , M приймаємо для тіла сферичної згідно [32]. Значення α_k були розраховані за виразом (2.23) і приведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до розрахунку параметрів Bi та Fo

Параметр	Позначення	Значення	Од. вим
Теплопровідність повітря	$\lambda_{\text{п}}$	0,026	Вт/(м·°К)
Густина повітря	$\rho_{\text{п}}$	1,177	кг/м ³
Динамічна в'язкість повітря	$\mu_{\text{п}}$	1,983	кг/(м·с)
Число Прандтля	Pr	0,708	-
Різниця температура поверхні та повітря всередині відсіку ВН	$t_{\text{п}} - t_{\text{п.в}}$	3,33	°С
Постійна	c'	0,49	-
Постійна	n	0,25	-
Постійна	M	1	-

Визначимо ефективний ступінь чорноти для системи «об'єкт-обмежуючі конструкції»

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{S}{S_{\text{о.к}}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{о.к}}} - 1 \right)}. \quad (2.39)$$

У зв'язку з тим, що $S \ll S_{\text{о.к}}$ вираз (2.39) набуде більш простого вигляду:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon = 0,95. \quad (2.40)$$

Використовуючи вираз (2.20) отримаємо значення $c_{\text{випр}} = 5,17$ Вт/(м² ·°С).

Значення Bi та Fo визначимо за допомогою отриманих виразів (2.30) і (2.31). Результати розрахунків представлено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку параметрів Bi та Fo

Параметри	$R, м$			
	0,05	0,1	0,15	0,20
при $m = 1,2$ та $t_{\Pi} - t_{B,\Pi} = 2^{\circ}C$				
α_K	2,98	2,65	2,36	2,23
α	7,25	6,96	6,71	6,54
Bi	0,44	0,83	1,16	1,56
Fo	0,24	0,15	0,083	0,04
при $m = 1,0$ та $t_{\Pi} - t_{B,\Pi} = 2^{\circ}C$				
α_K	2,98	2,65	2,36	2,23
α	8,19	7,82	7,55	7,4
Bi	0,51	0,93	1,32	1,77
Fo	0,24	0,15	0,083	0,04
при $m = 0,8$ та $t_{\Pi} - t_{B,\Pi} = 2^{\circ}C$				
α_K	2,98	2,65	2,36	2,23
α	9,48	9,12	8,81	8,69
Bi	0,56	1,09	1,56	2,08
Fo	0,24	0,15	0,083	0,04
при $m = 0,8$ та $t_{\Pi} - t_{B,\Pi} = 4^{\circ}C$				
α_K	3,70	3,16	2,86	2,65
α	9,97	9,62	9,85	9,12
Bi	0,64	1,15	1,76	2,18
Fo	0,24	0,15	0,083	0,04

Аналіз отриманих результатів (табл. 2.2) показує, що значення параметрів Bi та Fo лежать у таких межах:

$$0,4 < Bi < 2,0;$$

$$0,04 < Fo < 2,4,$$

тобто, функція θ_{Π} змінюється досить у вузьких межах параметрів Bi та Fo . Крім того, у цьому діапазоні $\theta_{\Pi}(Bi, Fo)$ практично лінійна. Тому запишемо вираз для

визначення функції θ_{Π} наступим чином:

$$\theta_{\Pi} = kFo. \quad (2.41)$$

де k – коефіцієнт пропорційності. Чисельні значення $k = f(Bi)$ при $Fo < 1$ приведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнта пропорційності k

Bi	∞	3,0	1	0,7	0,4
k	1,0	0,8	0,58	0,46	0,29

Підставивши останнє рівняння в (2.34) з урахуванням $\bar{R}=1$ і $t = t_{\Pi,i}$ отримаємо

$$t = t_{\Pi,i} = t_0 + \frac{bR^2}{a} kFo, \quad (2.42)$$

Проведемо спрощення отриманого виразу (2.42) для підставимо в нього вираз (2.30)

$$t_{\Pi,i} = t_0 + \frac{bR^2}{a} k \frac{a\tau}{R^2} = t_0 + bk\tau. \quad (2.43)$$

Підставивши (2.42) рівняння (2.26) отримаємо, °C

$$t_{\Pi,i} = t_0 + bk\tau = t_0 + \left(\frac{t_{\Pi,B} - t_0}{\tau} \right) k\tau = t_0(1 - k) + kt_{\Pi,B}. \quad (2.44)$$

Отримане рівняння (2.44) встановлює залежність між температурою поверхні ізолятора і температурою повітря всередині відсіку ВН КТП.

2.3 Залежність температури повітря від часу та штучних джерел нагріву

Тепловтрати через стінки високовольтного відсіку КТП:

$$Q_{\text{ст}} = k_u F \Delta t. \quad (2.45)$$

де k_u – коефіцієнт теплопередачі:

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\Delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_3}}. \quad (2.46)$$

$\alpha_{\text{в}}$, α_3 – коефіцієнти, відповідно, тепловіддачі внутрішньою та зовнішньою поверхнею стінок високовольтного відсіку КТП;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності стінок високовольтного відсіку КТП;

F – площа поверхні високовольтного відсіку;

Δt – різниця між температурами повітря всередині високовольтного відсіку $t_{\text{п.в}}$ та зовні t_3 .

Втрати тепла через щілини та отвори високовольтного відсіку визначимо згідно рівняння [32]:

$$Q = k_{\text{п.об}} \cdot V_{\text{в}} \cdot c_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \Delta t, \quad (2.47)$$

де $k_{\text{п.об}}$ – кратність повітрообміну;

$V_{\text{в}}$ – об'єм відсіку;

$c_{\text{п}}$ – питома теплоємність повітря.

Швидкість зміни температури повітря в об'ємі високовольтного відсіку пропорційна кількості тепла, що втрачається через його стінки і у випадку відключеного штучного обігріву

$$c_{\Pi} \rho V_B \frac{dt_{\Pi.B}}{d\tau} = - \left(k_{\Pi.об} F(t_{\Pi.B} - t_{\Pi.3}) + k_{\Pi.об} V_B c_{\Pi} \rho_{\Pi} (t_{\Pi.B} - t_{\Pi.3}) \right), \quad (2.48)$$

ввівши заміну в (2.48): $z = k_{\Pi.об} F + k_{\Pi.об} c_{\Pi} \rho_{\Pi} V_B$ та спростивши отримаємо

$$\frac{dt_{\Pi.B}}{d\tau} + \frac{z}{c_{\Pi} \rho_{\Pi} V_B} t_{\Pi.B} = \frac{z}{c_{\Pi} \rho_{\Pi} V_B} t_{\Pi.3}. \quad (2.49)$$

Отримане рівняння – це диференціальне рівняння 1-го порядку, загальний розв’язок якого має вигляд [33]:

$$y = \frac{B}{A} + c_1 e^{-a_1 \tau}. \quad (2.50)$$

де A, B – коефіцієнти

$$A = \frac{z}{c_{\Pi} \rho_{\Pi} V_B}, \quad B = \frac{z}{c_{\Pi} \rho_{\Pi} V_B} \tau. \quad (2.51)$$

Тоді

$$t_{\Pi.B} = t_{\Pi.3} + c_1 e^{-\frac{z}{c_{\Pi} \rho_{\Pi} V_B} \tau}. \quad (2.52)$$

У момент часу $\tau = 0$ температура повітря у високовольтному відсіку дорівнює початковій температурі: $t_{\Pi.B} = t_{\Pi.поч}$, тоді $c_1 = t_{\Pi.3} - t_{\Pi.B}$ і частковий розв’язок рівняння (2.49) матиме вигляд

$$t_{\Pi.B} = t_{\Pi.3} + (t_{\Pi.поч} - t_{\Pi.3}) e^{-\frac{z}{c_{\Pi} \rho_{\Pi} V_B} \tau}. \quad (2.53)$$

У рівнянні (2.49) роботу джерела нагріву врахуємо наступним чином

$$\frac{dt_{\text{п.в}}}{d\tau} + \frac{z}{c_{\text{п}}\rho_{\text{п}}V_{\text{в}}}t_{\text{п.в}} = \frac{Q_{\text{дж.об}}}{c_{\text{п}}\rho_{\text{п}}V_{\text{в}}} + \frac{z}{c_{\text{п}}\rho_{\text{п}}V_{\text{в}}}t_{\text{п.з}}. \quad (2.54)$$

Загальний розв'язок (2.53) матиме вигляд

$$t_{\text{п.в}} = \frac{Q_{\text{дж.об}} + zt_{\text{п.з}}}{c_{\text{п}}\rho_{\text{п}}V_{\text{в}}} + c_2 e^{-\frac{z}{c_{\text{п}}\rho_{\text{п}}V_{\text{в}}}\tau}. \quad (2.55)$$

Для моменту часу $\tau = 0$, $t_{\text{п.в}} = t_{\text{п.поч}}$, тоді $c_2 = t_{\text{п.з}} - t_{\text{п.в}} - Q_{\text{дж.об}}/z$ і частковий розв'язок рівняння (2.54) матиме вигляд

$$t_{\text{п.в}} = t_{\text{п.з}} + (t_{\text{п.поч}} - t_{\text{п.з}})e^{-\frac{z}{c_{\text{п}}\rho_{\text{п}}V_{\text{в}}}\tau} + \frac{Q_{\text{дж.об}}}{z} \left(1 - e^{-\frac{z}{c_{\text{п}}\rho_{\text{п}}V_{\text{в}}}\tau} \right). \quad (2.56)$$

Якщо прийняти, що $t_{\text{п.з}} = t_{\text{п.поч}}$, то отримане рівняння (2.56) набуде більш простого вигляду

$$t_{\text{п.в}} = t_{\text{п.з}} + \frac{Q_{\text{дж.об}}}{z} \left(1 - e^{-\frac{z}{c_{\text{п}}\rho_{\text{п}}V_{\text{в}}}\tau} \right). \quad (2.57)$$

Аналіз двох останніх рівнянь показує, що для діапазону температур повітря всередині високовольтного відсіку КТП від 0 до 15 °С виключення з них другого доданку призводить до похибки не більше 1,5%, що цілком допустимо для вирішення інженерних задач.

2.4 Залежність відносної вологості повітря від його температури

Відносну вологість повітря у високовольтному відсіку КТП можливо представити у вигляді лінійної залежності

$$\varphi_{п.в}|(\tau) = f(\varphi_{в.поч}, t_{п.з}, t_{п.в}). \quad (2.58)$$

де $\varphi_{п.в}$ – відносна вологість повітря всередині високовольтного відсіку КТП у момент часу τ ;

$\varphi_{п.поч}$ – відносна вологість повітря в момент часу $\tau = 0$.

Для параметрів мікроклімату, що є найбільш ймовірними для утворення конденсату з повітря на ізоляторах високовольтного відсіку: $70 \leq \varphi_{п.в} \leq 100\%$; $0 \leq t_{п.з} \leq 15^\circ\text{C}$; $1 \leq t_{п.в} \leq 25^\circ\text{C}$ за допомогою методу найменших квадратів була отримана лінійна залежність [22]:

$$\varphi_{п.в} = 9,9 + 0,88\varphi_{п.з} + 4,92t_{п.з} - 4,75t_{п.в}. \quad (2.59)$$

Для проведення розрахунку теплових режимів роботи високовольтного відсіку КТП в тому числі з джерелом штучного нагріву, необхідно також отримати залежність між відносною вологістю повітря та його температурою після відключення джерела штучного нагріву

$$\Delta\varphi_{п.з} = \Delta\varphi \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_1}} \right). \quad (2.60)$$

де $\Delta\varphi$ – різниця між максимальним і мінімальним значенням відносної вологості,

$\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$; T_1 – постійна часу.

Опишемо процес вирівнювання відносної вологості всередині високовольтного відсіку КТП за допомогою ланки часової затримки

1-го порядку, що має наступну передаточну функцію

$$F(p) = \frac{1}{1 + pT_2}. \quad (2.61)$$

Застосувавши перетворення Лапласа, отримаємо

$$\Delta\varphi_{п.з} = \Delta\varphi \frac{a'}{p(p + a')}. \quad (2.62)$$

або

$$\Delta\varphi_{п.з} = a'b'\Delta\varphi \left[\frac{1}{p(a' + p)(b' + p)} \right], \quad (2.63)$$

де a', b' – коефіцієнти, відповідно: $a' = 1/T_1, b' = 1/T_2$.

Провівши зворотнє перетворення за допомогою формули Лапласа отримаємо

$$\Delta\varphi_{п.з} = \Delta\varphi \left[1 + \frac{1}{T_1 - T_2} \left(T_2 e^{\frac{\tau}{T_2}} - T_1 e^{\frac{\tau}{T_1}} \right) \right]. \quad (2.64)$$

Провівши перетворення аналогічні (2.53), отримаємо більш простий вираз для визначення відносної вологості повітря всередині високовольтного відсіку КТП

$$\varphi_{п.в} = \varphi_{п.з} + (\varphi_{п.в} - \varphi_{п.з})^{-B_{п}\tau}. \quad (2.65)$$

Отже, отримані залежності дають змогу провести моделювання теплових режимів роботи високовольтного відсіку КТП.

2.5 Моделювання теплових режимів роботи високовольтного відсіку КТП

Використовуючи отримані рівняння (2.44), (2.57) і (2.65) проведемо моделювання теплових режимів високовольтного відсіку КТП. У якості вихідних даних використаємо характерні криві $\varphi_{п.в} = f(\tau)$ і $t_{п.в} = f(\tau)$, що представлені, відповідно, на рис. 2.1 і рис. 2.2. Аналіз приведених кривих показує, що вони нелінійні з яскраво вираженими екстремумами, причому впродовж доби спостерігається один максимум і один мінімум. Значення відносної вологості повітря та температури знаходяться в певній «протифазі» – мінімальному значенню відносної вологості повітря відповідає максимальне значення його температури. Екстремуми цих параметрів не синхронізовані між собою точно в часі. Відносна вологість повітря має значні перепади впродовж доби – до 60%

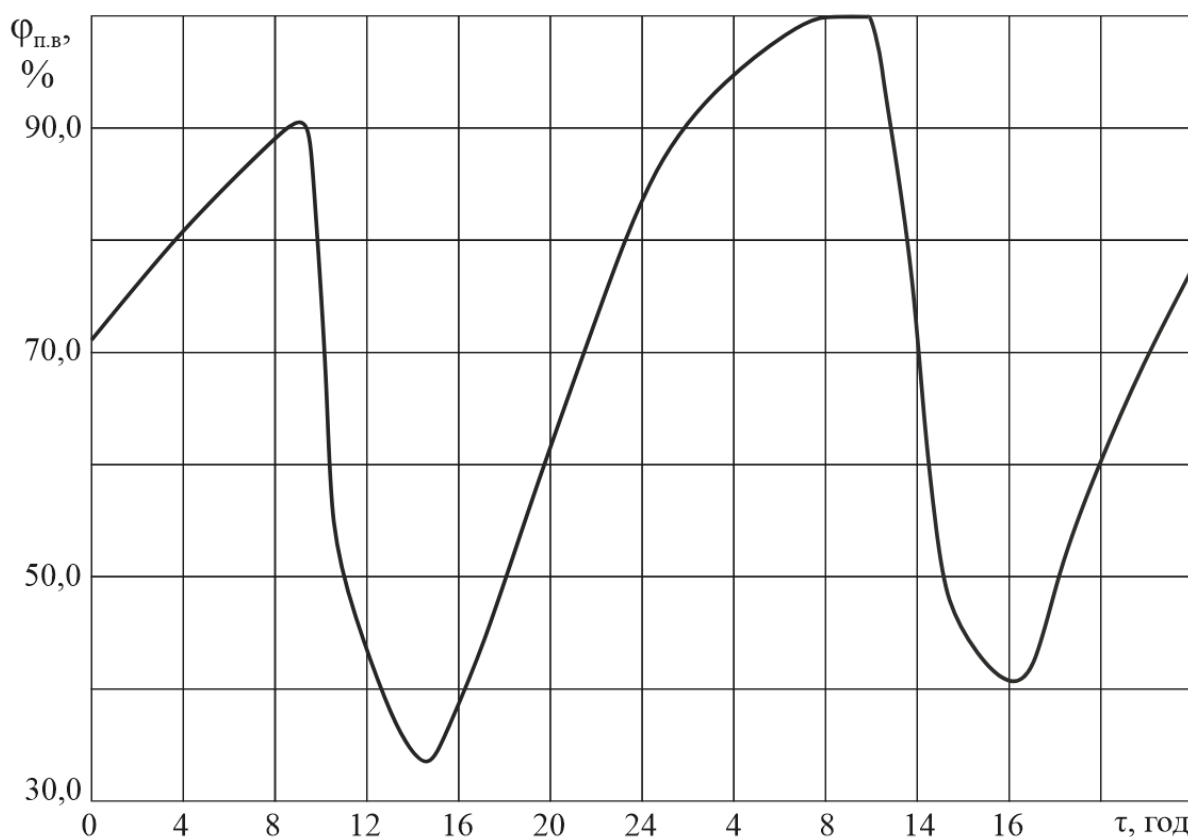


Рисунок 2.1 – Зміна відносної вологості у високовольтному відсіку впродовж двох діб

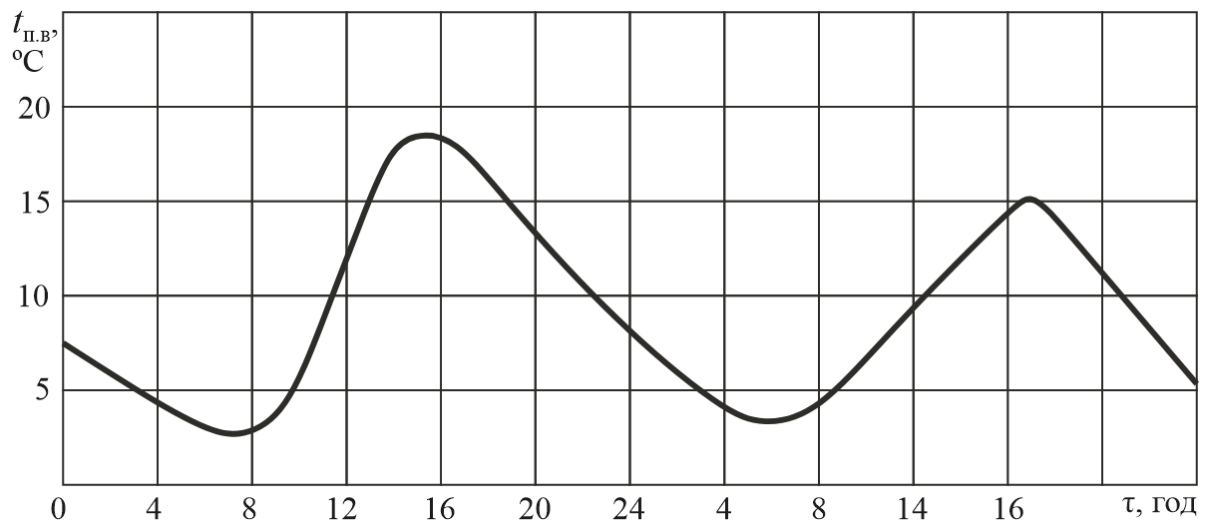


Рисунок 2.2 – Зміна температури повітря всередині високовольтного відсіку впродовж двох діб

На основі залежностей $\varphi_{п.в} = f(\tau)$ і $t_{п.в} = f(\tau)$ було виконано розрахунок температури точки роси за виразом [35]:

$$t_p = \frac{273,33 \lg\left(\frac{e}{6,1070}\right)}{7,665 - \lg\left(\frac{e}{6,1070}\right)}; \quad (2.66)$$

де e – парціальний тиск водяного пару

$$e = 6,1070 \cdot \frac{\varphi_{п.в}}{100} \cdot 10^{\frac{7,665 t_{п.в}}{243,33 + t_{п.в}}}. \quad (2.67)$$

Результати розрахунку температури точки роси всередині високовольтного відсіку представлено на рис 2.3. Температура точки роси впродовж доби коливається в широких межах від 3,6 °C до 17,2 °C і синхронно в часі змінюється з температурою повітря всередині високовольтного відсіку.

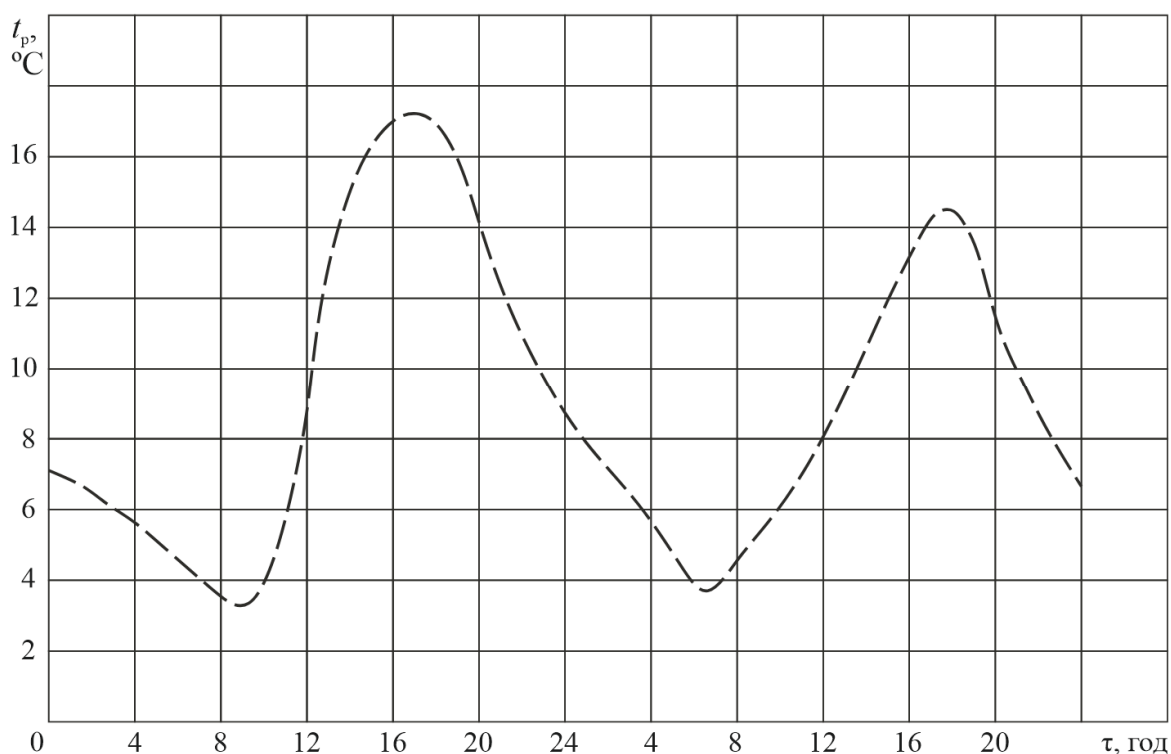


Рисунок 2.3 – Зміна температура точки роси всередині високовольтного відсіку впродовж двох діб

На рис. 2.4 наведено результати моделювання зміни відносної вологості та температури повітря та температури поверхні ізолятора у високовольтному відсіку, що були отримані за допомогою рівнянь, відповідно, (2.65), (2.57), (2.44). Моделювання проводилося для ранкових годин з 5:30 год до 9:30 год, коли випадення роси є найбільш імовірним. З 5-ї год. 30-ти хв температура повітря та поверхні ізолятора всередині відсіку почала підвищуватися, однак внаслідок теплової інерції поверхня ізолятора виявляється холоднішою. Максимальна різниця між їхніми температурами склала 2 °C. Відносна вологість повітря зростала до 6-ї год 50 хв, далі почала знижуватися внаслідок утворення роси на поверхні ізолятора. Модель показала, що розрахункові криві (рис. 2.4) мають нелінійний характер, однак за 1 год 30 хв до моменту росоутворення їх ділянки є фактично лінійними.

У цілому, отримані теоретичні залежності можуть бути покладені в основу роботи системи контролю мікроклімату у високовольтному відсіку КТП.

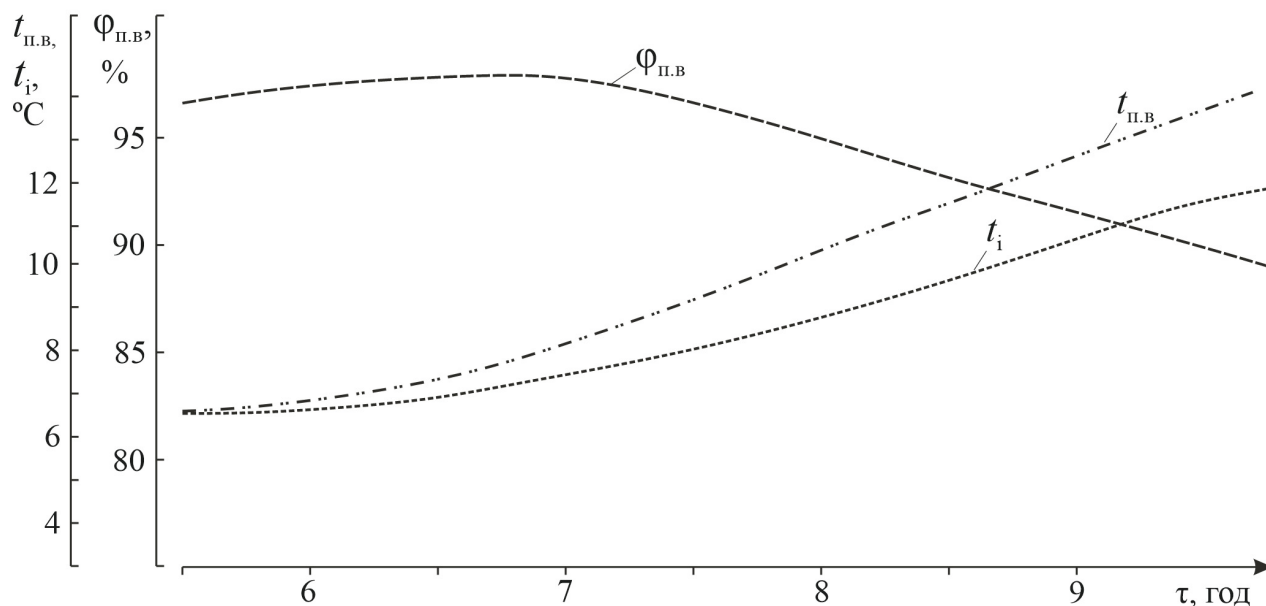


Рисунок 2.4 – Зміна відносної вологості та температури повітря, температури поверхні ізолятора у високовольтному відсіку

2.6 Висновки

1. Встановлено, що в рівнянні теплового балансу ізолятора високовольтного відсіку КТП основними видом теплообміну є конвективний і випромінювання.

2. Розроблено математичні моделі, що дозволяють встановити залежність відносної вологості та температури повітря, температури поверхні ізолятора у високовольтному відсіку, від часу та додаткового джерела тепла у високовольтному відсіку.

3. Встановлено, що приблизно за 1 год 30 хв до моменту росоутворення температура та відносна вологість повітря і температура поверхні ізолятора змінюються практично лінійно.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ВІДСІКУ КТП

Розроблені в попередньому розділі роботи математичні моделі дозволили вибрати параметри контролю мікроклімату у високовольтному відсіку КТП. Використовуючи їх необхідно обґрунтувати архітектуру системи, розробити її алгоритм роботи та структурну схему, вибрати первинні вимірювальні перетворювачі контрольованих параметрів середовища у відсіку та ізолятора.

3.1 Обґрунтування параметрів керування мікрокліматом

Для створення та підтримання оптимального тепловологісного режиму у високовольтному відсіку КТП для роботи високовольтної ізоляції необхідно визначити параметри керування мікрокліматом та умову початку конденсації вологи з повітря на ізоляторах.

Проведені дослідження у розділі 2 показали, що до параметрів які характеризують стан системи «пара – ізолятор» відносяться температура та вологість повітря всередині високовольтного відсіку та температура поверхні ізолятора.

Максимальна кількість вологи, яку повітря здатне утримувати в собі у формі газу залежить від його температури. Чим нижча температура повітря, тим меншу кількість водяних парів, воно здатне утримувати в собі. Тоді при зниженні його температури або його контакті з охолодженими предметами може виникнути момент, коли його температура знижується до температури точки роси, при якій відбувається випадіння конденсату. Тобто, настає момент насичення повітря (відносно води) водяними парами і «зайва» пара переходить із газоподібного стану в рідку фазу у вигляді конденсату. Таким чином, визначивши температуру точки роси (2.66), можливо взнати температуру до якої

необхідно охолодитися ізоляторам, щоб на них почалась конденсація водяної пари:

$$t_{п.і} = t_p. \quad (3.2)$$

Для оцінки динаміки системи «пара – ізолятор» доцільно скористатися аналогією до дефіциту точки роси – різниці температури повітря і точки роси. Іншими словами, розглядати різницю температур ізолятора та точки роси

$$\Delta t = t_{п.і} - t_p. \quad (3.2)$$

З урахуванням того, що роса на ізоляторі випаде при виконанні умови (3.1) з рівняння (3.2) отримаємо умови конденсації вологи з повітря на ізоляторі

$$\Delta t = t_{п.і} - t_p \leq 0. \quad (3.3)$$

Побудувавши криву зміни різниці цих температур у часі (рис. 3.1) можливо оцінити швидкість їх зміни v за проміжок часу Δt між двома виміряними чи розрахованими значеннями: Δt_i і Δt_{i+1} , де i – порядковий номер.

Аналіз залежностей різниці температури (рис. 3.1) показує, ділянки кривих, які передують росоутворенню фактично є прямими, тому їх можливо описати лінійним рівнянням [22]:

$$\Delta \hat{t} = \Delta t_i + v_i \cdot \tau_p. \quad (3.4)$$

де $\Delta \hat{t}_п$ – прогнозована різниця температур поверхні ізолятора та точки роси;

Δt_i – різниця температур у i -й точці вимірювання;

v_i – швидкість зміни різниці температур за інтервал вимірювання Δt ;

τ_p – час між останнім вимірюванням Δt_i і початком утворення роси.

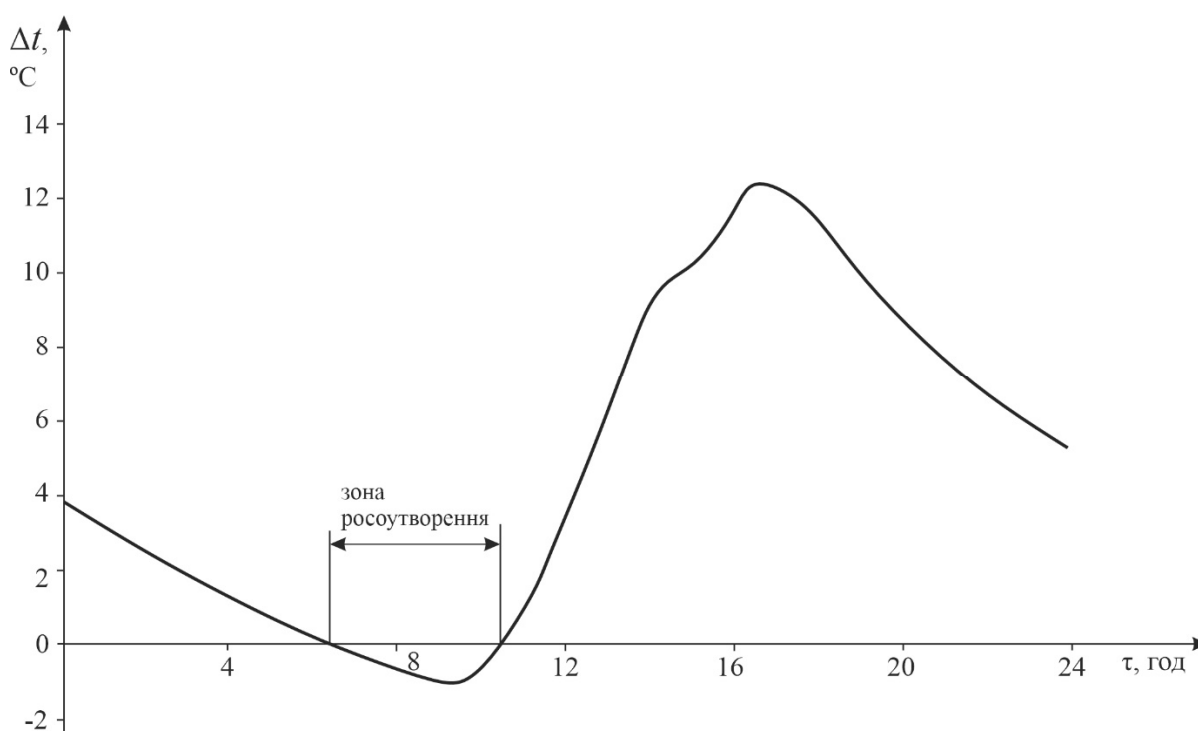


Рисунок 3.1 – Зміна різниці температур точки роси та поверхні ізолятора впродовж доби

3.2 Алгоритм роботи системи

На основі висунутих вимог до системи контролю мікроклімату у високовольтному відсіку КТП і розробленої структурної схеми був розроблений алгоритм роботи, блок-схема якого представлена на рис. 3.2.

Після ініціалізації системи проводиться присвоєння значення «1» зміним i та j (блок 2). Далі, через інтервал часу Δt проводиться опитування вимірювальних перетворювачів температури повітря та відносної вологості повітря, а також та первинного вимірювального перетворювача температури поверхні ізолятора (блок 3). Якщо виявиться, що температура поверхні ізолятора $t_{п.і}$ нижча за температуру повітря всередині високовольтного відсіку $t_{п.в}$ (блок 4), то проводиться розрахунок температури точки роси за виразами (2.66) і (2.67) (блок 5). Потім визначається різниця між температурою поверхні ізолятора та точки роси Δt_i (блок 6). Якщо виявиться, що через проміжок часу Δt виміряна

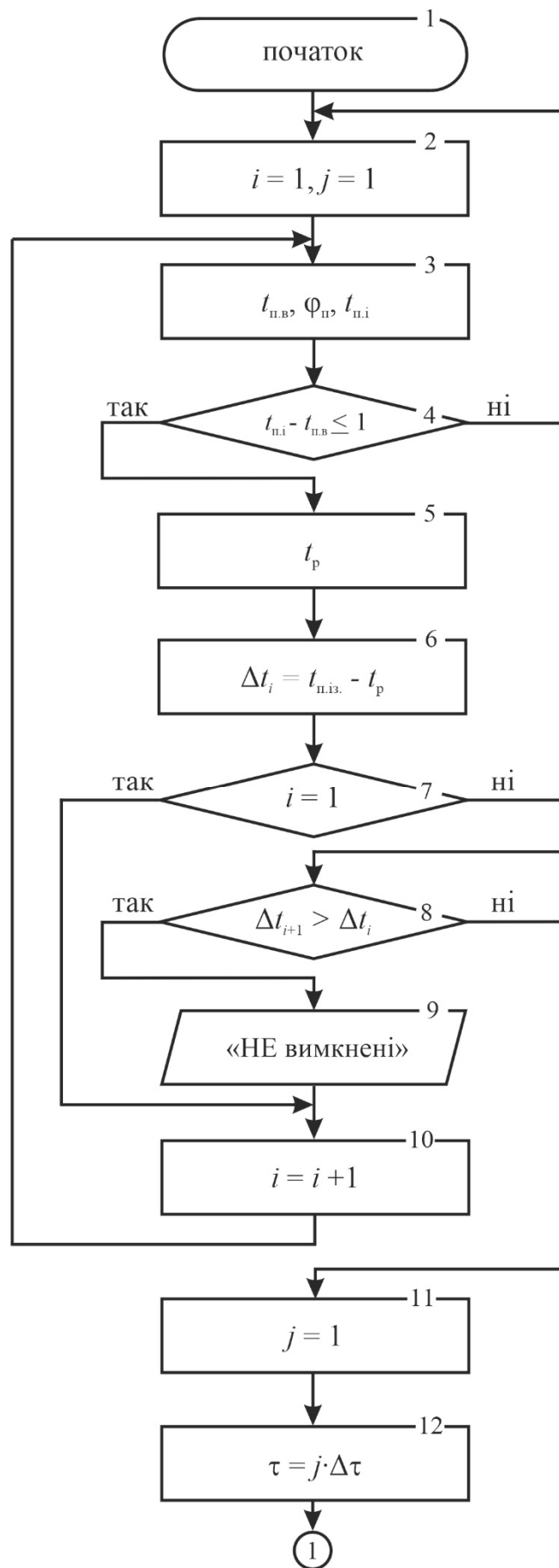


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму роботи системи (початок)

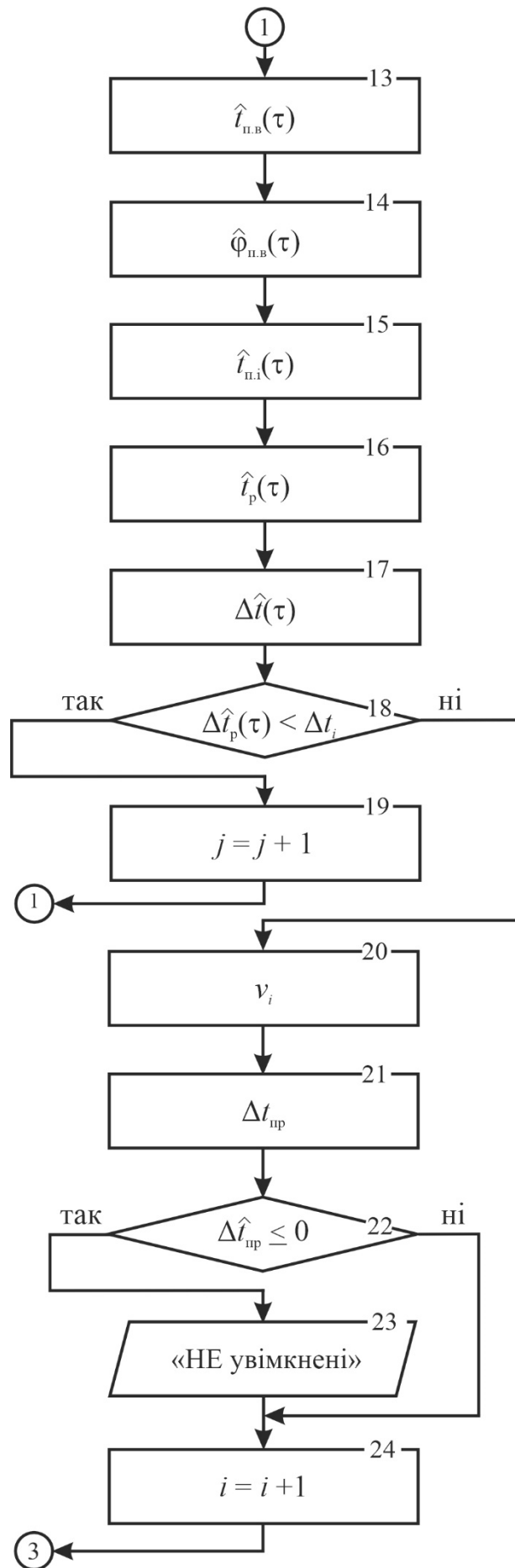


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму роботи системи (закінчення)

наступна різниця температур Δt_{i+1} менша за попередню Δt_i (блок 8), то виконується розрахунок часу роботи нагрівальних елементів $\tau_{\text{не}}$ необхідний для запобігання утворенню роси на ізоляторах високовольтного відсіку (блоки 12-20). Якщо ж умова блоку 8 не виконується, то до протоколу заноситься повідомлення про те, що нагрівальні елементи вимкнені «НЕ вимкнені» (блок 9). Далі лічильник i збільшується на «1» та здійснюється перехід на початок алгоритму (блок 2).

Для визначення часу роботи нагрівальних елементів $\tau_{\text{не}}$ проводиться прогнозування значень температури повітря $\hat{t}_{\text{п.в}}(\tau)$ і відносної вологості повітря $\hat{\phi}(\tau)$ всередині високовольтного відсіку, температури поверхні ізолятора $\hat{t}_{\text{п.і}}(\tau)$ за формулами, відповідно (2.57), (2.65) і (2.44) (блоки 13-15) з часом упередження τ (блок 12) для кожного інтервалу моменту часу $\Delta\tau$. На основі отриманих прогнозних значень розраховується температура точки роси $\hat{t}_p(\tau)$ та прогнозна різниця температур $\Delta\hat{t}(\tau)$ (блок 17). Прогнозування проводиться в циклі j разів, поки прогнозована різниця температур $\Delta\hat{t}(\tau)$ у момент прогнозного вмикання нагрівальних елементів не стане меншою за прогнозоване значення $\Delta\hat{t}$ (блок 18). Час τ , при значенні якого виконається умова блоку 18 і буде шуканим часом роботи нагрівальних елементів $\tau_{\text{не}}$.

Далі згідно алгоритму, визначається швидкість зміни різниці температур v_i (блок 20). Прогнозована різниця температур визначається за виразом (блок 21):

$$\Delta\hat{t}_{\text{пр}} = \Delta t_i + v_i \cdot \tau_p. \quad (3.5)$$

Нагрівальні елементи вмикаються коли прогнозована різниця температур $\Delta\hat{t}_{\text{п}}$ стане менше 0 (блок 22), оскільки це є умовою початку конденсації вологи з повітря на ізоляторі (3.3). Після вмикання нагрівальних елементів до протоколу заноситься повідомлення «НЕ увімкнені» (блок 23). Долі лічильник по i збільшуються на 1 (блок 24) і програма переходить до нового циклу опитування вимірювальних перетворювачів (блок 3).

Відключення нагрівальних елементів відбудеться якщо різниця температури поверхні ізолятора та точки роси почне зростати (блоки 8, 9).

З метою перевірки працездатності запропонованого алгоритму системи контролю мікроклімату виконаємо розрахунок параметрів мікроклімату високовольтного відсіку з урахування роботи нагрівальних елементів. В якості вихідних даних використаємо рис. 2.1, рис. 2.2 та рис. 3.3. Потужність нагрівального елемента приймаємо 1 кВт.

На рис. 3.4 наведені результати розрахунку зміни відносної вологості повітря у високовольтному відсіку. Суцільна крива характеризує природну зміну відносної вологості, а пунктирна з урахуванням роботи нагрівальних елементів. Згідно рис 3.4 і рис. 3.5 випадіння роси могло б початися приблизно о 5 год 25 хв, однак увімкнення нагрівального елемента призвело до підвищення температури повітря у високовольтному відсіку (рис. 3.5) та зниження відносної вологості в ньому. Відповідно до алгоритму (рис. 3.2) нагрівальний елемент був увімкнений за 14 хв 45 с до початку випадіння роси на ізоляторі. Аналогічним чином нагрівальні елементи включалися ще три рази та запобігали утворенню конденсату з повітря.

Отже, проведені розрахунки на підтвердили працездатність розробленого алгоритму роботи системи контролю мікроклімату у високовольтному відсіку КТП.

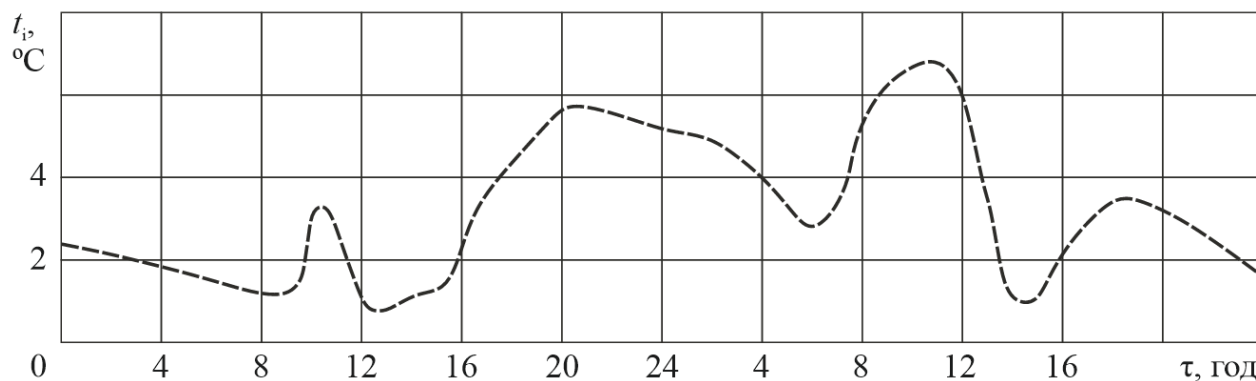


Рисунок 3.3 – Зміна температури поверхні ізолятора за дві доби

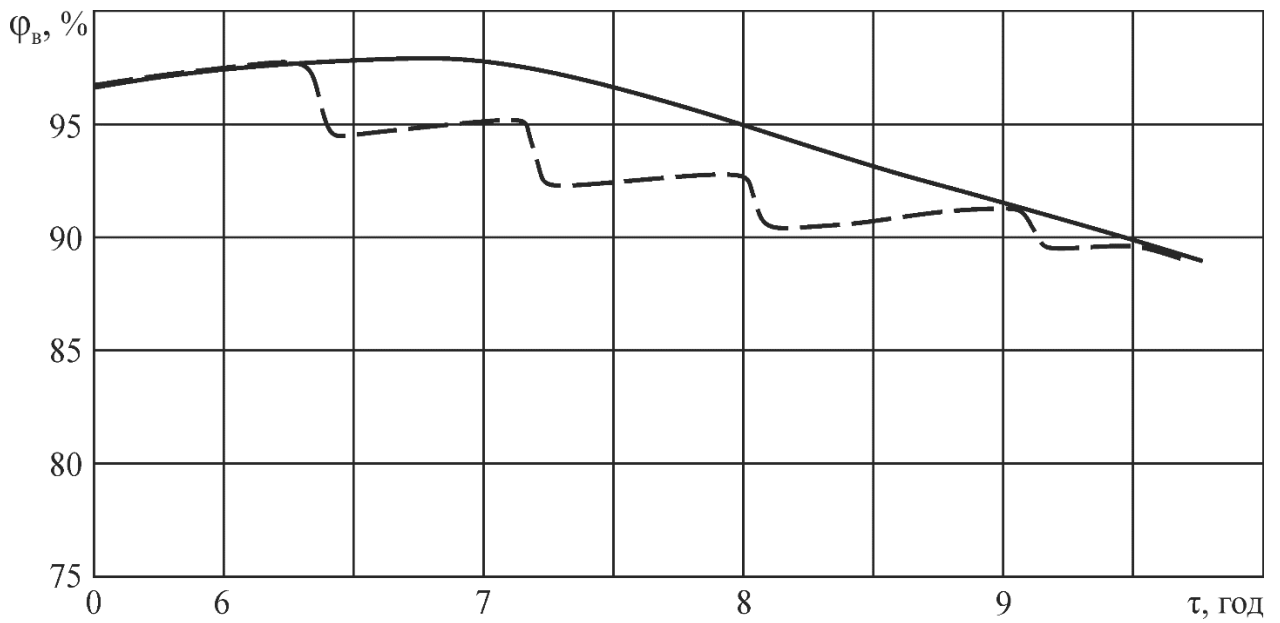


Рисунок 3.4 – Зміна відносної вологості повітря у відсіку:

1 – без обігріву;

2 – з обігрівом

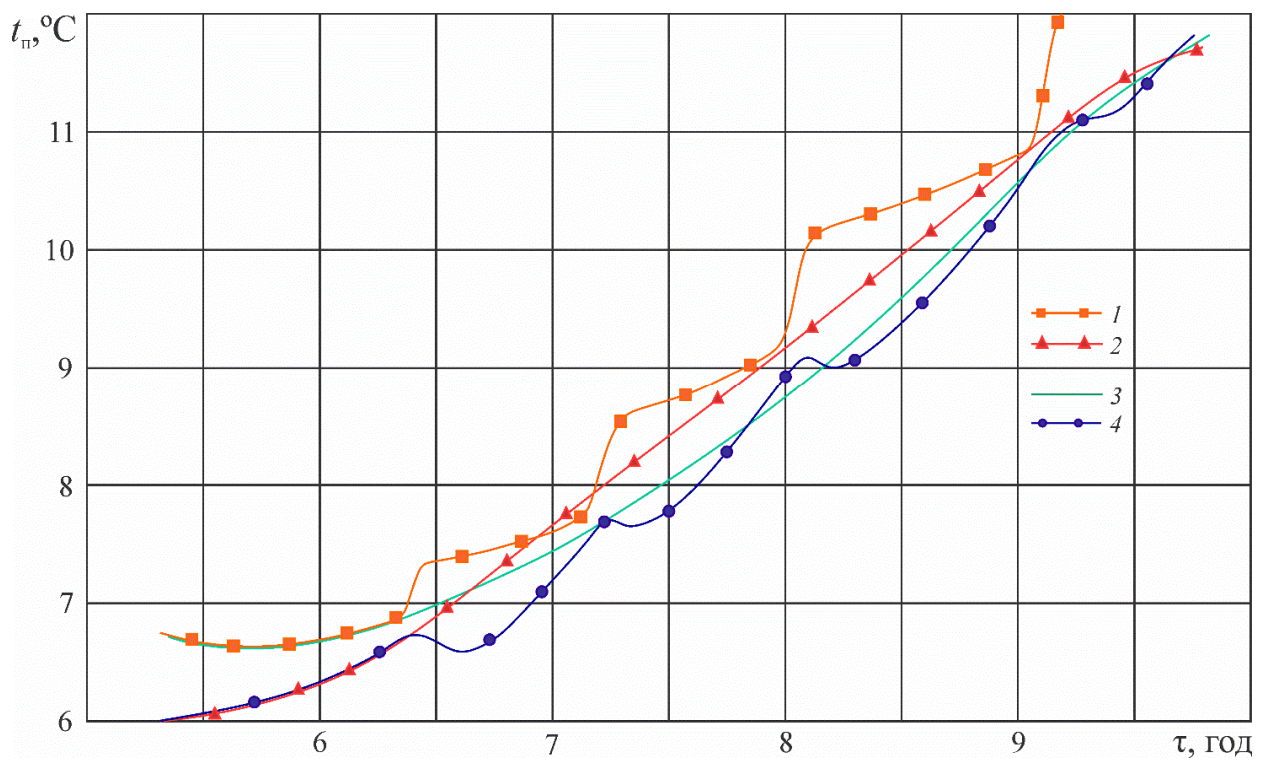


Рисунок 3.5 – Розраховані криві зміни температур:

1 – поверхні ізолятора при роботі обігріву відсіку;

2 – точки роси без обігріву відсіку;

3 – поверхні ізолятора без обігріву відсіку;

4 – точки роси при використанні обігріву відсіку.

3.3 Обґрунтування архітектури системи

Виходячи зі специфіки роботи високовольтних відсіків КТП, переліку параметрів які необхідно контролювати для підтримання мікроклімату у відсіку, система повинна задовольняти такі вимоги:

- забезпечувати вимірювання температури повітря і поверхні ізолятора у діапазоні – 5 - 30 °С з абсолютною похибкою не більше $\pm 0,1$ °С;
- забезпечувати вимірювання відносної вологості повітря у діапазоні 50 - 100% з відносною похибкою до $\pm 3,5\%$;
- мікроконтролер системи повинен працювати в діапазоні температур –30 - 125 °С;
- АЦП мікроконтролера повинен виконувати 10 біт перетворення інформації з вимірювальних перетворювачів у цифрову;
- мікроконтролер системи повинен виконувати необхідні обчислення у відповідності з запропонованим алгоритмом, в т.ч. визначити час роботи нагрівальних елементів, достатній для запобігання конденсації вологи на ізоляторах;
- система має виконувати всі необхідні комутації в колах керування нагрівальними елементами.
- система повинна мати радіоканал зв'язку для передачі телеметричної інформації.

Структурна схема системи керування мікрокліматом представлена на рис. 3.6. Її основою є мікроконтролерний блок (МКБ), до якого підключаються наступні вимірювальні перетворювачі: температури повітря (ВПТП), відносної вологості повітря (ВПВП) та первинний вимірювальний перетворювач температури поверхні ізолятора (ПВПТІ). Вимірювання температури поверхні ізолятора здійснюється спеціальному ізоляторі, що встановлюється додатково і не знаходиться під високою напругою. Тому додаткові заходи з гальванічного розв'язування ПВПТІ проводити не потрібно. До МКБ підключено годинник реального часу (RTC) для обліку хронометричних даних (поточний час, дата, день тижня і т.п.) на основі яких здійснюється протоколювання вимірювань та

розрахованих параметрів, облік роботи нагрівальних елементів (НЕ). Для протоколи телеметричної інформації зберігаються у модулі flash-пам'яті (flash).

Дистанційний контроль системи керування мікрокліматом можливо проводити за допомогою передбачено 4G/3G модема. Проведення безпосередньої конфігурації системи, оновлення її програмного забезпечення за допомогою персонального комп'ютера також може здійснюватися через інтерфейс RS-485. Керуванням роботою НЕ здійснює твердотільне реле (ТР). Живлення системи контролю мікроклімату здійснюється від блоку живлення (БЖ), що підключений до мережі 220 В КТП.

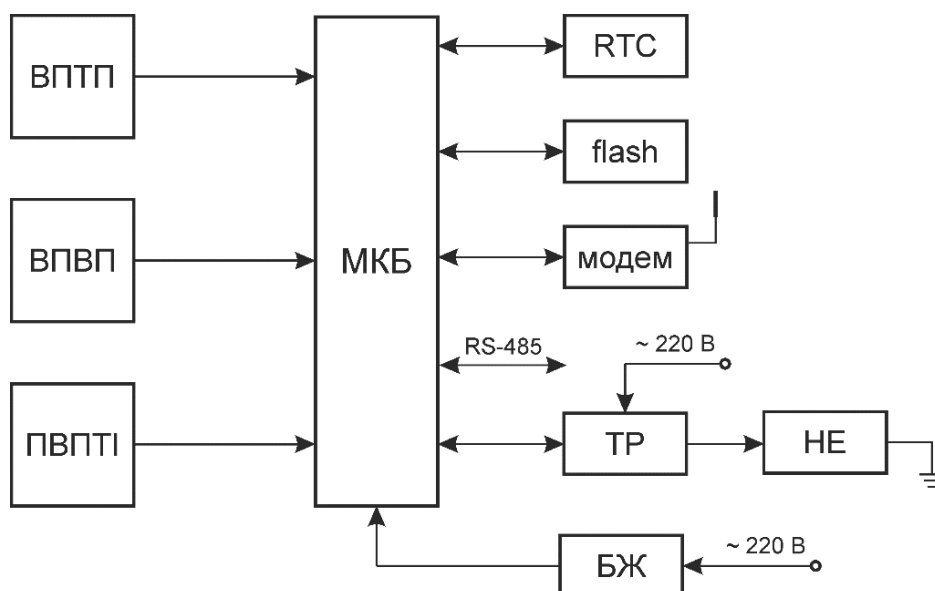


Рисунок 3.6 – Структурна схема системи керування мікрокліматом у високовольтному відсіку КТП

3.4 Технічні рекомендації щодо підвищення надійності функціонування високовольтних відсіків КТП за рахунок впровадження системи контролю мікроклімату

За результатами проведених досліджень розроблено ряд рекомендацій щодо практичного використання запропонованої інформаційної системи контролю мікроклімату у високовольтних відсіках КТП:

1. Перед установкою системи необхідно перевірити працездатність всі вимірювальних перетворювачів та системи в цілому.

2. Максимальний економічний ефект досягається при установці системи керування мікрокліматом на КТП де відповідно до статистичних даних порушення в роботі високовольтної ізоляції спостерігаються з максимальною частотою.

3. Для вимірювання температури поверхні ізолятора необхідно встановити додатковий ізолятор аналогічний до тих, що встановлені у високовольтному відсіку КТП на максимально допустимій до них відстані за умовами техніки безпеки.

4. Монтажний корпус з керування мікрокліматом слід розміщувати низьковольтному відсіку КТП з урахуванням зручності його обслуговування (оновлення програмного забезпечення, проведення регламентних перевірок, можливої заміни і т.п.).

5. З метою енергозаощадження та подовження терміну експлуатації робота системи доцільна лише в росо-небезпечні періоди року.

6. Технічний огляд вимірювальних перетворювачів на предмет забруднення повинен проводитись одночасно з регламентними роботами на контрольованій КТП, але не рідше одного разу на рік.

7. З метою надійного збереження телеметричної інформації, рекомендовано не рідше одного разу зчитувати архівні дані блоку flas-пам'яті.

8. Монтажний корпус з системою моніторингу клімату не потребує спеціалізованого додаткового обігріву.

9. Для ефективного використання системи контролю клімату необхідно передбачити навчання та підвищення кваліфікації оперативного й електротехнічного персоналу, який обслуговує дану систему.

10. З метою подальшого удосконалення системи контролю клімату та системи організаційних заходів доцільно фіксувати технологічні порушення в роботі ізоляції у високовольтному відсіку з урахуванням тривалості випадіння роси.

3.5 Висновки

1. Встановлено, що для керування мікрокліматом у високовольтному відсіку необхідно контролювати температуру та відносну вологість повітря всередині відсіку, температуру поверхні ізолятора, а за критерій початку утворення роси слід прийняти різницю температури точки роси та поверхні ізолятора.

2. Доведено, що розроблений алгоритм роботи системи керування мікрокліматом високовольтному відсіку КТП є працездатним і запобігає утворенню роси на ізоляторі.

3. Розроблено структурну схему системи керування мікрокліматом у високовольтному відсіку КТП, що дозволить виконати на її основі технічну реалізацію системи.

4. Розроблено пропозиції та рекомендації стосовно виробничого використання системи керування мікрокліматом у високовольтному відсіку КТП, які дозволять підвищити ефективність її використання.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках напругою вище 1000 В

Безпека експлуатації електроустановок у нормальному режимі роботи досягається використанням наступних технічних засобів і заходів:

- захисного заземлення
- занулення;
- захисного відключення;
- блокувань безпеки;
- електричного розділення мереж різних класів напруги;
- ізоляцією струмопровідних частин;
- використання низької напруги;
- недоступністю струмовідних частин;
- вирівнюванням потенціалів;
- компенсація ємнісних струмів замикання на землю.

В електроустановках з напругою до 1000 В, що мають ізольовану нейтраль, застосовують захисне заземлення разом із контролем ізоляції або захисне відключення.

Для мереж з напругою до 1000 В, які зв'язані з мережею напругою понад 1000 В через трансформатор, застосовується захист від високої напруги за допомогою пробивного запобіжника, який може бути встановлений в кожній фазі на стороні НН силового трансформатора для уникнення появи високої напруги при пошкодженні ізоляції між обмотками.

У електроустановках з напругою до 1000 В із заземленою нейтраллю використовується занулення або захисне відключення. У таких установках заборонено заземлювати корпуси електрообладнання, якщо вони не обладнані власним заземленням.

Захисне заземлення призначене для усунення ризику ураження людини електрострумом при контакті з неструмопровідними частинами, які знаходяться під напругою. Це досягається шляхом зниження напруги дотику та кроку до безпечних значень за рахунок використання ефективного заземлювача, тобто такого має малий опір. Захисне заземлення застосовується у мережах змінного та постійного струму з ізольованою нейтраллю джерела напруги або силового трансформатора. Електроустановки змінного струму напругою до 42 В не потребують захисного заземлення.

Періодична перевірка стану заземлення включає огляд видимої частини, перевірку ланцюга між заземлювачем і елементами обладнання, що заземляються, вимірювання опору заземлюючого пристрою, а також вибіркове розкопування ґрунту для огляду його горизонтального та вертикального електродів, що знаходяться в землі.

Занулення передбачає глухе заземлення нейтралі трифазного трансформатора, одного виводу однофазного трансформатора, наявність нульового дроту (проводу) та його повторне заземлення. Метою заземлення нейтралі джерела струму є зниження напруги на корпусах обладнання та на нульовому дроті (проводі), який з'єднаний з цими корпусами, до безпечного рівня для робітників при замиканні фазного провідника на землю.

Нульовий захисний провідник призначений для підвищення струму короткого замикання з метою надійного спрацювання апаратів захисту. Збільшення значення струму КЗ у струмопровідному контурі «фаза – нуль» здійснюються шляхом зменшення опору нульового провідника в порівнянні з тим, якщо струм проходив би лише через землю.

Повторне заземлення нульового провідника призначене для зниження напруги на струмопровідних частинах корпусів обладнання при ушкодженні його ізоляції при замиканні фазного провідника на корпус, як у випадку роботи нульового дроту (проводу) в нормальному режимі, так і при його обриві.

Занулення в електроустановках до 1000 В виконується у 4-провідних мережах з глухозаземленою нейтраллю трифазного трансформатора або трифазного електрогенератора.

Захисне відключення використовується як основний або додатковий метод захисту у тому випадку, якщо неможливо забезпечити електробезпеку за допомогою захисного заземлення або занулення, або застосування цих методів викликає труднощі. За відсутності можливості використання захисного заземлення, занулення або захисного відключення допускається проведення обслуговування електроустановки з ізольованих майданчиків.

Призначення блокувань безпеки – запобігання доступу до неізольованих струмопровідних частин електроустановок без попереднього зняття напруги, уникнення помилкових дій електротехнічного та виробничого персоналу при їх експлуатації, убезпечення від порушень стандартів електробезпеки.

Блокування безпеки застосовуються в електроустановках режим роботи яких потребує регулярного доступу електротехнічного персоналу до огорожених струмопровідних частин, у дистанційних комутаційних апаратах помилки в оперативних переключеннях яких можуть призвести до аварії і нещасних випадків.

Блокувальні пристрої бувають трьох типів: механічні, електричні та електромагнітні.

Електричне розділення мереж (гальванічна розв'язка) здійснюється за допомогою спеціального роздільного трансформатора, що відокремлює мережу з ізольованою або глухозаземленою нейтраллю від частини мережі, яка живить електроприймач (рис. 4.1). При цьому між живлячою мережею і мережею споживача електроенергії зв'язок відбувається через магнітне поле. Роздільний трансформатор – це спеціальний трансформатор, що має коефіцієнт трансформації рівний 1, напругу обмоток до 380 В включно та підвищену надійність конструкції та ізоляції. Від такого трансформатора дозволяється живити один приймач зі струмом, що не перевищує 15 А.

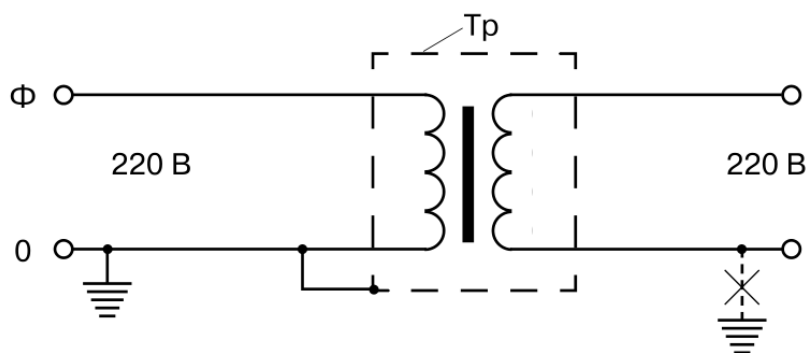


Рисунок 4.1 – Схема підключення роздільного трансформатора

Розділення розгалуженої мережі на окремі, електрично непов'язані один з одним ділянки, за допомогою роздільних трансформаторів сприяє підвищенню її опору ізоляції та зменшенню ємності, що в свою чергу призводить до підвищення загального рівня безпеки.

Впровадження захисного розділення електричних мереж може мати місце як в межах електричних систем, так і на рівні окремих підприємств.

Ізоляція струмопровідних частин відіграє ключову роль в забезпеченні нормального функціонування електроустановок: зменшує ризик ураження електричним струмом, ймовірність виникнення КЗ на землю та корпус електроустановок.

Застосовують наступні типи ізоляції:

- робочу, що забезпечує нормальну роботу електрообладнання та захист від ураження електрострумом;
- додаткову, що служить для захисту в разі пошкодження робочої ізоляції;
- подвійну, що включає обидві попередні ізоляції;
- підсилену, що покращує рівень захисту, аналогічний подвійній ізоляції.

Стан ізоляції характеризується електричною міцністю, електричним опором і діелектричними втратами. З метою підтримання працездатності електроустановок і безпечної експлуатації регулярно проводиться контроль стану їх ізоляції. У випадку напруги понад 1000 В перевіряються всі параметри ізоляції, а при напрузі до 1000 В – лише електричний опір і електрична міцність.

Низька напруга використовується живлення ручного інструменту, стаціонарного та портативного освітлення в будь-яких приміщеннях та за їх межами. До низьких напруг відносяться напруги 42 В і нижче змінного струму з частотою 50 Гц між фазами та відносно землі. Відповідно до нормативних документів виділяють два діапазони низьких напруг: 12 В і 42 В.

Напруга до 42 В змінного струму використовується для живлення світильників місцевого стаціонарного освітлення, якщо вони встановлені на висоті до 2,5 метрів у приміщеннях з підвищеною небезпекою та особливо небезпечних слід застосовувати також низьку напругу.

Напругу до 12 В змінного струму необхідно використовувати для живлення переносних світильників в умовах високого ризику електротравм, таких як металеві, бетонні, залізобетонні ємкості, кабельні та ін. енергетичні підземні комунікації, вентиляційні камери і т.д. Живлення таких світильників здійснювати від стаціонарних електромереж напругою 12 В. Штепсельні вилки та розетки від яких здійснюється живлення світильників з номінальною напругою 12 В повинні конструктивно відрізняти від розеток з вищими класами напруги, щоб унеможливити помилкове підключення до них цих світильників.

Електрична схема підключення знижуючого трансформатора приведена на рис. 4.2

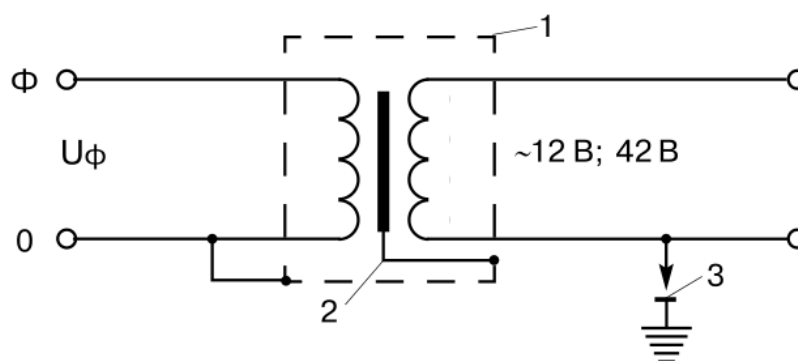


Рисунок 4.2 – Схема підключення знижуючого трансформатора
1 – корпус трансформатора; 2 – заземлювальний екран;
3 – пробивний запобіжник

Забезпечення недоступності до струмопровідних частин є важливим завданням. Статистика щодо електротравматизму демонструє, що більшість уражень електричним струмом (до 56%) пов'язані з дотиком людей до струмопровідних частин електроустановок [35]. Заходи для забезпечення недоступності до струмопровідних частин включають в себе використання захисних огорожень, закритих комутаційних апаратів (таких як пакетні вимикачі, комплектні пускові пристрої та ін.), розташування неізолюваних струмовідводів на недосяжних висотах для ненавмисного доторкання звичайним інструментом, використання різноманітних пристосувань і обмеження доступу сторонніх осіб до приміщень РУ, РП і т. д.

Вирівнювання потенціалів корпусів електрообладнання і пов'язаних з ним електропровідних технологічних і будівельних конструкцій здійснюється за допомогою пристрою контурного заземлення. Електроди якого розташовані навколо будівлі чи споруди, яка вже має заземлене чи занулене обладнання. У середині цього заземлюючого пристрою під підлогою приміщення чи майданчика, закладаються горизонтальні повздовжні та поперечні електроди, які з'єднуються між собою та з вертикальними електродами контуру за допомогою електродугового зварювання (рис. 4.3).

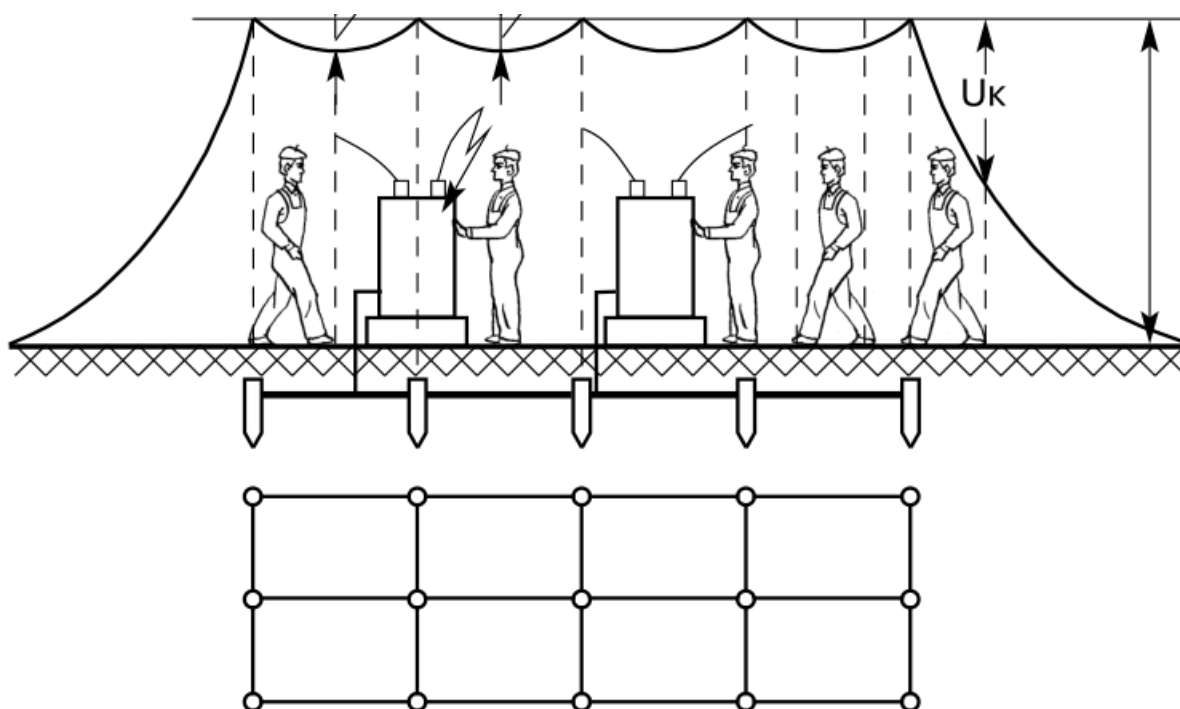


Рисунок 4.3 – Виконання контурного заземлюючого пристрою [35]

Вирівнювання потенціалів електропровідних корпусів конструкцій та виробничого обладнання здійснюється шляхом приєднання їх до мережі занулення чи заземлення. Вирівнювання потенціалів використовується як додатковий технічний захист у випадку наявності занулення або заземлення в приміщеннях з підвищеною небезпекою або особливо небезпечних.

Компенсацію ємнісної складової струму КЗ на землю здійснюють компенсаційними котушками (дугогасними реакторами), що вмикаються між нейтраллю живлячого трансформатора та землею (див. рис. 4.2).

Струм, що виникає при однофазному КЗ на землю, подібно до струму, який протікає через тіло людини під час однофазного контакту зі струмопровідними елементами, має активну та ємнісну складові. Наприклад, ємність кожного проводу ПЛ 6 - 35 кВ становить приблизно 5 - 6 мФ/км, а ємнісний струм на 1 кВ лінійної напруги та на 1 км мережі, що виконана на залізних опорах складає 3,0 - 3,7 мА. У розгалужених мережах ємнісна складова струму, що проходить через тіло людини, може значно переважати активну та бути визначальною при ураженні електричним струмом. Крім того, значні ємності мереж напругою вище 1000 В призводять до перенапруги в ізоляції, що може призвести до її електричного пробоя.

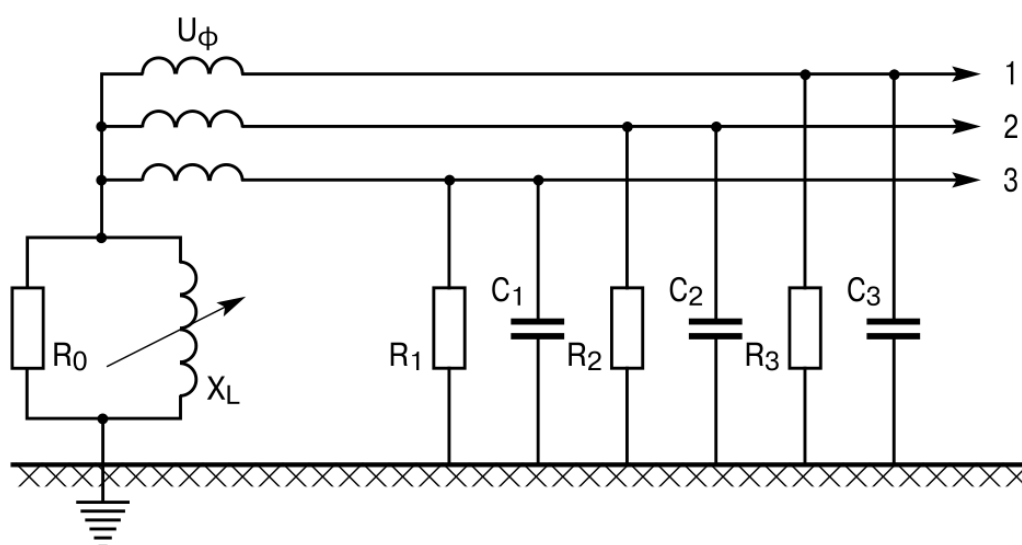


Рисунок 4.4 – Схема мережі з дугогасним реактором

4.2 Розрахунок заземлюючого пристрою КТП

Заземлюючий пристрій розташований по периметру КТП, виконується у вигляді квадрата зі стороною 5,6 м (рис. 4.5). У якості вертикальних електродів приймаємо сталі стержні діаметром 25 мм і довжиною 2,8 м. Горизонтальні електроди виготовляються зі сталевих шини 50х5 мм. Для закладання горизонтальних електродів по периметру КТП викопується траншея глибиною 0,5 м, на поверхні якої знаходяться кінці вертикальних електродів. Природного заземлювача поряд з КТП немає. КТП розташовується на двошаровому ґрунті. Перший шар ґрунту – садова земля, має товщину 0,6 м, другий – глина.

Оскільки, заземлюючий пристрій використовується як для напруги 10 кВ так і для 0,4 кВ, тому згідно [1] його опір з не повинен бути більшим ніж 4 Ом. Це значення і приймаємо за розрахунковий опір заземлюючого пристрою КТП: $R_3 = 4,0$ Ом.

Попередньо, намічаємо розташування вертикальних електродів по контуру з відстанню між ними електродами 2 м.

Розрахункові питомі опори ґрунту [36]:

- для вертикальних електродів

$$\rho_{p.v} = k_{з.в} \cdot \rho_{п.1} = 1,3 \cdot 100 = 130 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

- горизонтальних електродів

$$\rho_{p.г} = k_{з.г} \cdot \rho_{п.2} = 2,0 \cdot 50 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

де $\rho_{п.1}$ – питомий опір 1-го шару ґрунту, Ом·м;

$\rho_{п.2}$ – питомий опір 2-го шару ґрунту, Ом·м;

$k_{з.в}$, $k_{з.г}$ – коефіцієнти запасу для ґрунту в якому розташовуються, відповідно, вертикальні та горизонтальні електроди.

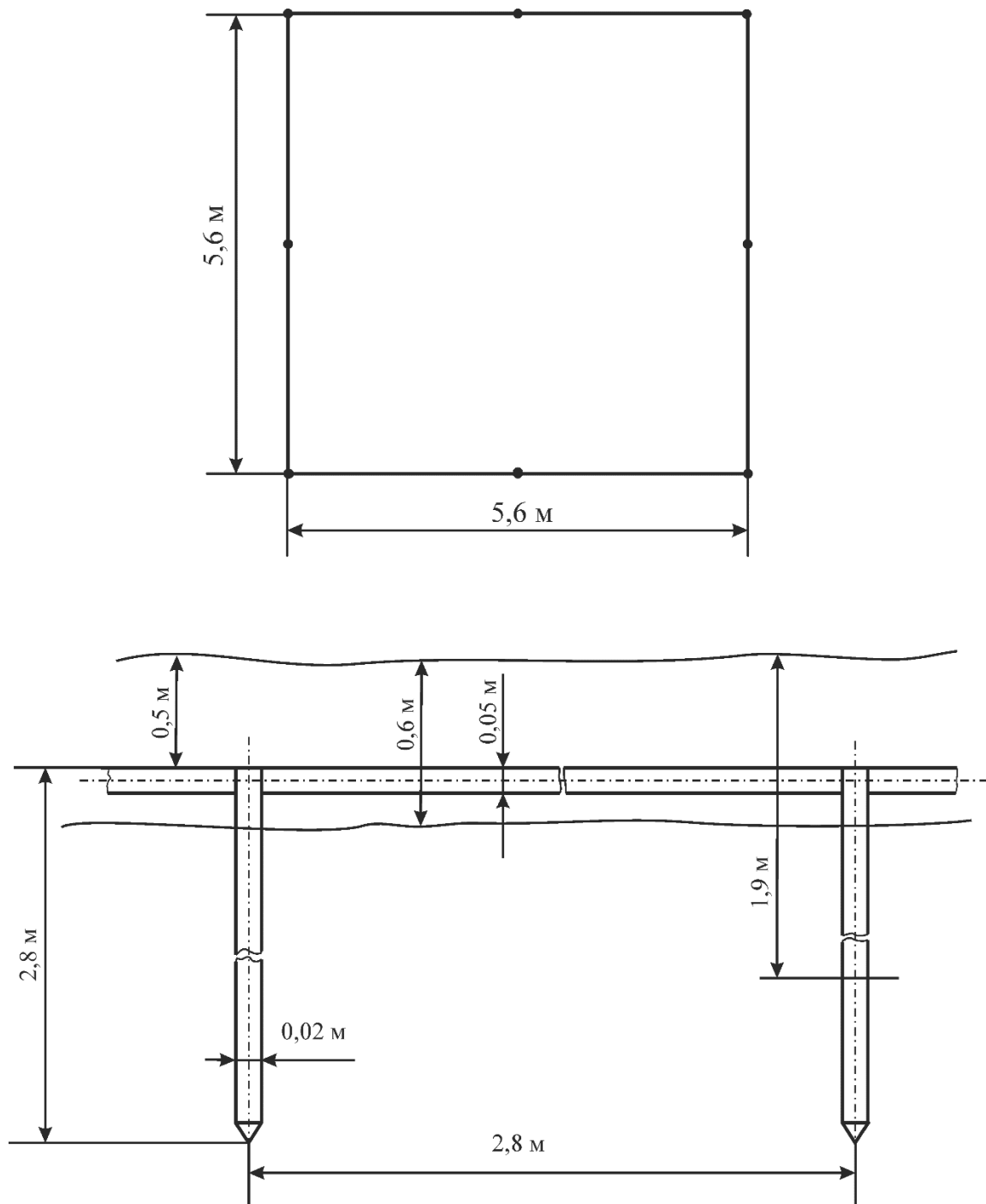


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема заземлювального пристрою

Еквівалентний питомий опір обох шарів ґрунту для вертикального стрижневого електрода складе

$$\rho_{p.e} = \frac{l_b}{\frac{\Delta l_1}{\rho_{p.г}} + \frac{\Delta l_2}{\rho_{p.в}}} = \frac{2,8}{\frac{0,1}{30} + \frac{2,7}{100}} = 92,3 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

де l_B – довжина вертикального електроду, м;

Δl_1 – довжина частини вертикального електроду, що знаходиться у верхньому шарі ґрунту

$$\Delta l_1 = h_1 - t_r = 0,6 - 0,5 = 0,1 \text{ м},$$

Δl_2 – довжина частини вертикального електроду, що знаходиться у нижньому шарі ґрунту

$$\Delta l_2 = l_B - \Delta l_1 = 2,8 - 0,1 = 2,7 \text{ м}.$$

Опір розтіканню одинарного вертикального електроду, верхній кінець якого розташований нижче рівня землі

$$\begin{aligned} R_{B.O} &= \frac{\rho_{p.e}}{2\pi \cdot l_B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot l_B}{d} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4 \cdot t_B + l_B}{4 \cdot t_B - l_B} \right) \right) = \\ &= \frac{92,31}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,8} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 2,8}{25 \cdot 10^{-3}} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4 \cdot 1,9 + 2,8}{4 \cdot 1,9 - 2,8} \right) = 30,44 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де l_B – довжина вертикального електроду, м.

Попередньо, число вертикальних електродів

$$n'_B = \frac{R_{B.O}}{k'_{i.e} \cdot R_3} = \frac{30,43}{0,54 \cdot 4,0} = 14,1 \approx 14,0 \text{ шт},$$

де $k'_{i.B}$ – попереднє значення коефіцієнту використання вертикальних заземлювачів. Для відношення між довжиною електроду та відстанню між сусідніми електродами рівною 1, приймаємо 0,54.

Попередньо, розрахунковий опір розтіканню горизонтального електроду:

$$R'_r = \frac{\rho_{p.r}}{2\pi \cdot l_r \cdot K_{i.r}} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l_r^2}{b \cdot t_r} \right) = \frac{45}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,325} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 22,4^2}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5} \right) = 10,43 \text{ Ом}.$$

де $k_{i.г}$ – остаточне значення коефіцієнту використання горизонтального з'єднувального електроду в контурі із вертикальних електродів, загальною кількістю 14 шт;

$l_{г}$ – сумарна довжина горизонтального заземлювача, м.

Уточнюємо необхідний опір вертикальних електродів:

$$R_{в.е} = \frac{R_{п.г.е} \cdot R_3}{R_{п.г.е} - R_3} = \frac{10,43 \cdot 4}{10,43 - 4} = 6,49 \text{ Ом.}$$

Тоді остаточна кількість вертикальних заземлювачів складе

$$n_{в} = \frac{R_{о.в.е}}{k_{i.в.е} \cdot R_{в.е}} = \frac{30,44}{0,61 \cdot 6,05} = 7,7 \approx 8 \text{ шт.}$$

де $k_{i.в}$ – остаточне значення коефіцієнту використання вертикальних заземлювачів.

Остаточно приймаємо до установки 8 вертикальних електродів з відстанню між ними рівній їх довжині. Тоді їх сумарний опір складе:

$$R_{в.е} = \frac{R_{о.в.е}}{k_{i.в.е} \cdot n_{в}} = \frac{30,44}{0,61 \cdot 8} = 6,09 \text{ Ом.}$$

Дійсний опір заземлювального пристрою складе

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{в}} + \frac{1}{R_{г}}} = \frac{1}{\frac{1}{6,24} + \frac{1}{10,43}} = 3,9 \text{ Ом} < 4,0 \text{ Ом.}$$

4.3 Висновки

1. Встановлено, що основними технічними заходами, що забезпечують безпечну експлуатацію електроустановок у нормальному режимі роботи є захисне заземлення, занулення, ізоляція струмопровідних частин, електричне розділення мереж різних класів напруги, компенсація ємнісних струмів замикання на землю та вирівнюванням потенціалів.

2. Визначено, що для досягнення нормативного значення опору 4 Ом заземлюючого пристрою КТП 10/0,4 кВ, що встановлена на двошаровому ґрунті, необхідно побудувати контур заземлення із 8-ми вертикальних штирових електродів діаметром 25 мм і розмістити їх по периметру квадрата зі стороною 5,6 м на відстані 2,8 м один від одного та з'єднати їх горизонтальним електродам з шини 50x5 мм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання, що спрямоване на удосконалення комплектних трансформаторних підстанцій та дозволяє забезпечити їх надійне функціонування за несприятливих кліматичних факторів:

Основні наукові та практичні результати роботи такі:

1. Встановлено, що на території України присутні всі основні види техногенних і природних джерел забруднення ізоляції комплектних трансформаторних підстанцій кіоскового типу, які при досягненні критичних значень можуть проводити до повного її перекриття і в загальному підсумку експлуатаційні дефекти ізоляції складають 21%, а на природні чинники, що їх викликають, можливо впливати шляхом контролю мікроклімату у високовольтному відсіку підстанції і тим самим забезпечити надійність її функціонування.

2. Встановлено, що основними видами теплообміну ізолятора високовольтного відсіку комплектної трансформаторної підстанції є конвективний та випромінювання, а розроблені математичні моделі дозволили встановити залежності відносної вологості та температури повітря, температури поверхні ізолятора від поточного часу та визначити, що за 1 год 30 хв до моменту росоутворення ці параметри мають лінійний характер.

3. Обґрунтовано, що для керування мікрокліматом у високовольтному відсіку необхідно контролювати температуру та відносну вологість повітря всередині відсіку, температуру поверхні ізолятора, а за критерій початку утворення роси слід прийняти різницю температури точки роси та поверхні ізолятора. Розроблено пропозиції та рекомендації стосовно виробничого застосування системи керування мікрокліматом у високовольтному відсіку КТП, які дозволять підвищити ефективність її використання.

4. Визначено, що основними технічними заходами, що забезпечують безпечну експлуатацію електроустановок у нормальному режимі роботи є захисне заземлення, занулення, ізоляція струмопровідних частин, електричне розділення мереж різних класів напруги, компенсація ємнісних струмів замикання на землю та вирівнюванням потенціалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок. Х.: Вид-во «Форт», 2017. 760 с.
2. Лут М. Т., Мірошник О. В., Трунова І. М. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК.: Харків: Факт, 2008. 438 с.
3. Курашкін С. Ф., Попова І. О. Механізм пошкодження елементів конструкції силового трансформатора. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Вип. 186: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. 2017. С. 62 - 63.
4. Калинин Е. В. Характеристики изоляции КРУН в условиях выпадения росы // Электрические станции. 1970. № 6. С. 47 - 52.
5. Карамзин А. П., Ярославцев А. М. О перекрытиях изоляции в ячейках КРУН. Электрические станции. 1970. № 11. С. 84 - 86.
6. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной невидалью и компенсацией емкостных токов на землю М: Энергия, 1971. 152 с.
7. Мерхалев С. Д., Соломник Е. А. Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой. Л.: Энергия, 1973. 159 с.
8. Орлович А.Е., Селивахин А.И., Молчанов Ю.Е. Контроль загрязнённости изоляторов КРУН. Совершенствование электроснабжения сельскохозяйственных районов и предприятий: Сб. научн. тр. Моск. ин-т. инж. с.-х. пр-ва, 1987. С. 55 - 59.
9. Гук Ю. Б., Казак, А. В., Мясников Н. А. Теория и расчет надёжности систем электроснабжения / под. ред. Р. Я. Федосенко. М.: Энергия, 1970. 176 с.
10. Федосеенко Р. Я., Мельников А. Я. Эксплуатационная надежность электросетей сельскохозяйственного назначения. М.: Энергия, 1977. 320 с.
11. Абрамов В. Д., Хомяков. М. В. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения. М.: Энергия, 1976. 264 с.
12. Мерхалев С. Д. Соломник Е. А. Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 120 с.

13. Studies of the diffusion of low molecular weight silicone fluids on polluted HV silicone insulators use of diffuse reflectance FTIR / [H. Liu, G. A. Cash, R. D. Sovar, G. A. George, D. Birtwhistle] // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2006. Vol. 13, No. 4. P. 877–884.

14. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. 376 с.

15. Орлович А. Е. Контроль загрязненности изоляторов сельских распределительных устройств для повышения надежности их работы // Опыт электрификации сельского хозяйства на основе ускорения научно-технического прогресса. Л., 1987. С. 21-22.

16. Млынчик И. С. Эксплуатация гидрофобных покрытий изоляции КРУН. Энергетик. 1980. № 2. С. 21-22.

17. Бига А. Я., Рорбах А. А. Опыт эксплуатации комплектных распределительных устройств в Латвглавэнерго. Новые комплектные электротехнические устройства. М., 1981. С. 53-59.

18. А. с. 1208592 СССР, МКИ⁴ H02B 13/04. Комплектное распределительное устройство / Р.Ш. Сагутдинов, А.И. Селивахин, А.Е Орлович и др. Опубл. 1986. Бюл. № 14.

19. Орлович А. Ю. Котиш А. І., Співак О. В. Контроль мікроклімату розподільного пристрою напругою 10 кВ. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Кіровоград: КНТУ, 2012. Вип. 25. Ч. 2. С. 48-51.

20. Орлович, А. Е. Котыш А. И., Спивак О. В. Определение параметров микроклимата в комплектных распределительных устройствах наружной установки для предотвращения аварийности их работы. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.- техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2010. Вип. 40. Ч. 2. С. 124-127.

21. (57) Калинин Е. В., Дьячков В. С., Млынчик И. С. Характеристика изоляции КРУН при повышенной влажности. Электрические станции. 1973. №9. С. 51-56.

22. Плешков П. Г., Орлович А. Ю., Котиш А. І. Автоматизоване регулювання режиму роботи системи обігріву комплексних розподільчих пристроїв на основі прогнозування випадіння роси на ізоляторах. Проблеми енергозабезпечення та енерговикористання в АПК України. 2006.

23. Надёжность КРУН 6 - 10 кВ в сельскохозяйственных распределительных сетях / В. М. Липин, Г. А. Васин, В. С. Симанков и др. Электрические станции. 1973. №5. С. 80-81.

24. Пеневич Е.И. Повышение надёжности работы КРУН. Электрические станции. 1970. № 5. С. 37 - 42.

25. Natuzawa K., Sekigushi N. Development of metal enclosed switcher equipped with automatic dehumidifier. IEEE Trans, on pas. 1984. Vol. 103. №10. P. 3014-3021.

26. Pat. H05K 7/20. Vorrichtung zur Klimatisierung eines Elektrischen Schrankes, insbesondere einer hoch Spannung Schaltstelle / Hanes G., 1986.

27. Кавамура Т, Ишин М. Исследование разности температур и вероятности пробоя загрязнённых изоляторов, находящихся в естественных условиях эксплуатации // Пер. с яп. Декки Гаккай Ронбуси. 1976. Т. 96. В. №1. С. 7-14.

28. Кутателадзе С. С., Боришанский В. В. Справочник по теплопередаче. М.: Госэнергоиздат, 1969. 414 с.

29. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твёрдых тел // Пер. с англ. - М.: Наука, 1964. 488 с.

30. Пехович А.И., Жидких В.Н. Расчёты теплового режима твёрдых тел. Л.: Энергия, 1968. 304 с.

31. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 598 с.

32. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. / Пер. с англ.: Атомиздат, 1979. 212 с.

33. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Пер. с англ.: Под ред. И.Г. Арамановича. М.: Наука, 1984. 831 с.

34. Справочник (справочные данные, модели) /Под. ред. С.И Авдюшина, Ю.С. Седунова. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.

35. Основи охорони праці: Підручник. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний та ін. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. К.: Основа, 2006. 448 с.

36. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / Под. общ. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. М.: Энергия, 1980. 576 с.