

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Миколайчук Лілія Вікторівна

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз та розробка методів впливу якості електричної енергії на надійність
роботи силових трансформаторів

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Миколайчук Л. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Миколайчук Л. В. Аналіз та розробка методів впливу якості електричної енергії на надійність роботи силових трансформаторів. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Цілі роботи. Розробити метод оцінки: недовідпустки електроенергії і викликаного їм економічного шкоди у споживача при зміні ймовірності відмови силових трансформаторів ТП 10/0,4 кВ, обумовленому погіршенням ЯЕ.

Об'єкт дослідження є система електропостачання, що включає силові трансформатори класу напруги (6–10) кВ.

Ключові слова: трансформаторна підстанція, економічна ефективність, реконструкція.

ABSTRACT

Mykolaychuk L. V. Analysis and development of methods of influence of the quality of electrical energy on the reliability of power transformers. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polish National University, Zhytomyr, 2023.

Whole works. To develop a method of assessment: electricity shortfalls and the economic damage caused by them to the consumer when the probability of failure of power transformers TP 10/0.4 kV changes due to a deteriorated nuclear power plant.

The object of research is the power supply system, which includes power transformers of the voltage class (6–10) kV.

Keywords: transformer substation, economic efficiency, reconstruction.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	7
1.1 Збитки від погіршеного якості електричної енергії	7
1.2 Розвиток відмов електрообладнання систем електропостачання	9
1.3 Методи розрахунку надійності електропостачання та оцінки технічного стану силового електрообладнання	17
Висновки по розділу 1	21
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	22
2.1 Розрахунок параметрів теплового режиму силових трансформаторів	23
2.2 Аналіз теплового терміну служби ізоляційних матеріалів, що застосовуються в силових трансформаторах	34
Висновки по розділу 2	40
РОЗДІЛ 3. ПРОПОЗИЦІЇ ЩО ДО ПІДТРИМКИ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	41
3.1 Скорочення міжремонтного періоду для підтримки безвідмовної роботи силового трансформатора	41
3.2 Аналіз статистичних даних значень факторів нагрівання	45
3.3 Імовірно-статистична оцінки терміну служби силового ЕО	50
Висновки по розділу 3	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58

ВСТУП

Функціонування будь-якої електроенергетичної системи (ЕЕС) немає сенсу без надійного процесу вироблення, передачі, розподілу та споживання електричної енергії (ЕЕ) з дотриманням вимог якості електроенергії (ЯЕ). Показники якості електроенергії (ПЯЕ) та показники надійності електропостачання (ПНЕП) у загальному випадку взаємопов'язані. Вивчення питання та проблем, пов'язаних із впливом ЯЕ на термін служби електрообладнання (ЕО), частоту відмов окремих електроприймачів (ЕП) різного роду споживачів, безперебійність електропостачання та інші ПНЕП є пріоритетним та актуальним напрямком розвитку електроенергетики країни, як і минулому, так і в теперішній час [1-4].

Актуальність. За останнє десятиліття відбулося різке зростання джерела струму вищих гармонік і струмів зворотної послідовності у споживачів і очікується, що у майбутньому ці темпи очікувано не будуть знижуватися [1]. Звичайно, така тенденція несприятливо позначається на надійності роботи ЕО електричних мереж та ЕП. Відповідно до стратегії розвитку електроенергетичної галузі України до 2030 року [3] як пріоритетні положення позначено забезпечення якості та надійності постачання споживачам ЕЕ. Стандарти у сфері ЯЕ та надійності в техніці не мають загальних посилянь. Також, у принципах будівлі інтелектуальної електричної мережі з активно-адаптивною мережею надійність енергозабезпечення (НЕЗ) и визначено в взаємозв'язку з КЕ [11, 16].

Об'єкт дослідження. Система електропостачання, що включає силові трансформатори класу напруги (6–10) кВ.

Предмет дослідження. Залежність недовідпустки електричної енергії (ЕЕ) і економічної шкоди від впливу струмів вищих гармонік і струмів зворотної послідовності на елементи СЕП та ЕП споживача.

Цілі роботи. Розробити метод оцінки: недовідпустки електроенергії і викликаного їм економічного шкоди у споживача при зміні ймовірності

відмови силових трансформаторів ТП 10/0,4 кВ, обумовленому погіршеним ЯЕ.

Завдання дослідження. Для досягнення поставлених цілей у кваліфікаційній роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- оцінити вплив струмів вищих гармонік і струмів зворотної послідовності на зміну ймовірності відмови силових трансформаторів;

- розробити метод підвищення ймовірності безвідмовної роботи силових трансформаторів на необхідному рівні;

- розробити метод оцінки очікуваної недовідпустки ЕЕ, обумовленої відмовами силових трансформаторів.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та рішення задач використовувалися методи: теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії масового обслуговування, теорії електричних ланцюгів, теорії подоби та моделювання, теорія диференціальних рівнянь Розрахунки та математичне моделювання виконувалися в програмному середовищі MATLAB.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Гончаренко Ю. П., Миколайчук Л.В. 2.1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Матеріали VII Міжнародна науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи» 15-17 листопада 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-49.

Гончаренко Ю. П., Миколайчук Л.В. ІМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНА ОЦІНКИ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ СИЛОВОГО ЕО

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023». 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 106-108.

Миколайчук Л.В. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інженерні процеси та системи» 14-15 червня 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-51.

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Здійснимо огляд існуючих підходів щодо оцінки впливу ЯЕ на НЕЗ. Наведемо конкретні приклади порушення електропостачання, пов'язані з ЯЕ, і витікаючі з них економічні шкоди в вітчизняній і закордонній практиці. На підставі статистичних даних проведемо аналіз причин технологічних порушень в діючих електричних мережах різного класу напруги.

1.1 Збитки від погіршеного якості електричної енергії

Рівень НЕЗ споживача безперервно змінюється разом з великою кількістю випадкових параметрів режиму ЕЕС. Головним чином НЕС визначається технічним станом мережевого обладнання, структурою схеми електропостачання. Генеруючи, передаючи та розподіляючи електроенергію, елементи ЕЕС відчувають у собі електромагнітні обурення, які впливають їх стан. Відомо, що поточна електромагнітна обстановка (ЕМО) мережі розкривається через значення ПЯЕ. У межах допустимого діапазону зміни ПЯЕ, як правило, не приводять до негативних наслідків, пов'язаних з інтенсивним зносом елементів мережі, суттєвому підвищенню рівня втрат ЕЕ у мережі. ЕО та ЕП, які в процесі експлуатації піддаються багаторазовому наднормативному електротромагнітного впливу, можуть некоректно функціонувати, відчувають прискорене зношування і згодом відмовляють, не виробивши очікуваного терміну служби. У зв'язку з цим виникає економічна шкода від неякісної ЕЕ. як у електромережних компаній, так і у підприємств-споживачів. Збитки від погіршеного ЯЕ підрозділяється на дві складові: електромагнітну та технологічну [13].

Електромагнітна складова шкоди пов'язана з порушенням електромагнітної сумісності (ЕМС) ЕП, підвищеним рівнем втрат ЕЕ в мережах, підвищеною витратою енергоносіїв на електростанціях.

Технологічний збиток обумовлений ліквідацією аварій у СЕП, проведенням

незапланованих ремонту і заміни відмовив ЕО, розладом складного технологічного процесу, браком і недовипуском готової продукції, простоем і недовикористанням основних виробничих фондів і робочої сили. За своїм розміром технологічний збиток на порядок більше електромагнітного.

Згідно [16] серед 985 компаній у США, що включають близько 2 млн. фірм промислового сектору та підприємств сфери комунікаційних послуг та цифрових технологій, у сукупності зазнають річних збитків у розмірі 45,7 млрд. доларів від перерв в електропостачання. Із загального розміру збитків 29,2 млрд. доларів посідає сектор виробництва та служб першої необхідності, 13,5 млрд. доларів – на підприємствах цифрових технологій. Від неякісної ЕЕ щорічні збитки «цифрового» сектора економіки США складають 6,7 млрд. доларів. Величезні збитки підприємств із безперервним циклом виробництва в основному від зникнення напруги, перерва електропостачання яких протягом однієї секунди оцінюється в середньому 12 тисяч доларів.

Суттєві збитки, спричинені погіршенням ЯЕ, були зареєстровані і вітчизняними компаніями різних галузей промисловості. Так в 2007 р. зафіксований на нафтопереробному заводі 90% провал напруги тривалістю 0,5 секунди призвів до збитків у 33 тисячі доларів, а середня значення збитку за рік становило 250 тисяч доларів [16].

Для забезпечення ЕМС у низці країн Європи розроблено законодавчі акти та директиви, що сприяють підтримці ЯЕ у розподільчих мережах [11]. Для досягнення поставленої мети в одних країнах (Німеччина, Італія) застосовують штрафні санкції до виробникам, недотримуючим прийняті норми, в інших (Швеція, Великобританія) накладається заборона на будь-яку торгівлю електротехнічної продукцією, яка не пройшла атестацію на ЕМС.

Неякісна ЕЕ у мережах обумовлює несприятливі умови роботимережевого ЕО та ЕП споживачів, прискорюючи старіння електроізоляційних матеріалів, що з часом призводить до збоїв та відмов елементів СЕС. В свою черга відмова елементів СЕС при найгіршим розвитку подій може стати прямою чи непрямою причиною припинення електропостачання. При вимірях значення

ПКЕ по струму та напрузі істотно різняться. Так, наприклад, заходів, з даних випробування ЕЕ (Додаток А) видно, що з боку генераторної напруги $U_{\text{ном}} = 15,75$ кВ трансформатора, який живить випрямляч системи збудження, зареєстровані суттєві спотворення по струму - п'ята гармоніка становить 22% струму основної частоти. Однак при цьому коефіцієнт п'ятої гармонійної складової напруги становить менше 0,7 % від напруги прямої послідовності основної частоти при нормативному значенні 4 % згідно чинному стандарту ГОСТ 32144-2013.

Критерієм оцінки НЕЗ є економічна шкода від перерви постачання ЕЕ споживачеві. Визначення розміру потенційної шкоди вимагає виявити механізм впливу ЯЕ на НЕЗ. Якісного розуміння процесів для цього недостатньо і необхідно отримати кількісні характеристики.

1.2 Розвиток відмов електрообладнання систем електропостачання

У процесі експлуатації ЕО виділяється три характерні періоди проявлення відмов [14]:

1) перший період (приробіток) характеризується спадаючим рівнем інтенсивності відмови з часом, що пояснюється наявністю в партіях обладнання бракованих виробів, що випускається, недотриманням правил монтажу і експлуатації;

2) протягом другого (основного) періоду експлуатації спостерігається стабілізація. зація числа відмов близько деякого середнього значення, коли в період поточною експлуатації відмови з'являються несподівано;

3) третій період пов'язаний з наростаючим числом відмов внаслідок старіння та фізичного зносу матеріалів (особливо ізоляційних), накопиченого за період експлуатації.

Однією з причин передчасних відмов є додатковий нагрівання ізоляції струмопровідних елементів ЕО. Температура нагріву активних частин ЕО – один із найбільш суттєвих параметрів режиму його роботи. Її значення залежить від величини втрат потужності, способу охолодження та

кліматичних умов.

ПЯЕ, які впливають на втрати потужності: коефіцієнти спотворення синусоїдальності форми кривої та n -ої гармонійної складової (факторами нагрівання є струми вищих гармонік $I_{(n)}$), коефіцієнти несиметрії по зворотній послідовності трифазних напруг (факторами нагріву являються струми зворотної послідовності I_{2U}), а також відхилення напруги і частоти (фактором нагріву є основний струм частоти I_1).

В енергосистемі відхилення напруги і частоти контролюються суб'єктами ринку ЕЕ: системний оператор здійснює регулювання частоти в енергосистемі, магістральні і розподільчі мережеві компанії відповідають за рівень напруги в точках приєднання на кордонах балансової належності та експлуатаційної відповідальності.

У то ж час збільшення значень вищих гармонік і несиметрії напруг пов'язано зі зростанням кількості джерел електромагнітних завад (ЕМЗ) у споживачів побутового та промислового сектора, які не вживають заходів щодо їх нормалізації. Причина цього пов'язана з високою вартістю організації контролю ЯЕ, що здорожчує обслуговування та експлуатацію електрогосподарства.

У цій роботі показано зв'язок між розглянутими ПЯЕ і недовідпусткою ЕЕ як критерієм НЕЗ. На рисунку 1.1 показано зв'язок подій, їх послідовності та факторів обліку показників надійності, що призводять до перериву електропостачання, викликаного відмовою трансформатора.

Статистика подій, пов'язаних з аварійністю ЕО, розподільних та мереж живлення, показує різнобічну природу їх причин. Проаналізуємо дані щодо відмов елементів СЕП, що належать різним класам напруг [14]. У таблиці 1.1 представлені відмови силових трансформаторів та автотрансформаторів живильних мереж.

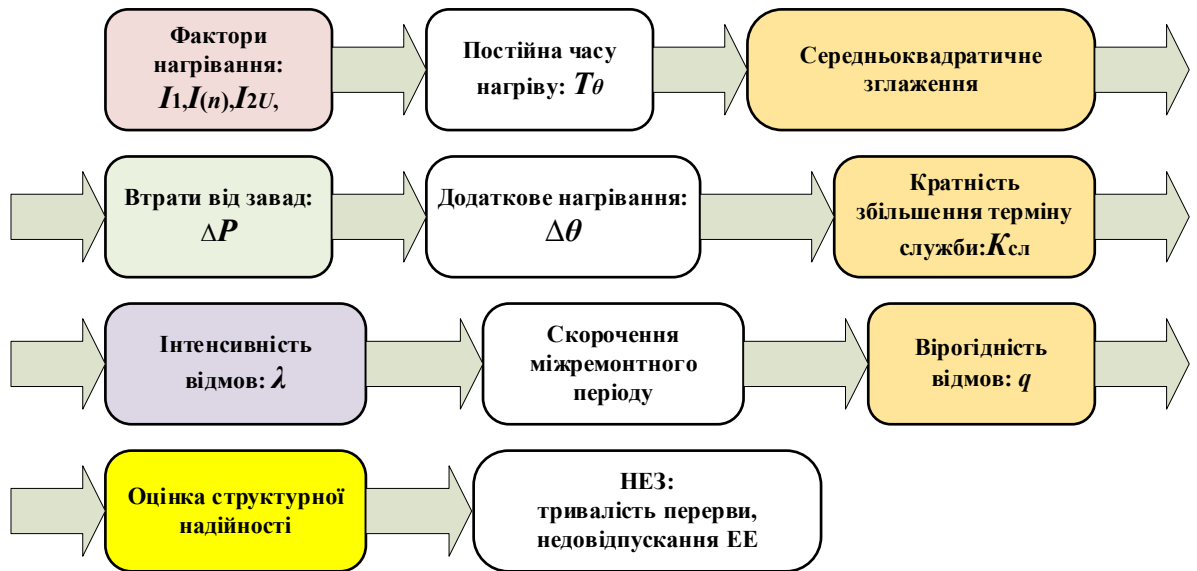


Рисунок 1.1 - Блок-схема, розкриваюча механізм впливу ЯЕ на НЕЗ

Таблиця 1.1 - Відсоток відмов силових трансформаторів класів напруги 330–500 кВ, обумовлених їх конструктивними елементами

Елемент	Частка від загальної кількості відмов, %
Обмотка	52
Введення	27
РПН, ПБВ	9
Магнітопровід	5
Інші відмови	5
Контакти	1
Масло	1

Відмови силових трансформаторів обумовлені станом їх обмоток, котрі схильні до: міжвіткових і міжкотушкових замикань - 28 %; порушення головної ізоляції обмоток - 12%; пошкодженням від термічних та динамічних впливів - 12%. Ці дані показують, що підвищення надійності силових трансформаторів вимагає проведення діагностики стану ізоляції обмоток при рішенні питання про продовженні терміну їх експлуатації.

У [15] наведено результати огляду технологічних порушень, які зареєстровані в розподільчих мережах, і дається аналіз їх причин:

– 76 % технологічних порушень спричинено пошкодженнями повітряних ліній електропередачі (ПЛЕП);

– 20% від числа порушень елементів розподільчих мереж доводиться на ЕО підстанцій, з них 14% пов'язано з виходом з ладу силових трансформаторів (у здебільшого це введення, обмотки, пристрої регулювання напруги - РПН та ПБВ);

– 2 % відноситься до відмов, хибним спрацьовуванням пристроїв релейного захисту ти і автоматики (ПРЗА), а також протиаварійної автоматики (ПА);

– 2 % доводиться на відмови кабельних ліній.

Також на рівень НЕС значний вплив мають комутаційні апарати (з автоматичним, напівавтоматичним або ручним приводом) як елементи СЕС, які безпосередньо впливають на електричну топологію мережі і відмова в спрацьовуванні яких наводить до ескалації що наноситься збиток [20]. У той же час 25% від усіх порушень, включаючи технічні, пов'язані з неналежним виконанням ремонту, а також незадовільною організацією. цією і неправильною стратегією обслуговування.

Як відомо, відмови та збої в роботі ПЛЕП пов'язані з механічними пошкодженнями опор, обривами та схльостуванням фазних проводів, забрудненням поверхні ізоляторів, проведення ремонтних робіт [10]. Тобто причинами, не пов'язаними із проявами ЯЕ. У разі розгляду впливу на ПЛЕП кондуктивних перешкод у вигляді вищих гармонік та несиметрії, то оцінка прово- діється по допустимому рівнем нагріву її струмоведучих частин. Так як тепловий розрахунок проводів ПЛЕП має невизначений характер, то при проектуванні передбачається завищення робочої температури [9]. Тому чекати критичного перевищення температури проводів ПЛЕП і неприпустимого збільшення стріли їх провисання від впливу струмів вищих гармонік і зворотних струмів послідовності не доводиться.

Перенапруги та провали напруг, що найбільш часто спостерігаються

ПЯЕ в електричних мережах, особливо з ізолюваним режимом роботи нейтралі (Клас напруги 6-35 кВ). Кількісна оцінка цих ПЯЕ виконується на підставі збору статистичної інформації, яка індивідуальна для конкретної мережі, і характеризується постійною величиною потоку (інтенсивності) відмов.

Тому, незважаючи на переважний відсоток технологічних порушень через відмови ПЛЕП, сконцентруємо увагу на статистиці технологічних порушень підстанцій, силові трансформатори яких чутливі до додаткового нагрівання від поширення кондуктивних перешкод у вигляді струмів вищих гармонік і струмів зворотній послідовності.

У [6] представлені зведені дані про питому частоту відмов за певний період показують, які коливаються на різних підстанціях в діапазоні від нуля до одиниць відмов у рік. При аналізі було виявлено, що частота відмов на підстанціях з великим класом напруги набагато вища, ніж на підстанціях більш нижчої напруги. Як приклад, на рисунку 1.2 питома частота відмов на обладнанні підстанцій 330кВ. Ці дані є результатом аналізу 58 [6] розглянутих підстанцій даного класу напруги.

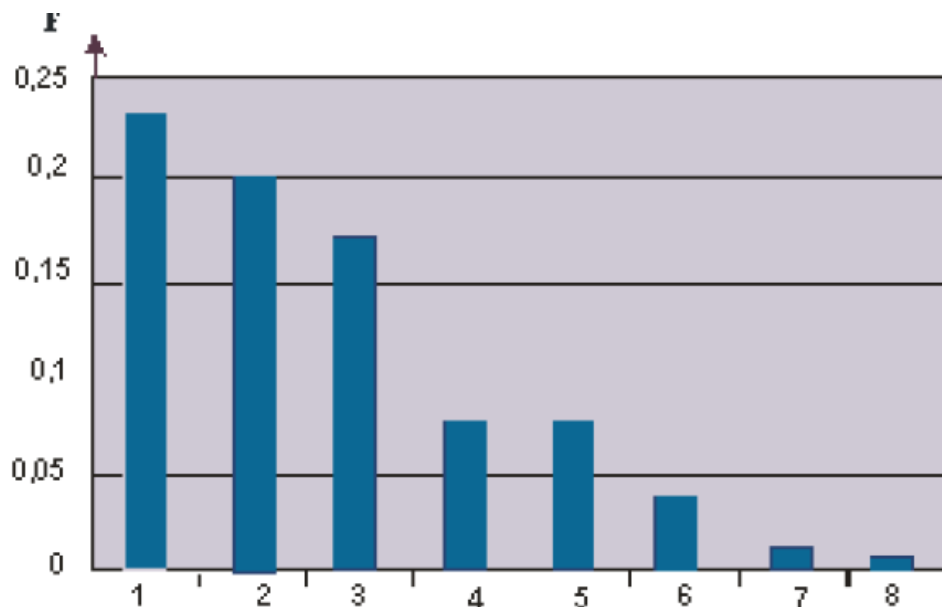


Рисунок 1.2 - Розподіл питома частоти відмов по кожному обладнанню підстанцій 330кВ:

1 – вимикачі повітряні, 2 – силові трансформатори, 3 – роз'єднувачі, 4 –

вимикачі оливні, 5 – трансформатори струму, 6 – збірні шини, 7 – трансформатори напруги, 8 – розрядники

Як видно з рис. 1.2, найчастіше виходять з ладу при нормальному режимі роботи вимикачі, силові трансформатори та роз'єднувачі. Дана статистика характерна і для обладнання на підстанціях 750кВ і 220кВ.

Для силових трансформаторів на 750 кВ найчастіше відбувається порушення внутрішньої ізоляції – до 43%; далі за значимістю – до 19%, зареєстровано перекриття зовнішньої ізоляції; на третьому місці – потрапляння птахів і сторонніх предметів – до 14%; близько 10% відмов трансформаторів викликані пошкодженням високовольтних вводів і опорних ізоляторів. У той же час, для трансформаторів класу 330кВ на перше місце по вагомості причин відмов виходить пошкодження високовольтних вводів – до 44%; на внутрішні КЗ відносять відмови – до 20%, на перекриття і руйнування опорних ізоляторів – до 5% [6].

В даний час вітчизняна електроенергетика характеризується морально та фізично застарілим мережевим ЕО (табл.1.2), невчасним та неналежним проведенням поточних та капітальних ремонтів, відсутністю в експлуатаційних організацій сучасних приладів для діагностики та виявлення прихованих ушкоджень ЕО [1,3,7]. Така ситуація більшою мірою зобов'язує інженерів електроенергетичної галузі звернути увагу на назрілі проблеми та шляхи їх вирішення. При переході до інтелектуальної електроенергетичної системи з активно-адаптивною мережею (ІЕС ААМ) необхідно закласти основні принципи будь-якої ЕЕС - якісна і надійна генерація, передача і розподіл ЕЕ. Реалізація основних принципів ЕЕС не можлива без надійно функціонування ЕО, ЛЕП, проведення профілактичних, діагностичних, ремонтних і оперативних заходів. Для рішення завдань, пов'язаних з довгостроковим збереженням працездатного стану ЕО, економічною передачею ЕЕ по ланцюгах електричної мережі, нормальною експлуатацією ЕП побутових і промислових споживачів підвищений увага слід приділити ЯЕ, як од ному з основних умов безвідмовного, тривалого, ефективного

функціонування всіх елементів електричної мережі та головним чином ЕП споживачів. Отже, НЕС споживачів з обліком що склалася обстановки в вітчизняної електроенергетиці багато в чому визначається технічним станом мережевого ЕО. Слід відзначити, що безперебійність постачання ЕЕ в найбільшій мірі залежить від надійності ділянки електричної мережі, від якого безпосередньо отримують живлення ЕП споживача. Тому спочатку необхідно проводити оцінку НЕС через ПНЕС ЕО, безпосередньо бере участь в поставці ЕЕ до місця споживання.

Таблиця 1.2 - Зведені дані по обладнанню, що використовується на підстанціях України

Назва обладнання	Сумарна потужність, МВА	Кількість одиниць	Зокрема в експлуатації (років), одиниць			
			до 25	25 -30	30 -40	40 і більше
1. Автотрансформатори (220–750кВ) загалом, у тому числі:	74178	342	55	8	139	65
220 кВ	11508	67	3	12	28	24
330 кВ	44030	214	38	56	94	26
400 кВ	399	3	0	0	0	3
500 кВ	1753	10	3	3	4	0
750 кВ	16488	48	11	12	13	12
2. Трансформаторисилові(35–220кВ загалом, у тому числі:	4569,5	102	22	13	25	42
35 кВ	276,5	24	1	2	7	14
110 кВ	1604,5	39	14	6	6	13
154 кВ	710	13	4	3	2	4
220 кВ	1978,5	26	3	2	10	11

Впливи ПЯЕ на відмову ЕО за часом існування поділяються на раптові та поступові. До ПЯЕ раптового впливу відносяться: імпульсні перенапруги

(атмосферні, комутаційні), провали напруги, а поступового – відхилення напруги, що встановлене, коливання напруги, коефіцієнт спотворення синусоїдальності форми кривої напруги, коефіцієнт несиметрії трифазної системи напруги.

Надійна робота будь-якого елемента СЕС забезпечується умовами його експлуатації. Здатність елементів СЕС виконувати свої функції в заданому обсязі та заданій якості багато в чому визначається значеннями електричних величин, що впливають на їх органи управління, активні частини, які визначають їх працездатність. Значення електричних показників не є постійними величинами внаслідок значної кількості які у системі електромагнітних, електромеханічних перехідних процесів. При відхиленнях контрольованих ПЯЕ в допустимому діапазоні говорять про ЕМС елемента відношенню до іншим елементам ЕЕС, підключеним і функціонуючим вцієї ж мережі. Маючи взаємні зв'язки і виконуючи свої функції, елементи мають вплив один на одного. Маючи індивідуальні властивості, як у конструктивному, так і в режимному відношенні елементи вносять власні вклади в поточний стан електричної мережі [17]. Вплив струмів вищих гармонік і струмів зворотній послідовності на силові трансформатори наводить до формування додаткових втрат і тим самим до зростання перевищень температури між його активними частинами та охолоджуючим середовищем. Міжнародний стандарт [8] пропонує рекомендації по завантаженні розподільчих трансформаторів, які живлять споживачів несинусоїдальним струмом. У вітчизняній практиці діє нормативний документ [9], в якому введено обмеження на емісію вищих гармонійних складових споживаного струму низьковольтних електричних мереж. Інших заходів у вищеперерахованих нормативних документах не пропонується, проте з [18] випливає, що стратегія планово-попереджувальних ремонтів (ППР) та заміни силового ЕО безпосередньо впливає на поведінку інтенсивності відмов, пов'язаної з процесами зносу та старіння.

Ступінь впливу перешкоди на технічний стан та/або функціональну

здатність ЕО залежить від внутрішнього опору струмопровідних і провідності ізолюючих елементів конкретного виду ЕО. Якщо перешкода представляє собою хвилю електричного струму, то сприйнятливість ЕО визначатиметься послідовно з'єднаними повними опорами з активно- індуктивним характером. У разі хвилі напруги слід говорити про комплексні провідності, що мають активно-ємнісний характер, паралельно сполучених і перебувають під різницею потенціалів перешкоди. Крім здатності елемента чинити опір і проводити ЕМП, ступінь впливу на ЕО визначається величиною ЕРС джерела перешкоди, його потужністю та внутрішнім опором.

Для визначення сприйнятливості до термічному впливу від виділених в ЕО втрат слід оперувати параметрами, що характеризують теплообміну: теплопровідність, тепловіддача, випромінювання між окремими частинами та вузлами ЕО. Оскільки джерелом тепла в ЕО є активні частини: провідники зі струмом і феромагнітні тіла з магнітною індукцією, то рівень сприйнятливості елементів буде назад пропорційний опорам провідних, діелектричних та магнітних шляхів.

На підставі проведеного аналізу факторів зниження надійності ЕО та фізичних механізмів впливу їх на розвиток відмов перейдемо до огляду підходів з оцінки технічного стану ЕО та методів розрахунку НЕС для розробки методу, відбиває вплив кондуктивних перешкод на зміна ПНЕС.

1.3 Методи розрахунку надійності електропостачання та оцінки технічного стану силового електрообладнання

Відомі три категорії НЕС ЕП, встановлені в [7]. Категорія пов'язана з мірою потенційної шкоди, яка обумовлена припиненням функціонування окремо взятого ЕП, та чим вищий номер категорії ЕП, тим небезпека перерви його електропостачання нижче.

При визначенні показників надійності елементів ЕЕС можливо користування двох підходів фізичного та статистичного. Фізичний підхід полягає в тому, що стан обладнання оцінюється і описується конкретними фізичними величинами та явищами. З його допомогою можна докладно

дослідити наслідки, викликані передбачуваними причинами, аналізувати сценарії розвитку подій. Недоліком такого підходу є облік всіляких гіпотез, послідовностей виникнення факторів, що впливають і взаємозв'язків між ними.

Статистичний підхід базується на досвіді, тому він найбільш переконує і не вимагає верифікації. Точність цього підходу багато в чому залежить від об'єму вибірки та тривалості збору інформації. Він інтегрально враховує у сукупність реальних причин, які привели об'єкт в цей стан. Однак він не розкриває суті процесів, що відбуваються, що робить його в цьому відношенні не наочним. Для отримання повної картини про надійність об'єкта та про його стан слід застосовувати обидва підходу [18].

Традиційно розрахунок показників надійності виконують шляхом збору і накопичення статистичних даних. У європейських країнах, США прийнята оцінка НЕС по таким показниками як: середнє значення частоти відмови системи (англ. SAIFI), середнє значення тривалості перерви системи (англ. SAIDI), середнє значення тривалості перерви споживача (англ. CAIDI), середнє значення коефіцієнта готовності системи (англ. ASAI) та інші [21]. Кожен з них обчислюється по зафіксованому числу, тривалості перерв електропостачання, встановленого відсотка споживачів, які зазнають порушення електропостачання та безлічі інших параметрів. Зарубіжні електромережні компанії використовують зазначені показники як критерії ефективності ведення свого бізнесу, для позначення умов у договорах зі споживачем та надання звітності комісіям, які регулюють їхню діяльність. Однак перераховані ПНЯС не дозволяють виявити перерви в електропостачанні, визвані погіршенням ЯЕ, тобто властиві недоліки статистичного підходу при розрахунку показників надійності.

У вітчизняній практиці оцінку системної надійності прийнято виконувати за допомогою комплексного показника P - ймовірності бездефіцитної (безвідмовної) роботи, який виражений у відносних одиницях [14,19]. Ймовірність бездефіцитної роботи розраховується шляхом підсумовування

всіх можливих станів ЕЕС, в яких споживачі отримують електричну потужність в повному обсязі (балансова надійність). Модель розрахунку станів ЕЕС може бути побудована на різних принципах, викладених у [18]. До базових відносяться структурні методи розрахунку показників надійності. Ці моделі будуються на поданні досліджуваного об'єкта у вигляді схеми блоків (наприклад, блок стану об'єкта або його частини, блоки причинно-наслідкового зв'язку і так далі), поєднаних між собою певним чином та які розкривають властивості елементів об'єкту. Зв'язки між абстрактними блоками характеризуються інтенсивними переходу з одного блоку в інший з урахуванням напрямку їхньої дії. Поведінка структури залежатиме від початкових умов системи, логічних зв'язків між блоками і характером зміни інтенсивностей переходів в часі.

При наявності фізичних аналогів досліджуваного об'єкта, досвіду його експлуатації визначають характер поведінки і значення інтенсивностей переходів по статистичній інформації за тривалий проміжок часу. Результати обробки статистики будуть змінюватися як з збільшенням часу спостереження, так і від умов, в яких знаходився об'єкт. Тому оброблені статистичні дані будуть вірні тільки для умов, за яких вони були отримані. Наявна в сучасній довідковій літературі інформація про показники надійності елементів СЕС відповідає умовам їх експлуатації, ЕМС електричних мережах 60-90-х рр. минулого століття [14, 20]. В електричних мережах того періоду часто не фіксувалися такі значні рівні вищих гармонік і несиметрії струмів та напруг, які присутні у сучасних електричних мережах. Пояснюється це різким зростанням відсоткової частки напівпровідникових перетворювачів, ЕП з нелінійною вольтамперною характеристикою від встановленої потужності навантаження [15]. Звідси й народжується інтерес до дослідження зміни значень ПНЕС в залежності від рівня кондуктивних перешкод в вузлах навантаження.

Оцінка технічного стану будь-якого електротехнічного виробу в більшості випадків проводиться через фізичний стан та цілісність системи електричної

ізоляції струмопровідних елементів. Таке становище пояснюється підвищеною вразливістю електроізоляційних матеріалів практично до всіх експлуатаційним факторів.

Слід розрізняти надійність генеруючої, передавальної та приймальної частини ЕЕС [16]. У кожному випадку застосовуються індивідуальні математичні моделі, що відбивають специфіку об'єкта, що досліджується. Наприклад, для оцінки надійності систем з домінуванням відмов генераторів та при необхідності врахування великої кількості факторів використовують метод Монте-Карло [17], а для щодо невеликих електричних схем (кілька сотень елементів) з високонадійними елементами користуються методом перебору станів структури на базі марківських випадкових процесів [18].

Відповідно до аналізу, проведеного в [19], велике поширення в інженерній практиці отримали формальні моделі із застосуванням стандартних математичних функцій. Вони відрізняються своєю наочністю, доступністю та можливістю швидкого отримання шуканого результату, але мають низьку точність. У зв'язку з цим для отримання максимально наближеного до дійсності розрахункового значення параметра надійності користуються стохастичними динамічними моделями, що включають безліч впливових факторів досліджуваного випадкового процесу. Проте ступінь складності такої моделі, її розмірність різко зростають із збільшенням числа врахованих випадкових величин процесу [16].

Для оцінки надійності електричної ізоляції ЕО в основному вдаються до математичної моделі надійності з послідовним з'єднанням абстрактних елементів, кожен з яких розкриває певну сторону фізичного прояву її порушення [19].

У статті [19] наводиться ймовірнісний підхід щодо визначення функції надійності, яка залежить від додаткового нагрівання ізоляції елементів СЕС при несинусоїдальних режимах роботи. У методі

зкладено апостеріорний нормальний закон розподілу перевищення температури, створюваного від вищих гармонік струму. Однак не розкривається, яким чином отриманий апостеріорний закон розподілу пов'язаний з коефіцієнтами спотворення синусоїдальності форми кривий i і n -ї гармонійної складника напруги.

У [8] розроблені динамічні моделі ЕМС з несинусоїдальності та несиметрії напруги для різних елементів СЕС. У використуваних моделях закладено термічний ефект від дії кондуктивних перешкод.

Відповідно у кваліфікаційній роботі було звернено увагу на с ланки, які проявляються у зниженні НЕС за рахунок погіршення ЯЕ по найбільш поширеним в електричних мережах показниками: вищі гармоніки та несиметрія по зворотній послідовності струмів та напруг. Зумовлено це тим, що зазначені кондуктивні перешкоди інтенсивно впливають на ЕО через нагрівання ізоляції, призводячи до її руйнування та виходу обладнання з ладу.

Висновки по першому розділу

Зроблений огляд літератури та публікацій у роботі дозволяє зробити такі висновки:

- 1) на сьогодні в нормативних документах, ні в науковій літературі не встановлений зв'язок між ПKE та ПНЕС;
- 2) безперебійність поставки ЕЕ більшою мірою залежить від справності силового ЕО та ЛЕП, до яких безпосередньо приєднані ЕП з різною категорією НЕС;
- 3) необхідно розробити метод, що дозволяє забезпечити надійну роботу силових трансформаторів для зниження невідпустки ЕЕ;

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

У розділі досліджується зміна надійності силових трансформаторів розподільчих електричних мереж залежно від ЯЕ. Розглядаються технічні та організаційні заходи щодо підвищення ймовірності безвідмовної роботи силових трансформаторів, працюючих в умовах погіршеного ЯЕ.

Відмова силового трансформатора в електричній мережі є важкою аварійною ситуацією. Усунення подібних аварій виконується максимально швидко для локалізації наслідків. У трансформаторах небезпечні випадки перекриття ізоляції між обмотками різного класу напруги, коли на стороні НН з'являється високий потенціал.

Для підвищення рівня технологічної безпеки силові трансформатори піддають періодичним планово-попереджувальним та капітальним ремонтам. У вітчизняній практиці склалися такі стратегії експлуатації цих силових трансформаторів [20]:

- 1) проведення капітального ремонту силового трансформатора через фіксацію рівний термін напрацювання;
- 2) рішення щодо необхідності проведення капітального ремонту приймається на підставі результатів діагностики проб трансформаторної оливи;
- 3) експлуатація трансформаторів до повної відмови з наступною заміною на нове обладнання (для трансформаторів розподільчих електричних мереж).

Перетворення і передача ЕЕ в трансформаторі супроводжується виділенням теплоти, яка за допомогою холодоагенту (зазвичай трансформаторна олива або повітря) відводиться у довкілля. Конструкція, спосіб охолодження сучасних силових трансформаторів вибирається виходячи з призначення його потужності, класу напруги. Так, трансформатори розподільчих мереж мають потужність до 2,5 МВА, клас напруги до 35 кВ, з

регулюванням напруги за допомогою ПБВ, систему охолодження *ON* (англ. Oil, Nature або M - природне масляне охолодження) і при необхідності для регулювання допустимого перевищення температури активних частин оснащуються додатковими охолоджувачами (гофровані баки, труби, навісні радіатори). За даними [7] кількість трансформаторів класом напруги 6-10 кВ в Україні станом на 2021 рік складає близько 10 тисяч одиниць сумарною потужністю понад 12 тисяч МВА, тепловий режим роботи яких обмежується допустимою температурою найбільш нагрітої точки обмоток.

Як впливає з рисунку 1.1 нагрівання трансформатора, зумовлене струмом навантаження, вищими гармоніками струму та струмами зворотної послідовності яке супроводжується зростанням його ймовірності відмови з наступним вимушеним відключенням і підвищенням ризику виникнення перерви електропостачання.

Звідси впливає, що надійність силових трансформаторів, які живлять раз-особистого роду споживачів, безпосередньо позначається на НЕС.

2.1 Розрахунок параметрів теплового режиму силових трансформаторів

Проаналізуємо теплові процеси при розсіюванні втрат, що виділяються в активних частинах (обмотки та магнітопровід) силових трансформаторів при протіканні струмів основної (промислової) частоти, а також кондуктивних перешкод (струми вищих гармонік та струми зворотної послідовності). У кожній з активних частин формуються результуючі теплові втрати, зумовлені різними фізичними явищами: поверхневий ефект, перемагнічування електротехнічної сталі, вихрові струми від основного потоку і потоків розсіювання.

Силові трансформатори мають різні типи конструкцій обмоток: багат шарові, гвинтові, котушкові [21]. Кожен із зазначених типів знайшов свою сферу застосування. Так, для одно- і трифазних трансформаторів, напругою до 6 кВ і потужністю на один стрижень не

більше 250 кВА широкое використання отримали багат шарові циліндричні обмотки з прямокутного проводу. Більш дорогі у виробництві в порівнянні з багат шаровими циліндричними обмотками, гвинтові виконуються тільки як обмотки напругою до 35 кВ оливних силових трансформаторів потужністю більше 160 кВА та сухих – від 160 до 1600 кВА. Маючи найвищу механічну міцністю, безперервні котушкові обмотки успішно застосовуються в трансформаторах номінальною потужністю від 160 кВА і напругою більше 10 кВ.

Теплообмін в трансформаторах з природним охолодженням відбувається шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання. Теплопровідність має місце в твердих тілах, конвекція характеризує тепловіддачу з поверхні твердого тіла до рідкого або газоподібного середовища, а випромінювання електромагнітних хвиль відбувається у всіх нагрітих середовищах незалежно від їх агрегатного стану.

У [21] наведені результати теплових випробувань циліндричних та катушкових обмоток масляних силових трансформаторів, а також розрахункові вирази для обчислення теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі на охолодження очікуваної поверхні.

Градiєнт температури, утворений шляхом розсіювання теплових втрат металів обмотки, визначається в °С по виразу [21]

$$\Delta\theta_{об-м} = q_{об} \cdot \left(\frac{\delta_{із}}{\lambda_{із}} + \frac{1}{\alpha_{об}} \right), \quad (2.1)$$

де $\Delta\theta_{про-м}$ – перевищення температури між поверхнею обмотки та оточеною нею оливою;

$q_{об}$ - густина теплового потоку на поверхні обмотки;

$\delta_{із}, \lambda_{із}$ – відповідно товщина та коефіцієнт теплопровідності твердої ізоляції елементарних провідників обмотки;

$\alpha_{об}$ - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні обмотки, що омивається маслом.

Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{об}$, Вт / (м²·°С) залежить від великого числа

фізичних параметрів [21] і в теорії подоби тепломасообміну виражається через безрозмірне число Нуссельта [59]

$$\alpha_{об} = \frac{\lambda \cdot Nu}{l_x},$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища;

Nu - число Нуссельта рідини;

l_x - характерний геометричний розмір (для труб – це діаметр, для відкритих плоских поверхонь - довжина чи висота).

У випадку, коли канал має неправильну геометричну форму, гідравлічний діаметр d_k , м обчислюють по формулі

$$d_k = 4 \cdot \frac{S_k}{P_k}$$

де S_k - площа поперечного перерізу каналу, в якому тече рідина;

P_k - змочений периметр каналу.

Число Нуссельта в теорії подоби тепломасообміну є безрозмірним коефіцієнтом тепловіддачі і залежить від співвідношення інших безрозмірних величин [21]:

- при природній конвекції це критерії Грасгофа (Gr) і Прандтля (Pr)

$$Nu = f(Gr, Pr),$$

- при вимушеній конвекції додається ще критерій Рейнольдса (Re)

$$Nu = f(Re, Gr, Pr)$$

Каждый из перечисленных безразмерных критериев подобия имеет свой физический смысл [22]:

1) число Грасгофа определяет отношение сил объёмного расширения к силам вязкого трения жидкости

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta\theta_{ж} \cdot l_x^3}{\nu^2},$$

де g - прискорення вільного падіння;

β - температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини;

$\Delta \theta_{жс}$ – середній перепад температури між охолоджуваною (нагріваною) поверхньою та рідиною;

ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини.

2) число Прандтля є теплофізичною постійною величиною

$$Pr = \frac{c \cdot \rho \cdot \nu}{\lambda},$$

де c - питома теплоємність рідини;

ρ - об'ємна густина рідини.

3) число Рейнольдса характеризує співвідношення сил інерції і сил в'язкого тертя

$$Re = \frac{w \cdot l_x}{\nu},$$

де w - швидкість потоку рідини вздовж охолоджуваної поверхні.

При дослідженні теплообміну в масляних трансформаторах будемо сходити з припущення про те, що трансформаторна олія є ньютонівською рідиною, коефіцієнт динамічної в'язкості якої є постійною величиною [21].

У разі природного конвективного теплообміну критерієві рівня розрахунку середнього значення числа Нуссельта запишеться наступним чином [60]

$$Nu_p = A \cdot (Pr_p \cdot Gr_p)^b \cdot K_M, \quad (2.9)$$

де Pr_p , Gr_p - безрозмірні критерії Прандтля і Грасгофа рідини, визначаються при середньої температурі між обмоткою та рідиною, °С

$$\theta_{cp} = \frac{\theta_{об} + \theta_{жс}}{2}$$

A , b - емпіричні коефіцієнти, отримані при різних значеннях твори (Pr_p , Gr_p);

K_M - коефіцієнт, запропонований академіком Міхеевим М.А., який враховує напрямок руху теплового потоку

$$K_M = \left(\frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \quad (2.11)$$

У разі примусового руху рідини до охолоджуваної поверхні критеріальне рівняння записується наступним чином [60]

$$Nu_p = A \cdot (\text{Pr}_p \cdot Gr_p)^b \cdot \left(\frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \quad (2.12)$$

Значення експериментальних коефіцієнтів A і b у формулах (2.9) та (2.12) для різних типів обмоток і способів їх охолодження наведено в [20].

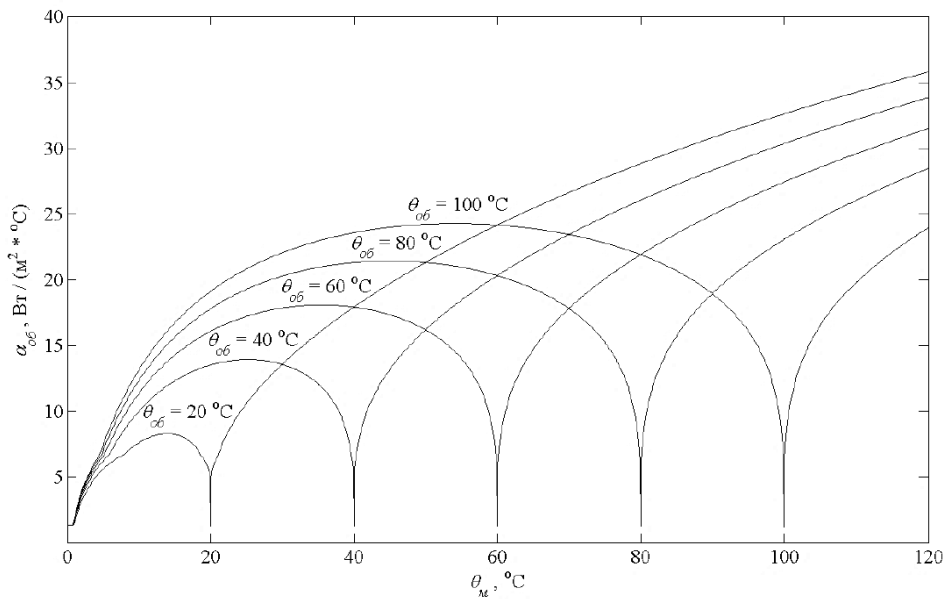
На рисунку 2.1 a , b за виразом (2.9) та критеріями вибору коефіцієнтів A і b , наведеним в [60], побудовані залежності коефіцієнта тепловіддачі з поверхні обмотки $\alpha_{об}$ в процесі природною конвекції від температури трансформаторної оливи θ_m при різних значеннях температури поверхні обмотки $\theta_{об}$.

При розрахунку значень коефіцієнта тепловіддачі (рисунок 2.1 a , b) в формулу (2.6) підставляється модуль перевищення температури $\Delta \theta_p$ між поверхнею обмотки і навколишнім маслом. Тому при рівних значеннях температур θ_m і $\theta_{об}$ коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{об}$ приймає мінімальне значення, так як рівність $\theta_m = \theta_{об}$ приводить до нульового градієнту температури і теплообміну між поверхнею обмотки і рідиною не відбувається. У випадку ж, коли $\theta_m < \theta_{об}$ тепловий потік спрямований від обмотки до рідини, а при $\theta_m > \theta_{об}$ – спрямований в протилежну бік.

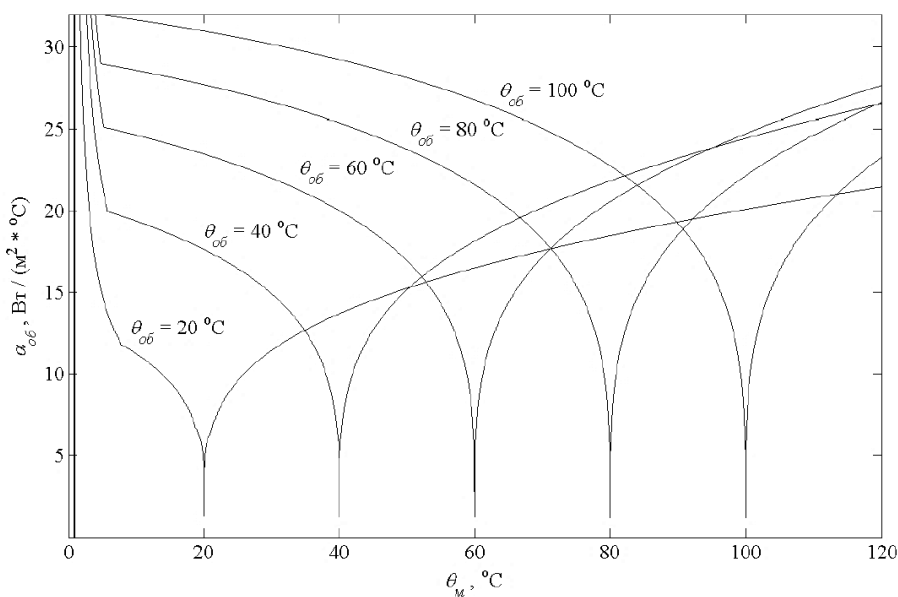
Сімейство кривих $\alpha_{об} = f(\theta_m)$ на рисунку 2.1, a збудовано без обліку коефіцієнта K_M , а на рисунку 2.1, b - з обліком K_M . Як видно, поведінка графіків залежності суттєво різняться в діапазоні значень температури оливи θ_m , коли $\theta_m > \theta_{об}$. На рисунку 2.1 a коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{об}$ не перевищує значення $40 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

На рисунку 2.2 показано сімейство графіків залежності коефіцієнта тепловіддачі з поверхні охолоджуваної обмотки, що має незмінну температуру $\theta_{об} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, при різних швидкостях руху потоку трансформаторної оливи.

Величини коефіцієнта тепловіддачі з примусовому русі потоку оливи, як показано на рисунку 2.2, не опускається нижче $400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ та на порядок вищий, ніж у разі природного процесу теплообміну. Відведення теплоти від нагрітих обмоток тим інтенсивніше, чим швидше нагнітається охолоджувальна рідина. Таким чином, в трансформаторах з природним способом охолодження розсіювання додаткових теплових втрат супроводжується формуванням більш високих значень перевищення температури обмотки над омиваючою її оливою.



a)



б)

Рисунок 2.1 – Сімейство графіків залежності коефіцієнта тепловіддачі при природному процесі теплообміну з поверхні обмотки від температури трансформаторної оливи: *а*) безобліку напряму поширення густини теплового потоку; *б*) з урахуванням напрямку розповсюдження щільності теплового потоку

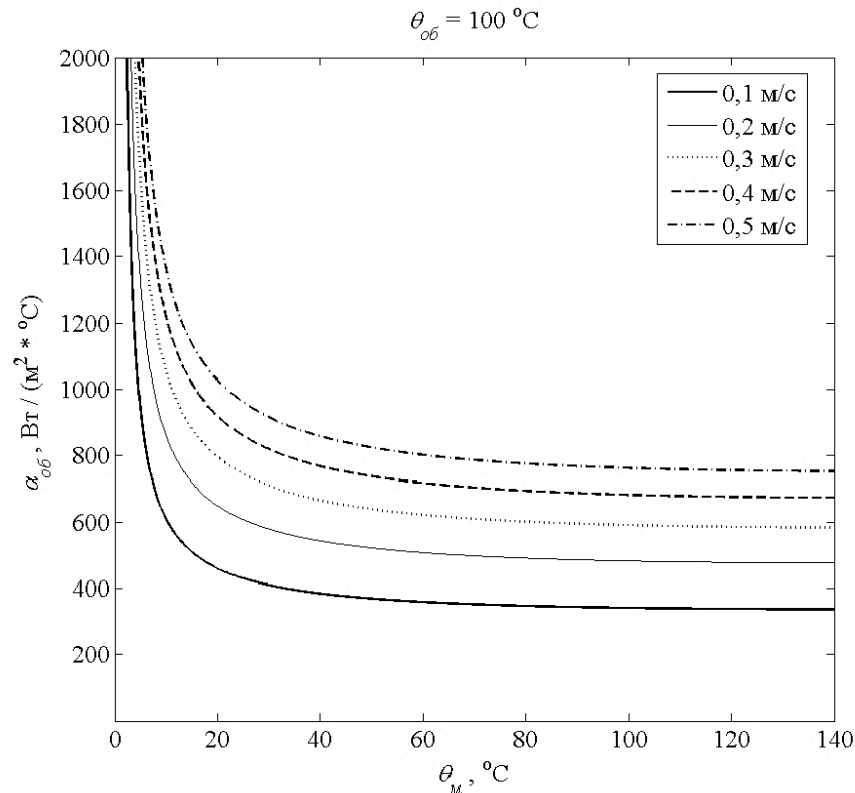


Рисунок 2.2 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі з поверхні обмотки від швидкості потоку який примусово приводить в рух оливу

На рисунку 2.3 показаний поширений спосіб компоновання обмоток на стрижні (фазі) силових трансформаторів. Концентричне розташування обмоток формує осьові канали, всередині яких циркулює масло. Для двообмотувального трансформатора обмотка низького напруги (НН) завжди розташовується всередині обмотки високої напруги (ВН), тому тепловіддача з її поверхні утруднена. У зв'язку з чим, оцінка теплового зносу трансформатора надалі проводиться для міжвіткової ізоляції обмотки НН, визначальною тепловий строк служби трансформатора в цілому.

Згідно виразу (2.3) і по рисунку 2.3 гідравлічний діаметр внутрішнього каналу (між стрижнем і обмоткою ПН) дорівнює, m

$$d_{к.01} = a_{01},$$

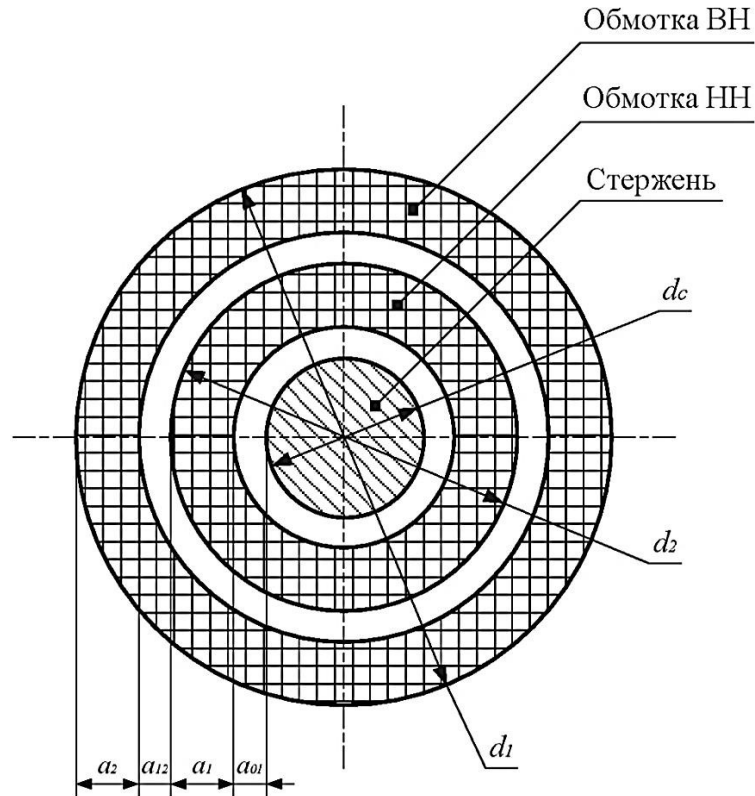


Рисунок 2.3 – Основні розміри при концентричному розташуванні обмоток на стрижні магнітопроводу

для зовнішнього каналу (між обмотками НН та ВН), m

$$d_{к.12} = a_{12}$$

для відкритих поверхонь теплообміну як характерний розмір вибирають висоту або довжину, вздовж якою рухається холодоагент.

У разі конвективного теплообміну зв'язок теплового потоку q_p , $Вт/м^2$ перевищення температури $\Delta\theta_p$, $^{\circ}C$ створюваного цим потоком, встановлюється на підставі закону Ньютона-Ріхмана [19]

$$q_p = \alpha \cdot \Delta\theta_p,$$

де α - коефіцієнт конвективного теплообміну між твердою поверхнею

і рідиною.

З урахуванням формул (2.6), (2.7), (2.9) останнє вираз можна переписати

$$\Delta\theta_p = \left[\frac{l_x}{A \cdot \lambda_p} \cdot \left(\frac{\lambda_p \cdot v_p}{g \cdot \beta_p \cdot c_p \cdot \rho_p \cdot l_x^3} \right)^b \cdot \left(\frac{\lambda_p \cdot c_c \cdot \rho_c \cdot v_c}{c_p \cdot \rho_p \cdot v_p \cdot \lambda_c} \right)^{0,25} \right]^{\frac{1}{1+b}} \cdot q_p^{\frac{1}{1+b}}$$

введемо наступні позначення

$$C_\theta = \left[\frac{l_x}{A \cdot \lambda_p} \cdot \left(\frac{\lambda_p \cdot v_p}{g \cdot \beta_p \cdot c_p \cdot \rho_p \cdot l_x^3} \right)^b \cdot \left(\frac{\lambda_p \cdot c_c \cdot \rho_c \cdot v_c}{c_p \cdot \rho_p \cdot v_p \cdot \lambda_c} \right)^{0,25} \right]^{\frac{1}{1+b}}, \quad x = \frac{1}{b+1},$$

тоді отримаємо (2.16) як показникову функцію в спрощеному вигляді

$$\Delta\theta_p = C_\theta \cdot q^x$$

Також можна виразити коефіцієнт тепловіддачі від густини теплового потоку, якщо з виразу (2.12) з урахуванням (2.13) можна виразити залежність між коефіцієнтом тепловіддачі і щільністю теплового потоку

$$\alpha = \left[\frac{A \cdot \lambda_p}{l_x} \cdot \left(\frac{g \cdot \beta_p \cdot c_p \cdot \rho_p \cdot l_x^3}{\lambda_p \cdot v_p} \right)^b \cdot \left(\frac{c_p \cdot \rho_p \cdot v_p \cdot \lambda_c}{\lambda_p \cdot c_c \cdot \rho_c \cdot v_c} \right)^{0,25} \right]^{\frac{1}{1+b}} \cdot q_p^{\frac{b}{1+b}},$$

Остання формула з обліком прийнятих позначень в (2.14) переписеться

$$\alpha_{об} = C_\alpha \cdot q_{об}^y,$$

де $C_\alpha = C_\theta^{-1}$ - експериментально отримуваний коефіцієнт;

$y = b \cdot x$ - Показник ступеня, що визначається за результатами натурних досліджень.

Перегрів між оливою і внутрішньої поверхнею бака зазвичай не більше 6 °С. Орієнтовне середнє перевищення температури стінки бака трансформатора над навколишнім повітрям обчислюється згідно [56], °С

$$\Delta\theta_{\sigma-\varepsilon} = \left[\frac{1,05 \cdot (\Delta P_{x.x.} + \Delta P_{к.з.})}{2,8 \cdot S_{изл} + 2,5 \cdot S_{кон}} \right]^{0,8},$$

де $\Delta P_{x.x.}$, $\Delta P_{к.з.}$ - втрати холостого ходу (х.х.) і короткого замикання (к.з.) силового трансформатора;

$S_{изл}$, $S_{кон}$ – площа поверхні випромінювання та конвекції для прийнятої конструкції бака трансформатора.

Площі поверхонь випромінювання і конвекції розраховуються у відповідності ності з формою та лінійними розмірами бака та кришки трансформатора. для силових трансформаторів серії ТМ габаритні розміри бака з радіаторами, які мають овальну і прямокутну форми, наведено в таблиці 2.2.

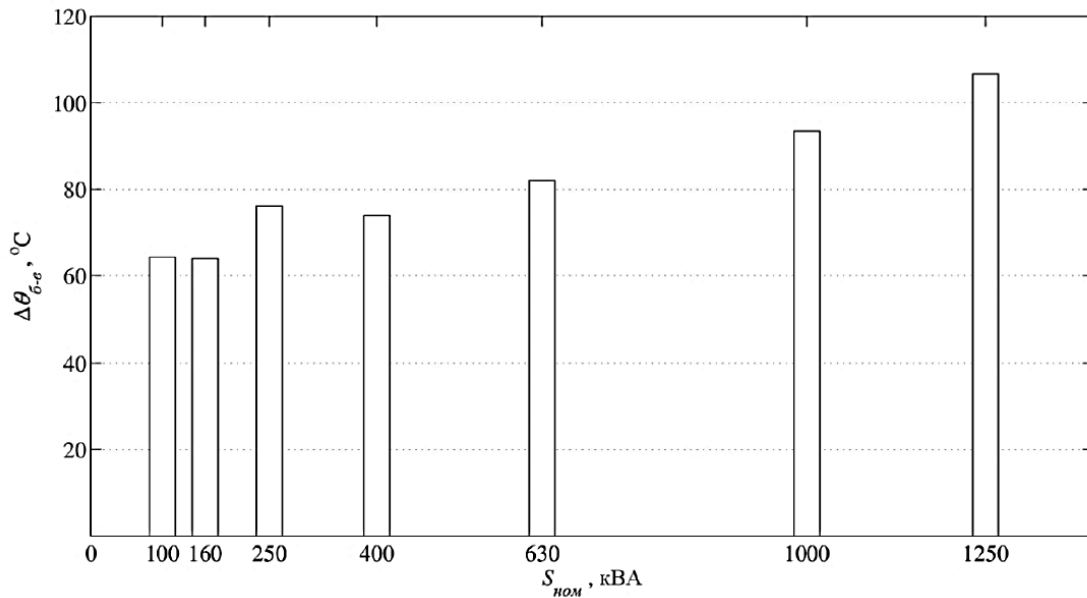
Таблиця 2.2 - Лінійні розміри бака силових трансформаторів серії ТМ

Тип трансформатора	габаритні розміри трансформатора, мм			Відстань між колесами візка, мм
	Довжина	Висота	Ширина	
Бак овальний з радіаторами				
ТМ-100/10	1095	810	645	550
ТМ-160/10	1050	895	810	550
ТМ-250/10	1190	1040	785	550
Бак прямокутний з радіаторами				
ТМ-400/10	1370	1092	920	660
ТМ-630/10	1705	1155	980	820
ТМ-1000/10	1675	1370	1230	820
ТМ-1250/10	1975	1600	1042	820

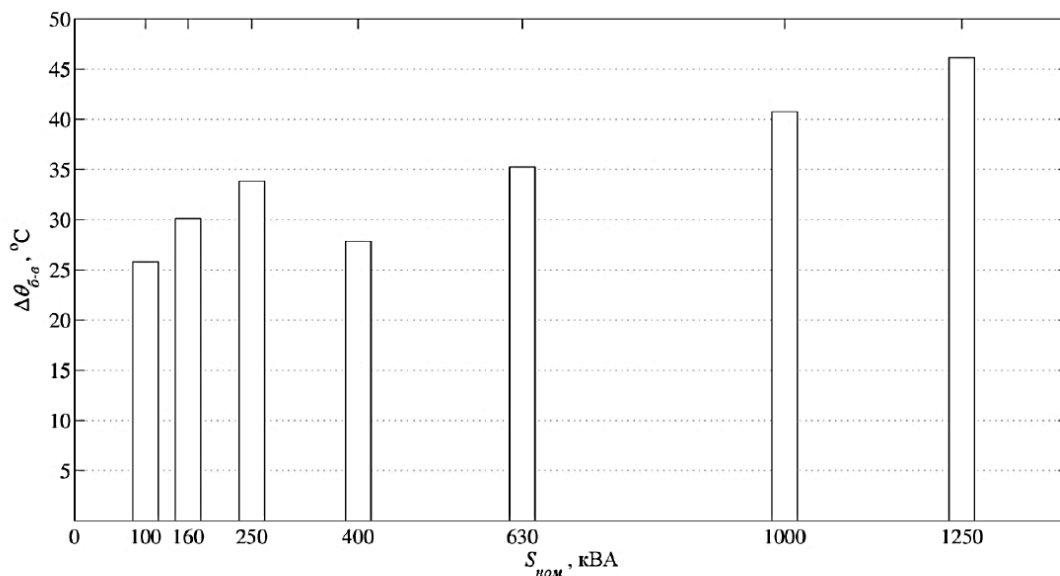
Площа випромінювання визначається зовнішніми поверхнями нагрітого трансформатора, зверненими в навколишнє середовище, так як несе прямоліній характер поширення. Наприклад, для гладкого бака площа поверхні випромінювання дорівнює бічній поверхні цього бака, а для силових трансформаторів з додатковими охолоджувальними пристроями ця поверхня, визначається висотою бака і периметром контуру, який охоплює зовнішні елементи конструкції, а також поверхня кришки бака з урахуванням коефіцієнта її закриття.

Площа конвекції включає в себе нагріті поверхні, які торкаються. з

повітрям. Так, для трансформаторів з $S_{\text{ном}} \leq 40$ кВА, що мають гладкий бак, поверхня тепловіддачі складається з бічної поверхні бака та його кришки з її частковим закриттям. У силових трансформаторів номінальної потужністю $S_{\text{ном}} \geq 100$ кВА (рисунок 2.4, а) поверхні бака стає недостатнім точно для ефективного відведення теплоти, що виділяється, так як $\Delta \theta_{\text{б-в}}$ перевищує допустиме значення 65 °С [61]. Щоб знизити створюване перевищення температури між охолоджуваною поверхнею бака та навколишнім середовищем, вдаються до збільшення поверхні охолодження бака, наприклад, за рахунок монтажу навісних радіаторів (Рисунок 2.4, б).



а)



б)

Рисунок 2.4 – Залежність перевищення температури між зовнішньою поверхнею бака та довкіллям для різних номінальних потужностей силових трансформаторів серії ТМ класу напруг 10/0,4 кВ: *а*) без радіаторів; *б*) з радіаторами

Таким чином, параметри теплового режиму силових трансформаторів сильно залежить від його типорозміру. Результати розрахунку теплового режиму на прикладі силового трансформатора типу ТМ-400/10 при впливі струмів прямої та зворотної послідовності основної частоти та вищих гармонік струму показують, що найбільші перевищення температури в процесі теплообміну силового трансформатора створюються на поверхні між обмоткою та маслом, а також баком і довкіллям.

2.2 Аналіз теплового терміну служби ізоляційних матеріалів, що застосовуються в силових трансформаторах

Матеріали, що застосовуються в електромашинобудуванні, досить вразливі до експлуатаційних факторів, що впливають на ЕО протягом терміну служби. Серед інших чинників домінуючу роль грає температура. Її вплив на електроізоляційні матеріали є комплексним. Зріст температури призводить до прискорення хімічних реакцій між матеріалом ізоляції, внутрішніми його включеннями, навколишнім середовищем, вологою, що сприяє зниженню її електрофізичних властивостей, аж до пробоя ізоляційного проміжку або механічного руйнування.

Сильний вплив на електричну міцність, швидкість старіння дає зміст вологи в паперово-оливній ізоляції ЕО. Відсотковий зміст вологи в масі паперу визначається головним чином її товщиною та температурними умовами. Процес проникнення вологи в паперово-оливну ізоляцію описується рівнянням дифузії згідно з другим законом Фіка [22]. Насичення паперово-оливної ізоляції вологою характеризується постійною часу рівноваги концентрацій.

Постійна часу рівноваги концентрацій τ , г характеризує інтервал часу, за

якого процентний вміст вологи у внутрішніх та зовнішніх шарах паперово-масляної ізоляції незмінний. На рисунку 2.5 наведено розрахункові криві залежності логарифму рівноважної постійної часу від температури для рослинного та мінеральних масел [22].

$$\tau = A_1 \cdot d^2 \cdot \exp(A_2 \cdot \vartheta + A_3 \cdot C_6),$$

де A_1 , A_2 , A_3 - постійні коефіцієнти, значення яких визначаються експериментально для кожного виду оливи;

d - товщина паперу;

ϑ - поточна температура;

C_6 - концентрація вологи, виражена у відсотках від маси паперово-оливної ізоляції.

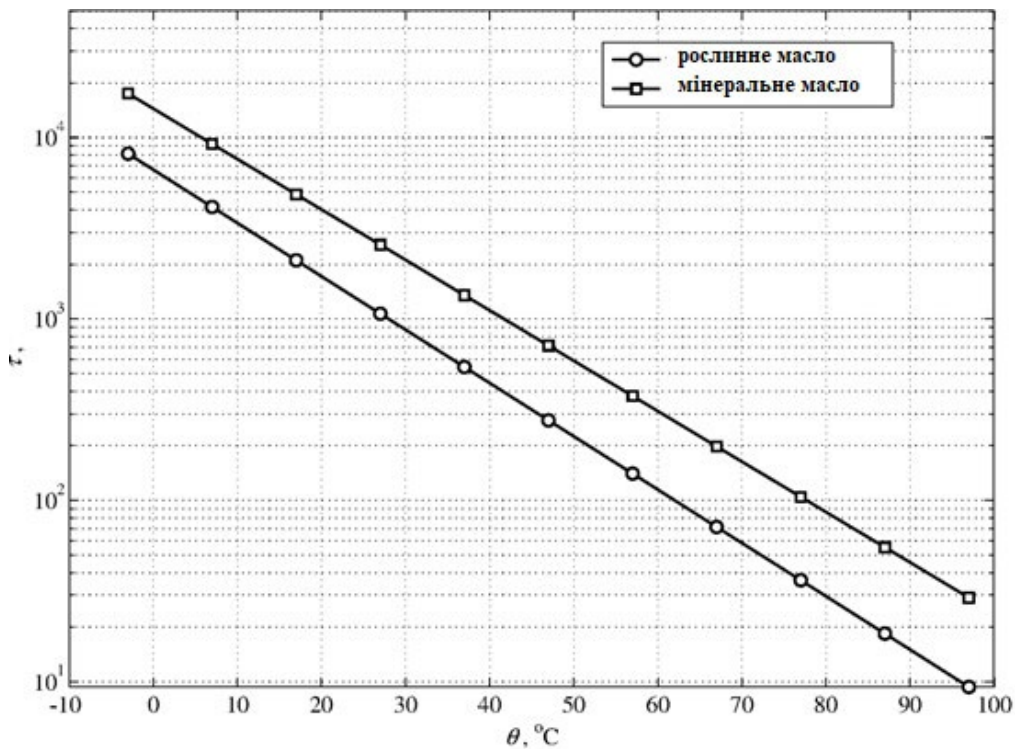


Рисунок 2.5 – Розрахункові графіки $\tau = f(\theta)$ для рослинної та мінеральної олії при $d = 3$ мм і $C_6 = 3,5\%$

Таким чином, з збільшенням експлуатаційної температури швидкість насичення паперово-оливної ізоляції вологою зростає, що згодом наводить до зниження діелектричних властивостей і наступному пробою.

Міжнародною радою з великих електричних систем високого напруги (*фр.* CIGRE) рекомендована формула для обчислення терміну служби t_{cl} , рік полімерної (целюлозної) ізоляції [14, 15]

$$t_{cl} = \frac{\left(\frac{1}{СП_t} - \frac{1}{СП_0} \right)}{D} \cdot e^{\frac{E_A}{R \cdot \theta}},$$

де $СП_t$, $СП_0$ - ступінь полімеризації ізоляційного матеріалу, відповідно її критичне значення, що досягається в момент часу t , початкове значення при t_0 ;

D - постійна величина, яка залежить від хімічного складу полі-мірної ізоляції;

E_A - енергія активації хімічної реакції;

R - універсальна газова постійна;

θ - значення температури.

Величина $СП$ визначається апроксимацією Чендонга [22], *од*

$$СП = \frac{\lg(0,88 \cdot c_{2FAL}) - 4,51}{-0,0035},$$

де e_{2FAL} - концентрація фурфуральдегіду (2FAL) в одиниці маси целюлози. Критична ступінь полімеризації по даними стандарту [22] менше 350 одиниць, так як міцність на розрив матеріалу за даних умов складає 28% від початкового значення. Міцність полімеру визначається кількістю розривів η в ланцюжку молекули целюлози, *од*

$$\eta = \frac{СП_0}{СП_t} - 1,$$

Лабораторні дослідження за методикою МЕК показали, що новий кабельний папір має ступінь полімеризації $СП_0 = (1000-2000)$, тому критично-ське кількість розривів η_k в молекулі полімеру складає

$$\eta_k = \frac{2000}{350} - 1 \approx 5$$

Формула (2.21) записана на підставі емпіричного рівняння Арреніуса, яке узгоджується з викладками теорії активованого комплексу про зв'язок постійної швидкості хімічної реакції k з температурою, при якій ця реакція протікає [21], *рік*

$$k = K \cdot \theta_p^n \cdot \exp\left(-\frac{E_0}{R \cdot \theta_p}\right),$$

де K - постійний коефіцієнт, незалежний від температури;

θ_p - температура в реакторі;

n - показник ступеня температури передекспоненти;

E_0 - потенційний бар'єр.

Зріст експоненційною функції в (2.25) набагато швидше при збільшенні температури, чим зріст передекспоненційного множника, тому останній вираз для обмеженого інтервалу температур можна, можливо переписати слідуєчим чином

$$k = A \cdot e^{-\frac{B}{\theta_p}}$$

Час хімічної реакції t_p величина обернено пропорційна її швидкості k , тоді після перетворення та логарифмування виразу (2.26), одержим

$$\ln(t_p) = -\ln(A) + \frac{B}{\theta_p},$$

де A, B - постійні коефіцієнти, що визначаються з прискорених випробувань на нагрівостійкість по стандарту [19].

На малюнку 2.6 наведено графік Арреніуса на прикладі зразка ізоляційного матеріалу класу нагрівальності A .

З допомогою (2.27) виразимо фактичний термін служби ізоляційного матеріалу через нормативне значення $T_{норм}$, *рік*

$$t_p = T_{\text{норм}} \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{\theta_p} - \frac{1}{\theta_{\text{норм}}} \right)}$$

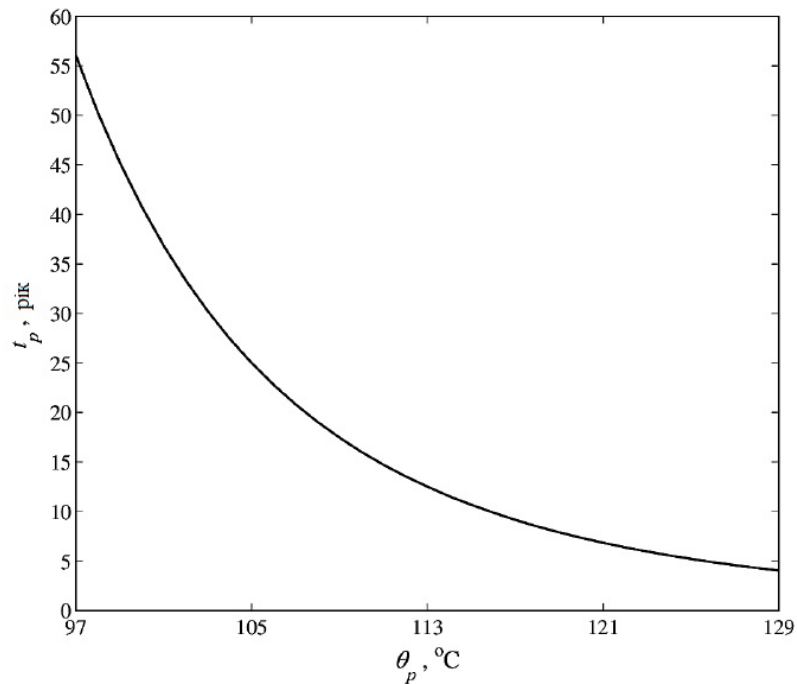


Рисунок 2.6 – Графік Арреніуса для зразка ізоляції класу А із застосуванням восьмиградусного правила при нормативному терміні служби 25 років

Для екстраполяції результатів прискорених випробувань на нагрівальність користуються правилом Монтзінгера: перевищення нормативної температури на кожні $\Delta\theta = 8^\circ \text{C}$ (так зване восьмиградусне правило) скорочує тепловий термін служби ізоляційного матеріалу вдвічі та математично записується за правилом Вант-Гоффа, використовуване в стандарті [20], рік

$$T_\phi = T_{\text{норм}} \cdot 2^{\frac{\theta_{\text{норм}} - \theta_\phi}{\Delta\theta}},$$

де T_ϕ , θ_ϕ – відповідно фактичний тепловий термін служби ізоляції та фактична незмінна температура протягом усього терміну служби ізоляції;

$T_{\text{норм}}$, $\theta_{\text{норм}}$ – відповідно нормативний тепловий термін служби та нормативна температура.

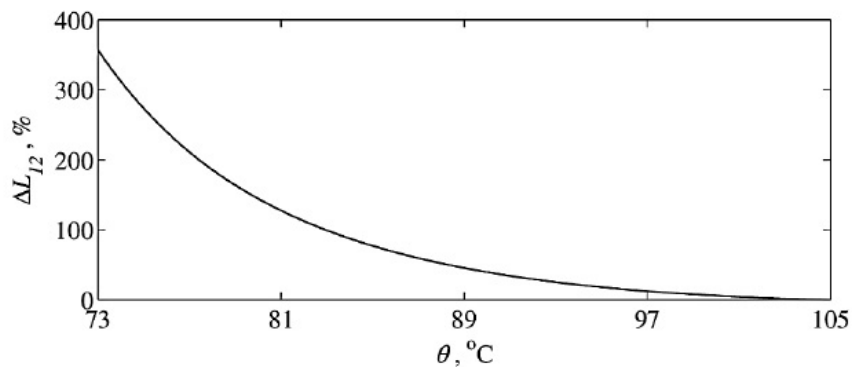
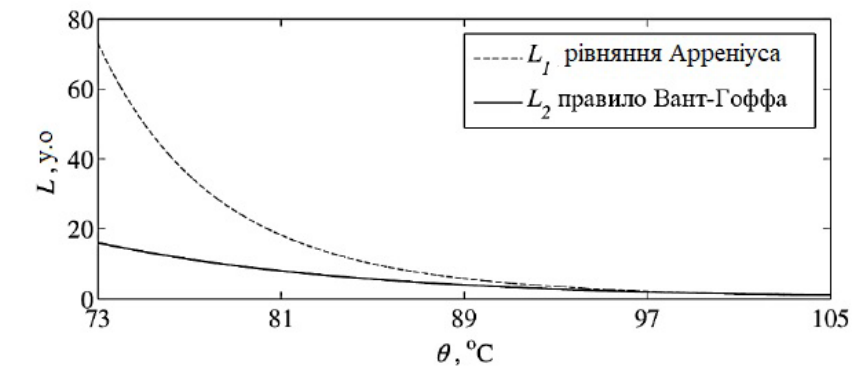
У разі коли фактична температура перевищує нормативне значення на кінцевих проміжках часу експлуатації протягом аналізованого періоду часу, тоді зручніше користуватися величиною відносного терміну служби L по наступному виразу [20]

$$L = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\int_0^{\Delta t_i} e^{B \cdot \left(\frac{1}{\theta(t)} - \frac{1}{\theta_{норм}} \right)} dt \right],$$

де Δt_i – елементарний інтервал часу, протягом якого фактичну температуру $\theta(t)$ можна, можливо прийняти незмінною;

T - досліджуваний період часу.

Важливо мати на увазі, що застосування формул (2.28) та (2.29) для обчислення теплового терміну служби не дає рівнозначного результату. Тому розрахуємо модуль відносної похибки теплового терміну служби між результатами, отриманими за кожною формулою (рисунок 2.7, а та б).



a)

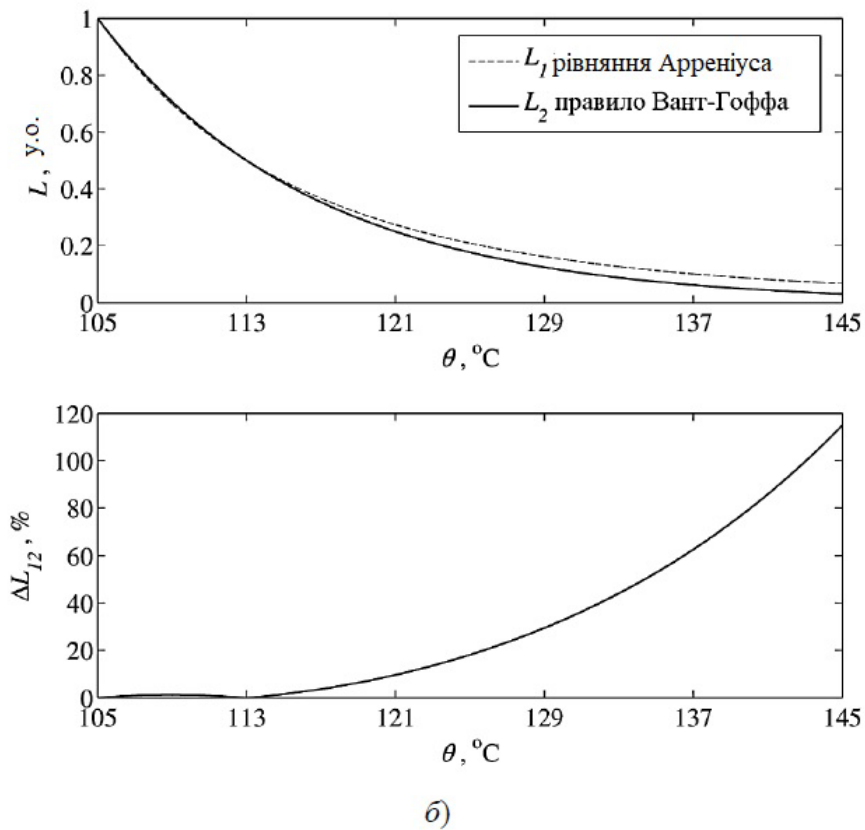


Рисунок 2.7 – Порівняння результатів розрахунку відносного терміну служби за допомогою рівняння Арреніуса і по правилу Вант-Гоффа в діапазоні температур: а) 73–105 °С; б) 105–145 °С

Висновки по другому розділу

У діапазоні температур 97-121 °С відносна похибка знаходиться в досить прийнятних межах не перевищує 12,1%. При значеннях температури нижче 97 °С відносна похибка різко зростає і вже за 81 °С досягає 127,4%. Тому надалі для оцінки теплового терміну служби буде використовуватися рівняння Арреніуса, яке дає найкраще наближення до досвідченим даними [19].

РОЗДІЛ 3

ПРОПОЗИЦІЇ ЩО ДО ПІДТРИМКИ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Скорочення міжремонтного періоду для підтримки безвідмовної роботи силового трансформатора

Для збереження працездатного стану силового трансформатора можна використовувати такі можливі стратегії: скорочувати міжремонтні періоди або покращувати ЕМС у точці підключення. Вибір стратегії вимагає індивідуальної техніко-економічної оцінки для прийняття остаточного рішення.

Так, перша стратегія з одного боку вимагатиме додаткових інвестицій з організації ремонтно-відновлювальних робіт, закупівлі видаткових матеріалів, оплаті праці, але не вимагатиме придбання та обслуговування в експлуатації дорогих фільтро-симетричних пристроїв. У той же час при цьому підході усвідомлено допускається порушена ЕМС.

Друга ж стратегія буде пов'язана з необхідністю купівлі, монтажу, налагодження та збільшення витрат на експлуатацію додаткових технічних засобів щодо підвищення КЕ. В окремих випадках можна розглянути і третю, як одночасне застосування перших двох стратегій.

У публікації [17] запропоновано підхід, який полягає у скороченні міжремонтного періоду при зростаючій функції інтенсивності відмови для підтримання необхідного рівня безвідмовної роботи елементів СЕП. Однак не розкрито причини зростання сумарної інтенсивності відмови, лише рекомендовано закони розподілу, одержані статистичною перевіркою з масивом даних спостереження.

Аналіз несиметричних і несинусоїдальних режимів роботи електрично-ської мережі виробляють за допомогою методів, що дозволяють перейти до накладення симетричних та синусоїдальних лінійних електричних схем заміщення. До таким базовим методам відносяться розкладання в ряд Фур'є [14] та метод симетричних складових (метод Фортеск'ю) [22]. Джерелом

вищих гармонійних складових і несиметрії фазних величин вважаємо комплексне навантаження у вузлах електричної мережі, а елементи СЕП є пофазно лінійними та симетричними. При аналізі КЕ відповідно до [13] розглядаються несиметричні режими лише з основний частоті, але в вищих гармоніках вони не враховуються.

Відповідно до вище викладених припущень, миттєве значення сумарних втрат потужності від протікання струму j -ого фактора будуть розраховуватися для ділянки багатофазної мережі змінного струму по відомому закону Джоуля-Ленца [74, 75], $Вт$

$$\Delta p_{л.Σ} = \sum_1^m i_j^2 \cdot R_{л.j},$$

де m - число фаз;

i_j - миттєве значення струму j -ого фактору нагріву;

$R_{л.j}$ - фазне активний опір струму j -ого фактору нагріву.

Процес нагрівання є інерційним і характеризується постійним часом, що отримується в результаті складання рівняння теплового балансу. У випадку нестационарного нагріву однорідного тіла [64]

$$C_{екв} \cdot d\theta_{\Sigma} + \alpha_{сер} \cdot S_{охол} \cdot \theta_{\Sigma} \cdot dt = \Delta p_{л.Σ} \cdot dt,$$

де $C_{екв}$ - еквівалентна теплоємність тіла яке нагрівається;

θ_{Σ} - сумарна температура тіла яке нагрівається;

$\alpha_{сер}$ - середнє значення коефіцієнта тепловіддачі для охолоджуваної поверхні;

$S_{охол}$ - площа поверхні охолодження.

Сумарна температура θ_{Σ} включає в себе температуру навколишнього середовища θ_0 та перевищення температури $\Delta\theta$ між тілом та середовищем, °С

$$\theta_{\Sigma} = \theta_0 + \Delta\theta$$

Так як зміна температури навколишнього середовища відбувається достатньо повільно, то на інтервалі нагріву вважаємо її величину постійною

$$\theta_0 = const,$$

тоді рівняння (3.2) можна, можливо переписати в наступному вигляді

$$T_\theta \cdot \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = \Delta\theta_{уст},$$

де T_θ - постійна часу нагріву тіла, год

$$T_\theta = \frac{C_{екв}}{\alpha_{ср} \cdot S_{охол}}$$

$\Delta\theta_{уст}$ – усталене значення перевищення температури між тілом яке нагрівається і довкіллям, °C

$$\Delta\theta_{уст} = \frac{\Delta p_{л. \Sigma}}{\alpha_{ср} \cdot S_{охол}} - \theta_0$$

Повне рішення неоднорідного диференціального рівняння (3.4)

$$\Delta\theta = \frac{e^{-\frac{t}{T_\theta}}}{T_\theta} \int_0^t \Delta\theta_{уст} \cdot e^{\frac{t}{T_\theta}} dt + C_{инт} \cdot e^{-\frac{t}{T_\theta}},$$

матиме остаточний вигляд при відомій функції $\Delta\theta_{уст} = f(t)$, яка в свою чергу (2.36) залежить від $\Delta p_{л. \Sigma}$. Постійна інтеграція $C_{инт}$ в останньому рівнянні набуває конкретного значення за початкових умов момент часу $t = 0$.

Розглянемо випадок сталості втрат за цікавий для нас проміжок часу. Для цього необхідно здійснити усереднення безперервно змінюваних в часі втрат $\Delta p_{л. \Sigma} = f(t)$ на аналізованому проміжку Δt , Bm

$$\Delta P_{ср} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \Delta p_{л. \Sigma} dt$$

Підставимо в останню формулу вираз (3.1) і, змінивши місцями знак інтеграла та суми, в результаті отримаємо

$$\Delta P_{ср} = \sum_1^m \left[\left\{ \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} i_j^2 dt \right\} \cdot R_{л. j} \right],$$

після чого переходимо до середньоквадратичного згладжування (діючого значення) j -ого фактора нагріву

$$I_{\partial} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} i_j^2 dt}$$

$$\Delta P_{cep} = \sum_1^m \Delta P_{cp.j}$$

Тоді рішення (3.7) запишеться в наступному вигляді

$$\Delta \theta = \Delta \theta_{уст} - [\Delta \theta_{уст} - \Delta \theta(0)] \cdot e^{-\frac{\Delta t}{T_{\theta}}}$$

Як випливає з (3.12), тепловий режим, що встановився, настане через часовий інтервал $\Delta t \rightarrow \infty$. У практичних розрахунках приймають $\Delta t = 4 T_{\theta}$ коли перевищення температури $\Delta \theta$ становить приблизно 98% від усталеного значення $\Delta \theta_{уст}$ при нульових початкових умовах $\Delta \theta(0) = 0^{\circ} \text{C}$ (рис. 3.1, *a*).

Для порівняння на рисунку 3.1, *a* наведено результати чисельного інтегрування рівняння (3.4) при зміні фактора нагрівання в часі за закону синуса на прикладі, струму промислової частоти, A

$$i_1(t) = I_{1m} \sin(\omega t + \psi)$$

і при постійному вплив гріючого струму, рівного чинному значенням

$$i_2(t) = I_{1\partial} = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}$$

З графіків рисунка 3.1, *a* видно, що траєкторії кривих перехідних процесів нагрівання різні, тому обчислимо модуль відносної похибки розрахунку перевищення температури в течія перехідного процесу по формулі

$$\delta_{12}(\%) = \frac{|\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2|}{\Delta \theta_2} \cdot 100$$

На рисунку 3.1 *б* показана динаміка поведінки відносної похибки. сти δ_{12} (%) в ході перехідного процесу теплового режиму, найбільше значення якої не

перевищує 14 %.

Насправді тепловий процес має випадковий характер. Для використання слідування випадкового теплового процесу перейдемо до аналізу статистичних даних значень факторів нагрівання: струм навантаження, струму вищих гармонік, струму зворотної послідовності, згладжених на інтервалі часу $\Delta t = 4 T_\theta$ за період спостереження.

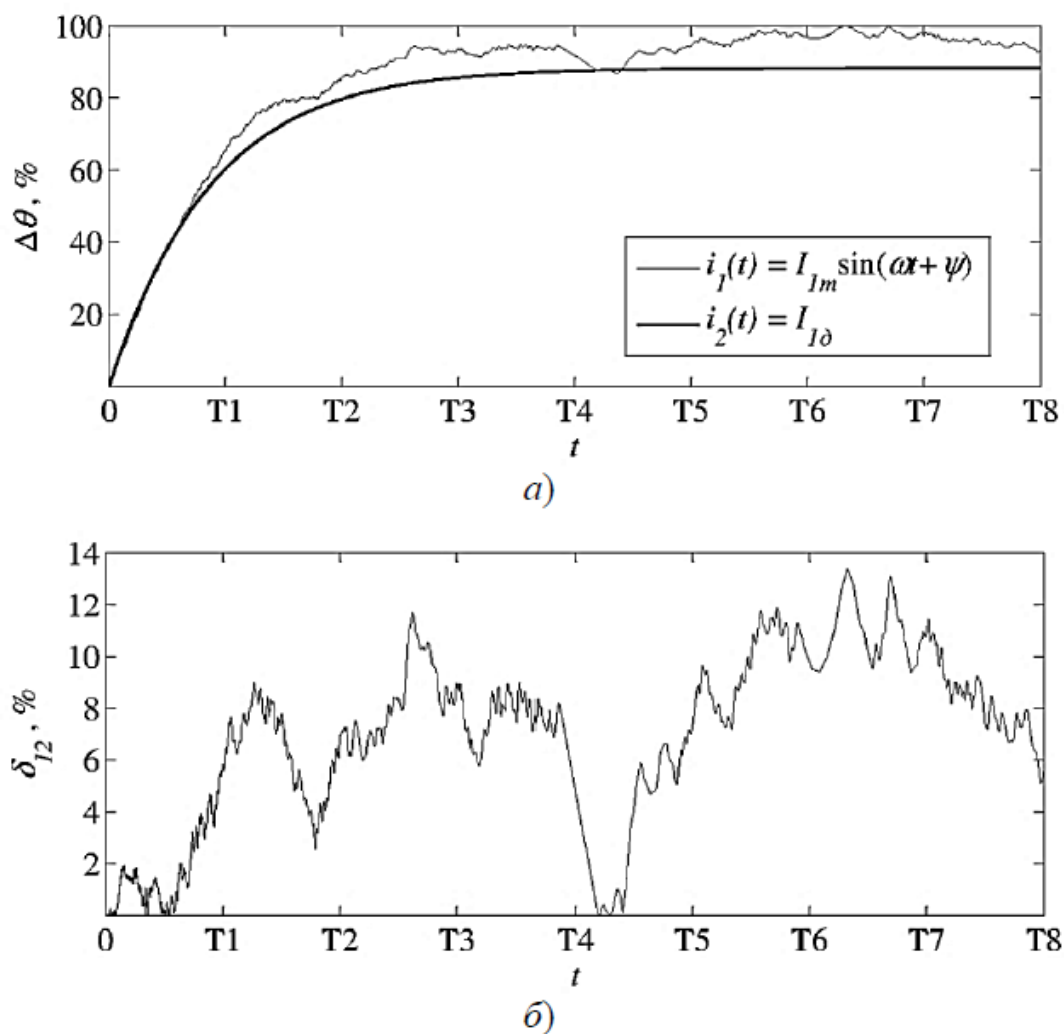


Рисунок 3.1 - Перехідний процес нагріву однорідного тіла:

- а) при впливу струму промислової частоти і його чинного значення;
- б) зміна відносної похибки розрахунку перевищення температури

3.2 Аналіз статистичних даних значень факторів нагрівання

Причинами появи струмів вищих гармонійних складових є ЕП з

нелінійною вольтамперною характеристикою власної провідності, а також вищі гармоніки напруги живлення у вузлах підключення навантаження. Таким чином, статистичну оцінку ПЯЕ необхідно проводити як по струму, так і за напругою.

На підставі отриманих довідникових результатів найбільш придатними параметричними законами розподілу показників якості напруги являються параметричні закони розподілу: нормальний $N(m_j, \sigma_j)$, гамма- розподіл $G(\alpha_j, \beta_j)$, Вейбулла $W(\alpha, \lambda)$, а також непараметричні закони розподілу. Перевірка придатності теоретичних законів проводилася при допомозі критерію згоди χ^2 Пірсона з 5% рівнем значущості. Для полімодальних гістограм застосовується непараметрична щільність розподілу, як ядро якої використовувався нормальний закон розподілу. В подальшому припускаємо, що при спостереженні за поведінкою врахованих ПЯЕ на більш тривалих періодах часу, закон їх розподілу в межі буде прагнути по ймовірності до нормального закону [76]. При розгляді кореляційних зв'язків між випадковими величинами виходитимемо з постійності значень елементів коваріаційної матриці.

При дії кондуктивних перешкод напруги у вузлах навантаження на ЕП, підключені до нього, по них протікають струми, що визначаються повними опорами їх струмоведучих частин. Так, для двообмотувального силового трансформатора втрати від струму навантаження, струмів вищих гармонік і струмів послідовності визначаються по наступним виразам:

- основні втрати в трансформаторі [14]

$$\Delta P_1 = \Delta P_{1x.x.} + K_3^2 \cdot \Delta P_{1k.з.}$$

де $\Delta P_{1x.x.}$ – номінальні втрати в режимі х.х. трансформатора; $\Delta P_{1k.з.}$ – номінальні втрати в режимі к.з. трансформатора; K_3 - коефіцієнт завантаження струмом основної частоти.

$$K_3 = \frac{I_1}{I_{1НОМ}}$$

- додаткові втрати в трансформаторі від протікання струмів зворотній послідовності [75]

$$\Delta P_{2U} = K_{2U}^2 \cdot \left(\Delta P_{1x.x.} + \frac{\Delta P_{1к.з.}}{u_{1к.з.}^2} \right),$$

де K_{2U} - коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності;

$u_{1к.з.}$ - напруга к.з. трансформатора в відносних одиницях.

- втрати від протікання струму n -ої гармонійної складової по обмоткам трансформатора [15, 9]

$$\Delta P_{(n)} = \left(\frac{0,47 \cdot \Delta P_{1к.з.}}{u_{1к.з.}^2} \right) \cdot \left(\frac{K_{U(n)}}{k_{Z(n)}} \right)^2 \cdot (1 + 0,05 \cdot n^2) \cdot \sqrt{n},$$

де $K_{U(n)}$ - коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги;

n - порядковий номер гармоніки;

$k_{Z(n)}$ - кратність повного опору трансформатора на n -ій частоті.

$$k_{Z(n)} = \frac{Z_{(n)}}{Z_{1к.з.}},$$

де $Z_{(n)}$ - повний опір обмоток трансформатора на n -ій частоті [75, 78];

$$Z_{(n)} = \sqrt{(0,47 \cdot \sqrt{n} \cdot R_{1к.з.})^2 + (0,88 \cdot n \cdot X_{1к.з.})^2}$$

$Z_{1к.з.}$ - повний опір обмоток трансформатора на основній частоті.

$$Z_{1к.з.} = \sqrt{R_{1к.з.}^2 + X_{1к.з.}^2},$$

тоді (3.18) перепишеться в наступному вигляді

$$k_{Z(n)} = 0,47 \cdot \sqrt{n} \cdot \sqrt{\frac{1 + 3,506 \cdot n \cdot \text{tg}^2 \varphi_{1к.з.}}{1 + \text{tg}^2 \varphi_{1к.з.}}},$$

де

$$\operatorname{tg} \varphi_{1к.з.} = \frac{X_{1к.з.}}{R_{1к.з.}}$$

Отже, якщо встановилася температура по закону (2.36) то вона буде формуватися в результаті впливу суми факторів нагріву

$$\Delta \theta_{рез} = \frac{1}{\alpha_{ср} \cdot S_{охл}} \cdot \left(\Delta P_1 + \Delta P_{2U} + \sum_n \Delta P_{(n)} \right) - \theta_0$$

На інтервалі робочих температур 80-140 ° С [78] силового трансформатора залежність коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{ср}$ від факторів нагрівання (2.53) можна вважати лінійною. Вважаючи фактори нагріву незалежними випадковими величинами, розподіленими за нормами з параметрами $N(m_j, \sigma_j)$, тоді в загальному вигляді можна записати наступне

$$|F_j| = F_{розр.j} \cdot \sqrt{\frac{\Delta \theta_j}{\Delta \theta_{розр.j}}}$$

де F_j , $\Delta \theta_j$ - фактичне значення відповідно j -ого фактора нагріву і превивищення температури, створюваного їм;

- $F_{розр.j}$, $\Delta \theta_{розр.j}$ - те ж тільки розрахункове значення (наприклад, номінальне).

Густина нормального закону розподілу записується по відомій формулі [19]

$$f(x_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x_j^2}{2}}$$

де x_j - відносне відхилення випадковий величини, виражене в частках її середньоквадратичного відхилення.

$$x_j = \frac{|F_j| - m_j}{\sigma_j}$$

де m_j - математичне очікування j -ого фактору нагріву;

σ_j - середньоквадратичне відхилення j -ого фактору нагріву.

Підставимо вираз (3.24) в (3.26), отримаємо

$$x_j = \frac{F_{розр.j}}{\sigma_j} \sqrt{\frac{\Delta\theta_j}{\Delta\theta_{розр.j}}} - \frac{m_j}{\sigma_j}$$

У практиці імовірно-статистичного моделювання прийнято оцінку розрахункових параметрів виробляти через їх статистичні параметри m і σ

$$F_{розр.j} = m_j + \beta \cdot \sigma_j,$$

де β - коефіцієнт перевищення математичного очікування випадкової величини, котрий визначається із заданою ймовірністю.

Тоді (3.27) з урахуванням (3.28) перепишеться як

$$x_j = \frac{1 + \beta \cdot \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \cdot \sqrt{\frac{\Delta\theta_j}{\Delta\theta_{розр.j}}} - \frac{1}{\varepsilon_j},$$

де ε_j - коефіцієнт варіації j -ого фактору нагріву.

$$\varepsilon_j = \frac{\sigma_j}{m_j}$$

В даному випадку щільність нормального закону розподілу (3.25) є функцією модуля випадкової величини (3.26), тому згідно [19] запишем наступне

$$f(x'_j, x''_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left(e^{-\frac{(x'_j)^2}{2}} + e^{-\frac{(x''_j)^2}{2}} \right),$$

де

$$x'_j = \frac{1 + \beta \cdot \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \sqrt{\frac{\Delta\theta_j}{\Delta\theta_{розр.j}}} - \frac{1}{\varepsilon_j},$$

$$x''_j = -\frac{1 + \beta \cdot \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \sqrt{\frac{\Delta\theta_j}{\Delta\theta_{розр.j}}} - \frac{1}{\varepsilon_j}.$$

Для вище накладеної умови про обмеженість діапазону робочих температур фактичний спрацьований тепловий термін служби ізоляції t_j від дії j -ого фактора нагріву за інтервал часу Δt_j за (2.28) може бути розрахований за спрощеною формулі [19]

$$t_j = \Delta t_j \cdot \exp(-b \cdot \Delta \theta_j),$$

звідки висловимо величину перевищення температури j -ого фактору нагріву $\Delta \theta_j$

$$\Delta \theta_j = \frac{1}{b} \cdot \ln \left(\frac{1}{K_{сл.j}} \right),$$

де $K_{сл.j}$ - кратність збільшення теплового терміну служби ізоляції від впливів j -ого фактору нагріву.

$$K_{сл.j} = \frac{t_j}{\Delta t_j}$$

Отже, система двох рівнянь (3.32) перепишеться як

$$x'_j = \frac{1 + \beta \cdot \varepsilon_j}{\varepsilon_j \cdot \sqrt{b \cdot \Delta \theta_{розр.j}}} \sqrt{\ln \left(\frac{1}{K_{сл.j}} \right)} - \frac{1}{\varepsilon_j},$$

$$x''_j = - \frac{1 + \beta \cdot \varepsilon_j}{\varepsilon_j \cdot \sqrt{b \cdot \Delta \theta_{розр.j}}} \sqrt{\ln \left(\frac{1}{K_{сл.j}} \right)} - \frac{1}{\varepsilon_j}.$$

3.3 Імовірісно-статистична оцінки терміну служби силового ЕО

Для проведення імовірісно-статистичної оцінки терміну служби силового ЕО розглянемо основні показники його надійності

Ймовірність безвідмовний роботи ЕО на інтервалі часу $(0, t)$ визначається по виразу [80]

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda_e(t) dt}$$

де $\lambda_e(t)$ - еквівалентна інтенсивність відмови.

У процесі експлуатації елементи СЕП зазнають впливу різного роду, які у часі несуть раптовий або поступовий характер. Еквівалентна інтенсивність відмови може бути представлена сумою інтенсивності раптових λ_B і поступових λ_{II} відмов

$$\lambda_e(t) = \lambda_B(t) + \lambda_{II}(t)$$

Дуже часто передбачається, що потік раптових відмов підкоряється властивостям потоку Пуассона, тому $\lambda(t) = const$ та поведінка λ_e у часі буде визначатися величиною $\lambda_{II}(t)$.

З перебігом часу поступові відмови мають властивість накопичуватися через відсутність можливості самовідновлення після виникнення одиничного елементарного впливу (наприклад, короткочасного перегріву або механічної вібрації). Тому зручніше оцінювати ймовірність безвідмовної роботи з допомогою кумулятивної інтенсивності поступових відмов $\lambda_K(t)$ на часовому інтервалі $(0, t)$

$$p(t) = e^{-[\lambda_B + \lambda_K(t)]t},$$

де

$$\lambda_K(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \lambda_{II}(t) dt$$

Ймовірність відмови є подія протилежне ймовірності безвідмовної роботи, значить

$$q(t) = 1 - p(t)$$

На рисунку 3.2 побудовані сімейства кривих ймовірності відмови (рисунок 3.2, а) силового трансформатора та кумулятивної інтенсивності відмови (рисунок 3.2, б) в залежності від кратності збільшення терміну служби $K_{сл}$.

З рисунка 3.2, а випливає, що зі зростанням коефіцієнта варіації ε_I основного фактора нагріву – струму навантаження, більшою мірою проявляється тепловий знос від дії кондуктивних перешкод (штрихова лінія).

Ця обставина пояснюється тим, що при ширшому діапазоні зміни струму навантаження додатковий перегрів від струмів вищих гармонік та несиметрії проявляється найбільш виражено в зоні мінімальних значень струму навантаження. Оскільки фактори нагріву, що враховуються, є незалежними випадковими величинами, то зниження струму навантаження та відповідно перевищення температури від його впливу, призводить до збільшення вкладу

в сумарне нагрівання перевищень температури від впливу кондуктивних перешкод і, відповідно, в тепловий знос ізоляції.

У свою чергу, кумулятивна інтенсивність відмови є зростаючою функцією при безперервній експлуатації ЕО (рисунк 3.2, б) і зростає тим швидше, чим менший коефіцієнт варіації j -ого фактору нагріву.

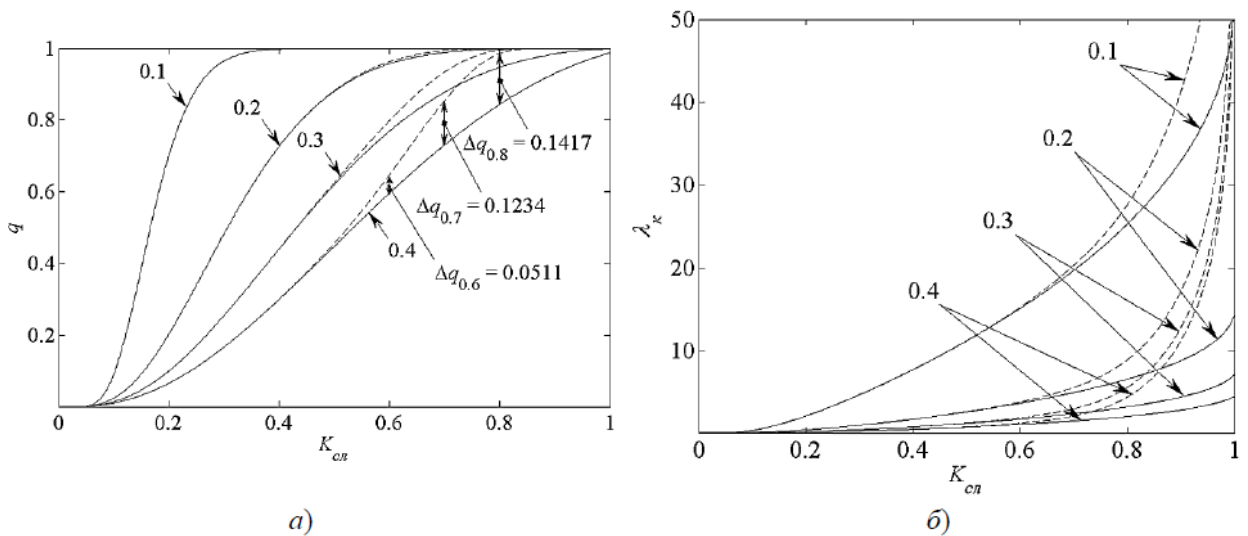


Рисунок 3.2 – Імовірнісні характеристики кратності збільшення терміну служби ізоляції силового трансформатора при різних значеннях коефіцієнта варіації струму навантаження: а) ймовірність відмови q ; б) кумулятивна інтенсивність відмови λ_k

Рисунок 3.3 демонструє поведінку еквівалентної інтенсивності відмов протягом «життя» ЕО, яке після напрацювання половини терміну служби підлягає капітальному ремонту ($K_{sl} = 0,5$). При цьому передбачається його повне відновлення після закінчення ремонтно-відновлювальних робіт або заміни на нове.

По осі ординат на рисунку 3.3 відкладено значення ймовірності безвідмовної роботи, що відповідають певному значенню інтенсивності відмови, розрахованого згідно з виразом (2.67) при $\lambda_e = const$ протягом нормативного терміну служби. Отримані прямі розмежовують бажані або

техніко-економічно обґрунтовані рівні надійності ЕО. Отже, при досягненні встановленого рівня ймовірності безвідмовної роботи, нижче за котрого подальша експлуатація вважається неприпустимою (занадто ризикованою), елемент може бути виведений у ремонт завчасно.

Введемо коефіцієнт впливу, що характеризує час $t_{ПЯЕ}$ протягом котрого ЕО знаходилося під дією погіршеного ЯЕ протягом періоду часу T , який знаходиться по формулі

$$K_{впл} = \frac{t_{ПЯЕ}}{T}$$

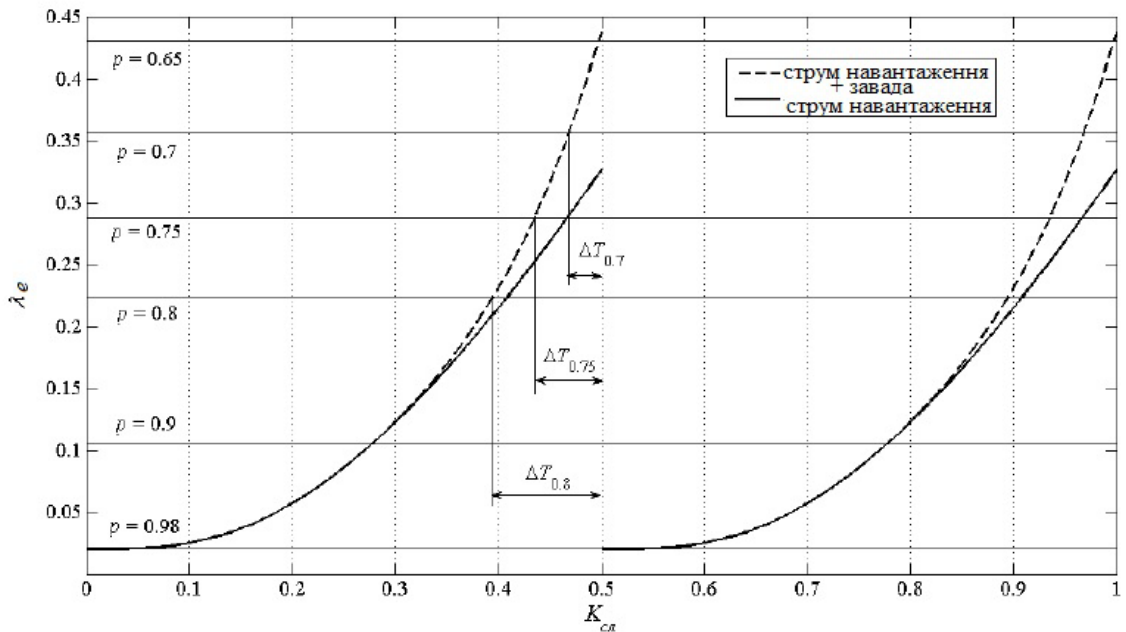


Рисунок 2.11 – Графік залежності еквівалентної інтенсивності відмови силового трансформатора від часу при проведенні капітального ремонту після напрацювання половини нормативного терміну служби

Коефіцієнт, що характеризує скорочення міжремонтного періоду для підтримки необхідного рівня НЕС з урахуванням ЯЕ, обчислимо як відносну різницю між нормативним міжремонтним періодом та його фактичним значенням

$$K_{\tau} = \frac{\tau_{норм} - \tau'}{\tau_{норм}},$$

де τ' - фактичний міжремонтний період;

$\tau_{норм}$ - нормативний міжремонтний період.

Розмір K_τ залежить від великої кількості умов: електромагнітних умов у вузлі підключення ЕО, стратегії експлуатації, завантаження ЕО на основний частоті і таке інше. Як впливає з рисунка 3.3, значення K збільшується з ростом рівня ймовірності безвідмовної роботи.

Також рисунка 3.3 впливає, що скорочення міжремонтного періоду при відпрацюванні 40% нормативного терміну служби ймовірність безвідмовної роботи знижується на 18 %, у той час як за наступні 10 % напрацювання ймовірність безвідмовної роботи знижується вже на 15 % (штрихова лінія).

У зв'язку з чим, скорочення міжремонтного періоду доцільно проводити в останні 10% напрацювання на відмову до проведення капітального ремонту або заміни.

Статистично оцінити коефіцієнт скорочення міжремонтного періоду з обліком коефіцієнта впливу можна наступним чином

$$K_\tau = 1 - \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{K_{впл. i}} \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{\theta_i} - \frac{1}{\theta_{норм}} \right)} \right],$$

де $K_{впл. i}$ - значення коефіцієнта впливу на i -ому інтервалі часу;

θ_i – фактична сумарна температура ізоляції, що діє на i -му інтервалі часу.

На рисунку 3.4 представлена залежність $K_\tau = f(\theta)$ для ізоляції класу нагрівостійкості А з довго допустимою температурою $\theta_{норм} = 105^0$ С при фіксованих значеннях коефіцієнта впливу $K_{впл}$. Щоб знайти максимально допустимий час роботи, виражений у відносних одиницях від нормативного значення, при температурі відмінної від $\theta_{норм}$ необхідно вибрати бажану температуру по осі абсцис та за заданим коефіцієнтом впливу $K_{впл}$ визначити значення K_τ .

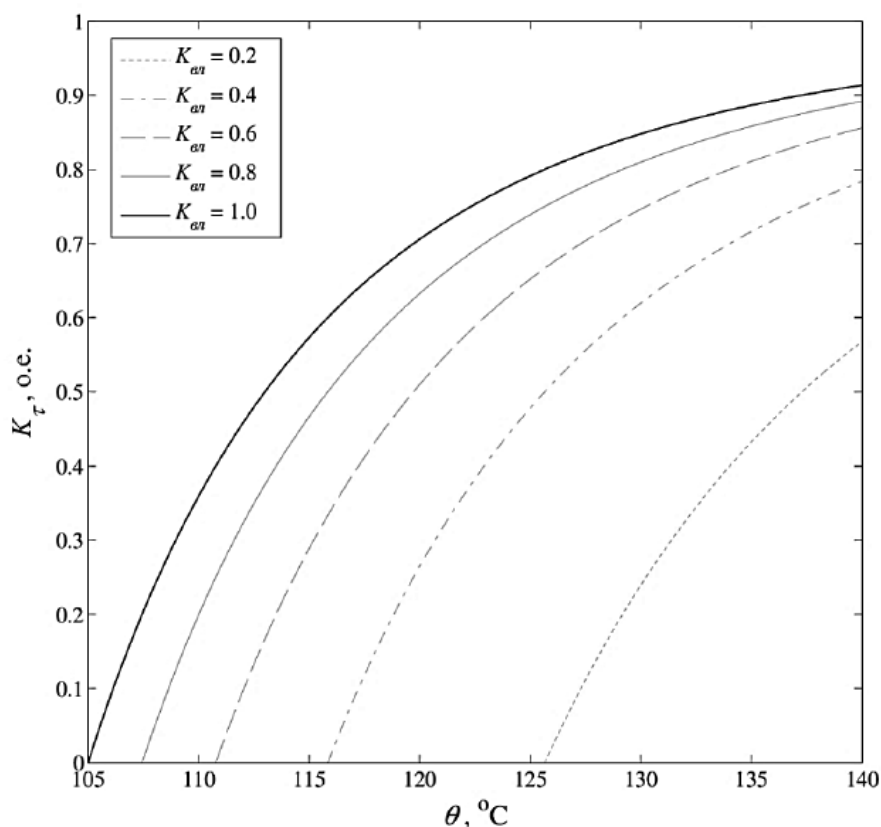


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта скорочення міжремонтного періоду K_τ від температури θ для ізоляції класу А при різних значеннях коефіцієнта впливу $K_{вл}$

Значення K_τ буде залежати від множника перед експонентою у формулі (3.44). Для випадку, наведеного малюнку 3.4, значення K_τ при різних верогідностях безвідмовної роботи силового трансформатора представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Значення коефіцієнта скорочення міжремонтного періоду K_τ при різних значеннях ймовірності безвідмовної роботи трансформатора

$p, \%$	65	70	75	80	90
K_τ	1,01	1,075	1,163	1,282	1,818

Висновки по третьому розділу

У процесі експлуатації силове ЕО піддається різного роду планово попереджувальних ремонтів, технічного обслуговування для

забезпечення якісного та безперебійного електропостачання. Для силових трансформаторів потужністю до 16 МВА та класом напруги до 10 кВ передбачається проведення поточного та капітального ремонтів з періодичністю 3 роки та 12 років відповідно [19]. Поточний ремонт включає роботи без вилучення активної частини з бака і здійснюються на місці експлуатації силового трансформатора. Також проводиться контроль опору ізоляції до початку та після закінчення виконання поточного ремонту. Таким чином, поточний ремонт дозволяє попередити експлуатаційний персонал про зниження рівня ізоляції. ції і вивести трансформатор у позаплановий капітальний ремонт.

ВИСНОВКИ

При роботі силових трансформаторів із погіршеними показниками ЯЕ при дії струмів вищих гармонік та струмів зворотній послідовності встановлено, що:

1) параметри теплового режиму силових трансформаторів головним чином визначаються конструкцією обмоток та бака, способом відведення теплоти від нагрітих поверхонь трансформатора;

2) до додаткового нагрівання найбільш чутливі обмотки масляних силових трансформаторів, які мають природне охолодження в порівнянні із системами охолодження, які передбачають примусову циркуляцію оливи та/або дуття;

3) враховувати додатковий приріст ймовірності відмови трансформатора від теплового впливу ПЯЕ необхідно в тих випадках, коли коефіцієнт варіації струму навантаження $\varepsilon_I \geq 0,3$. Так із зростанням коефіцієнта варіації струму навантаження у діапазоні $\varepsilon_I = (0,2-0,4)$, отриманому за результатом досліджень, ймовірність відмови трансформатора змінюється в наступних межах при: $\varepsilon_I = 0,2 - \Delta q = (0,0018 - 0,0055)$; $\varepsilon_I = 0,4 - \Delta q = (0,0086- 0,1234)$;

4) розроблено алгоритм, який дозволяє розраховувати імовірнісні характеристики технічного стану силового трансформатора, який функціонує з погіршеним ЯЕ;

5) при відпрацюванні 40% від нормативного терміну служби ймовірність безвідмовної роботи знижується на 18 %, у той час як за наступні 10 % нароботи можливість безвідмовної роботи знижується вже на 15%. Звідси слід-дує, що скорочення міжремонтного періоду доцільніше виробляти в останні 10% напрацювання на відмову до проведення капітального ремонту чи планової заміни. Так, скорочуючи міжремонтний період на $\Delta T_p = 10\%$ ймовірність безвідмовної роботи p зростає на 8,7%; при скороченні на $\Delta T_p = 20\%$ p зростає на 16,8%; при скороченні на $\Delta T_p = 30\%$ p вік- танає на 25,4 %; при скороченні на $\Delta T_p = 40\%$ p зростає на 37,8%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кизим М. О., Лелюк О. В. Аналіз стану електроенергетичного сектора України //БІЗНЕСІНФОРМ № 2 '2020 www.business-inform.net
2. Кирик В.В. Рибка О.О. Аналіз стану та технічної відповідності електричних мереж ОЕС України вимогам ENTSO-E //Гідроенергетика України, 3—4/2021, ISSN 1812-9277
3. СОУ НЕК стандарт підприємства 20.261:2018 Технічна політика ДП "НЕК"УКРЕНЕРГО" у сфері розвитку та експлуатації магістральних та міждержавних електричних мереж. [Текст] .– Київ: 2018. – 119 с.
4. Дар К.Е. Статистические данные по аварийности энергетического оборудования распределительных устройств 220 кв и выше / К.Е. Дар, В.Н. Таран //Вісники НТУ ХП. – 2010.– Вісник № 45.– С. 111- 115.
5. Плешков П. Г. Організація системи моніторингу силових трансформаторів / П. Г. Плешков, В. Ф. Мануйлов, І. В. Савеленко // Наукові записки : зб. наук. пр. - Кіровоград : КНТУ, 2010. - Вип. 10, ч. 2. - С. 250-255.
6. Філімоненко Н. М., Філімоненко К. В. Аналіз надійності енергосистем із огляду на наявність в їхньому складі силових трансформаторів//Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля № 5 (269) 2021
7. <https://ua-energy.org/uk/posts/minenerhetyky-61-obladnannia-ta-495-linii-elektromerezh-spratsiuvalo-svii-resurs>
8. Богачов В.С. Підвищення якості енергії у мережах електроживлення споживачів //ЕЛЕКТРО. 2011. № 1. - С. 47-51.
9. Карташев І.І., Тульський В.М. та ін. Управління якістю електроенергії. - М.: МЕІ, 2008. - 354 с.
10. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
11. Глобальні проекти Smart Grid. Доповідь Європейської комісії // Енергоексперт. 2011 року. № 5. - С. 104-108.

12. Олешко Т. І., Савельєва Д. О. Сучасний стан і перспективи розвитку нового ринку електроенергії в Україні //БІЗНЕСІНФОРМ № 3 '2020 www.business-inform.net

13. Юлія Бровкіна. Як багато економіка втрачає на якості електроенергії? // Енергоринок. 2013. № 10 (115).

14. Фокін Ю.А., Туфанов В.А. Оцінка надійності систем електропостачання. - М.: Енергоиздат, 1981. - 224 с.

15. Ілюшин П.В., Догадкін Н.І. Шляхи підвищення надійності роботи та зниження витрат на експлуатацію силових трансформаторів 6–220 кВ у розподільчих мережах // Енергоексперт. 2012. №5.

16. Kezunovic M., Popovic T., Sevcik D.R., Chitambar A. Automated fault analysis using advanced information technology for data integration and information exchange (USA) : B5-102 // CIGRÉ, 2004. – 8 p.

17. IEEE Std C57.110-2008. Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.

18. Фокін Ю.А., Файницький О.В., Дементьєв Ю.А., Алієв Р.С. Розвиток принципів оцінки структурно-функціональної надійності різних об'єктів електроенергетичних систем // Вісник МЕІ. 1999. № 1. - С. 55-59.

19. Карташев І.І., Фокін Ю.А. Методи оцінки надійності складних електричних систем // Електрика. 1991. № 6.

20. Фокін Ю.А., Алієв Р.С., Туманін А.Є., Файницький О.В. Розрахунок показників надійности в електроенергетичних системах за зміни їх комутаційних станів // Вісник МЕІ. 1997. № 1. - С. 73-77.

21. Дульнев Г.М. Теорія тепло- та масообміну. - СПб: НДУ ІТМО, 2012. - 195 с.

22. Jean Philibert. One and a Half Century of Diffusion : Fick, Einstein, before and beyond // Journal for the Basic Principles of Diffusion Theory, Experiment and Application. 2005. № 2. – 10 p.

23. Jian Li, Zhaotao Zhang, Stanislaw Grzybowski and Yu Liu. Characteristics of Moisture Diffusion in Vegetable Oil-paper Insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation: Vol. 19. 2012. № 5. – P. 1650-1656.