

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Одеський національний політехнічний університет

Конограй Сергій Петрович

УДК 621-311.52

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС ДІАГНОСТИКИ ТА
НЕПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ
ПОТУЖНИХ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ**

05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Рассальський Олександр Миколайович ;

доктор технічних наук, професор
Андрієнко Петро Дмитрович,
завідувач кафедри електричних та електронних
апаратів Запорізького національного технічного
університету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Пуйло Гліб Васильович,
професор кафедри електричних машин
Одеського національного політехнічного
університету

кандидат технічних наук, доцент
Прус В'ячеслав В'ячеславович,
доцент кафедри електричних машин та апаратів
Кременчуцького національного університету імені
Михайла Остроградського

Захист відбудеться «04» грудня 2015 р. о 14 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 41.052.05 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1, адмін. корпус, ауд. 400-а.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий «03» листопада 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент

А. М. Якімець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Потужні силові автотрансформатори (АТ) є одними з основних і найдорожчих апаратів високовольтних електричних мереж. Одним з основних параметрів, що обмежує режими роботи АТ, є нагрівання його елементів, яке обумовлено активними втратами потужності. Тому від ефективності та надійності роботи системи охолодження АТ залежить надійність роботи АТ в цілому. В умовах сучасного розвитку електроенергетичної галузі все більше уваги приділяється автоматизованим комплексам діагностики та неперервного контролю (СНК), використання яких дозволяє підвищити ефективність експлуатації АТ за рахунок можливості визначення поточного технічного стану АТ у режимі експлуатації та виявлення дефектів на ранньому етапі їхнього виникнення. Таким чином, СНК дозволяють забезпечити можливість переходу від застарілої системи періодичного регламентного обслуговування обладнання до системи обслуговування за його поточним технічним станом.

Значний внесок у розробку науково-технічних основ автоматизованого діагностування та неперервного контролю АТ та їхніх підсистем зробили такі вітчизняні та закордонні вчені: Рассальский О.М., Лучко А.Р., Русов В.О., Соколов В.В., Мордкович А.Г., Алексеєв Б.О., Стогній Б.С., Денисюк С.П., Овсянніков А.Г., Львов М.Ю., Сопель М.Ф., Поляков М.О., Залізний Д.І., Широков О.Г., Duval M., Tenbohlen S., Tylavsky D., Amoda O., Susa D., Radakovic Z. та інші. До основного недоліку існуючих СНК необхідно віднести використання в алгоритмах діагностики системи охолодження АТ стандартних методик, що базуються на ряді спрощень і параметрах середньостатистичних АТ, які знижують точність визначення діагностичних параметрів і, як результат, достовірність діагностики. Визначені положення обумовлюють актуальність науково-практичного завдання – наукове обґрунтування, розробка та впровадження СНК системи охолодження потужних АТ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедр «Електричні та електронні апарати» та «Електропостачання промислових підприємств» Запорізького національного технічного університету, співпадає з напрямом науково-виробничої діяльності підприємства ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя) і відповідає діючій державній науково-технічній програмі «Ресурс», затвердженій Постановою КМУ від 08.10.2004 №1331.

Мета і задачі дослідження. Наукове обґрунтування і створення автоматизованого комплексу діагностики та неперервного контролю системи охолодження потужних АТ, який дозволяє у режимі експлуатації виявляти несправності та дефекти у системі охолодження на ранньому етапі їхнього виникнення та попереджати їхній розвиток. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі розв'язано наступні задачі:

1. Аналіз існуючих розробок та формулювання питань, які залишилися невирішеними.

2. Визначення діагностичних параметрів потужного АТ, що дозволяють у режимі експлуатації виявляти та попереджати несправності у його системі охолодження.

3. Вдосконалення методу автоматизованої діагностики стану системи охолодження потужних АТ для використання в експлуатаційних умовах.

4. Розробка та перевірка адекватності теплової математичної моделі (ТММ) АТ для визначення розрахункової температури масла, що враховує нелінійність природи теплообміну в АТ та здатної налаштуватися на поточний режим роботи системи охолодження АТ.

5. Розробка методу ідентифікації параметрів ТММ з використанням результатів прямих вимірів від автоматизованих комплексів діагностики.

6. Визначення основних вимог до апаратної та програмної частини СНК системи охолодження потужних АТ, розробка, впровадження в експлуатацію, аналіз отриманих результатів, розробка практичних рекомендацій.

Об'єкт дослідження — теплові процеси у потужних АТ при зміні їхнього поточного технічного стану.

Предмет дослідження — методи та засоби діагностики й неперервного контролю системи охолодження потужних АТ у складі автоматизованих комплексів.

Методи дослідження — вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань досягнуто з використанням наступних методів: теоретичних основ електротехніки й математичного моделювання – при побудові теплової математичної моделі АТ, цифрової обробки сигналів – при обробці експериментальних даних від СНК *SAFE-TTM*, стохастичної оптимізації та статистичної обробки даних – при ідентифікації параметрів ТММ АТ, чисельних методів – при розв'язанні систем рівнянь теплообміну, динамічного оцінювання стану – при визначенні технічного стану системи охолодження.

Всі дослідження в роботі виконані з використанням програмних продуктів Scilab v.5.5.2 (Ліцензія CeCiLL), Statistica[®] for Windows v.6.0 (Ліцензія AXXR71D833214), комп'ютерної програми «Автоматизована система еволюційного синтезу й оптимізації нейромережових моделей», що розроблена на кафедрі програмних засобів Запорізького національного технічного університету. Експериментальні дані отримані з використанням СНК *SAFE-TTM*, виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя) зі своїм оригінальним програмним забезпеченням, розробленим при особистій участі дисертанта.

Наукова новизна й основні положення, які виносяться на захист.

1. Дістала подальшого розвитку теорія діагностування системи охолодження потужних АТ для застосування в СНК, яка відрізняється одночасним урахуванням: діагностичних параметрів окремих елементів АТ, інтегрального нагріву АТ з порівнянням безпосередньо вимірної та

розрахованої температури масла, концентрації розчинених у маслі газів та вологовмісту, що забезпечує підвищення достовірності виявлення дефектів.

2. Вдосконалено ТММ потужного АТ, яка відрізняється урахуванням: нелінійності теплових опорів елементів АТ, теплових параметрів конкретної одиниці АТ, поточного режиму роботи системи охолодження АТ, що забезпечує можливість визначення в режимі експлуатації розрахункової температури масла з точністю, достатньою для автоматизованої діагностики системи охолодження АТ.

3. Вперше запропоновано використання в СНК системи охолодження потужних АТ удосконаленого виразу для теплових опорів елементів АТ, який відрізняється ступеневу функцією залежності від перевищення температури елемента АТ над охолоджуючим середовищем, що забезпечує урахування нелінійної природи теплообміну в АТ та можливість налаштування на поточний режим роботи системи охолодження у режимі експлуатації.

4. Вперше запропоновано метод ідентифікації параметрів удосконаленої ТММ АТ, який відрізняється використанням безпосередніх вимірів СНК, результатів заводських випробувань АТ та застосуванням стохастичних методів оптимізації – генетичних алгоритмів та імітації відпалу і забезпечує достатню для діагностування системи охолодження точність розрахунку температури масла за ТММ при різних режимах роботи системи охолодження.

Практична цінність роботи для електроенергетичної галузі:

– розроблено метод визначення розрахункової температури масла потужних АТ з використанням безпосередніх вимірів температури повітря, струму навантаження АТ та режиму роботи системи охолодження, що враховує нелінійність природи теплообміну у АТ і дозволяє підвищити точність визначення розрахункової температури масла для цілей діагностики системи охолодження АТ;

– розроблено алгоритм автоматизованого виявлення дефектів у системі охолодження АТ у неперервному режимі експлуатації, який дозволяє формувати керуючі впливи на АТ з урахуванням граничних теплових режимів експлуатації, що забезпечує підвищення надійності експлуатації АТ;

– розроблено інформаційну побудову СНК системи охолодження АТ, яка заснована на використанні промислового комп'ютера з операційною системою реального часу в якості головного пристрою збору, обробки та зберігання даних, що забезпечує автономність зберігання діагностичної інформації на твердотільному накопичувачі за весь нормований термін служби АТ;

– запропоновано використання отриманих в дисертації технічних рішень для розробки комплексного СНК основного високовольтного електротехнічного обладнання підстанцій 110–750кВ, який дозволить: оцінювати технічний стан обладнання в автоматичному режимі, вчасно виявляти виникаючі дефекти, експлуатувати обладнання з урахуванням виявлених технічних й експлуатаційних обмежень, оптимізувати роботу служб диспетчерського керування та ремонту;

– наведені в дисертаційній роботі науково-обґрунтовані рішення, методи та алгоритми використані під час розробки та створення СНК *SAFE-T*TM (виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація», м. Запоріжжя), яка встановлена на підстанції 750кВ «Ленінградська» Північно-Західних магістральних електричних мереж ВАТ «ФСК ЕЭС» (Російська Федерація); проводяться подальші впровадження таких систем на підстанціях 220–750 кВ в Україні та за кордоном, загальна кількість трансформаторного обладнання, контрольованого СНК *SAFE-T*TM, перевищує 200 одиниць.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, які є в дисертації, отримані здобувачем самостійно, здобувач брав участь у розробці апаратної та програмної частини СНК, у її впровадженні, налагодженні та аналізі результатів впровадження. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, безпосередньо дисертанту належить: [1] – аналіз нормативної бази і оцінка ефективності форм діагностики обладнання; [2] – розробка і розв’язання системи диференціальних рівнянь теплообміну чисельними методами; [3] – розробка методології аналізу результатів роботи СНК АТ; [5] – розробка концепції комплексного підходу до діагностики високовольтного обладнання та переліку критеріїв оцінки стану силових масляних трансформаторів і АТ; [7] – аналіз принципів утворення води в маслі та розробка методу визначення коефіцієнтів розчинності води у маслі; [8] – розробка удосконаленої теплової моделі АТ та метода визначення параметрів моделі; [9], [10], [11] – розробка структури системи моніторингу, опис функцій і алгоритмів взаємодії наступних її елементів: блоку прийому інформації від первинних датчиків, блоку обробки та архівування даних, блоку розрахунку параметрів математичних моделей; [12] – аналіз та визначення переваг неперервного контролю перед періодичними випробуваннями; [13] – аналіз методів неперервного контролю й діагностичних критеріїв оцінки технічного стану силових трансформаторів і АТ; [14] – розробка структурної схеми технічного діагностування обладнання; [15] – розробка методології діагностування силових АТ у СНК *SAFE-T*TM.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися здобувачем та обговорювалися на 13 науково-технічних заходах, серед них: XI Міжнародна науково-технічна конференція «Електромеханічні системи, методи моделювання й оптимізації» (м. Кременчук, 2009 р.); XII; семінар «Современные методы диагностики оборудования электрических сетей 220–750кВ» (м. Москва, 2009 р.); Міжнародний симпозіум «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія й практика (SIEMA’2007, SIEMA’2008, SIEMA’2009, SIEMA’2010, SIEMA’2011)» (м. Харків, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 рр.); VII Міжнародна науково-технічна конференція ТРАВЭК «Силловые трансформаторы и системы диагностики» (м. Москва, 2010 р.); IX Міжнародна науково-технічна конференція ТРАВЭК «Силловые трансформаторы и системы диагностики» (м. Москва, 2012 р.); X Міжнародна науково-технічна

конференція ТРАВЭК «Силловые трансформаторы и системы диагностики» (м. Москва, 2013 р.); науковий міжкафедральний семінар у Запорізькому національному технічному університеті (м. Запоріжжя, 2015 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Електротехнічні та комп'ютерні системи: теорія і практика» (м. Одеса, 2015 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, у тому числі: 8 статей у наукових фахових виданнях, що включені до переліку МОН України, з них 2 статті у виданні, що входить до науково-метричної бази РІНЦ, 2 статті у виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз Index Copernicus International, Ulrich's Periodical Directory, Google Scholar, РІНЦ; 1 стаття у виданні, що не входить до переліку МОН України; 3 тези доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій; 3 патенти на винахід, з них 2 закордонних.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел із 158 найменуваннями та 9 додатків. Загальний обсяг роботи 239 сторінок. Основний текст викладено на 140 сторінках друкованого тексту, містить 38 рисунків, 35 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, наведені відомості про наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, дані щодо апробацій та публікацій результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих методів діагностування стану силового трансформаторного обладнання (ТрО), за результатами якого показано, що на сьогоднішній день найбільш ефективним засобом підвищення надійності експлуатації ТрО є впровадження СНК, що відповідає сучасній концепції розвитку інтелектуальних енергосистем (Smart Grid).

Проведено аналіз системи охолодження силового АТ як об'єкту діагностування, до основних елементів якого належать: радіатор, вентилятори циркуляції повітря (для типу охолодження "Д"), пласкі поворотні затвори, шафа автоматичного керування охолодженням, первинні датчики (що беруть участь у керуванні охолодженням – датчики температури, струму навантаження).

Показано, що основним діагностичним параметром, який визначає технічний стан та ефективність роботи системи охолодження є температура масла. Порівняння вимірної температури масла з розрахунковою, дозволяє виявляти аномальні перегріву АТ, які обумовлені внутрішніми дефектами АТ або несправністю його системи охолодження. Визначення розрахункової температури масла засновано на непрямих методах математичного моделювання нестационарних теплових процесів у ТрО. При цьому, точність розрахунку впливає на своєчасність і вірогідність виявлення дефектів, тобто на результати діагностування. Критично проаналізовані роботи провідних вчених

в галузі неперервної діагностики системи охолодження ТрО. Існуючі методи мають ряд недоліків, що знижують достовірність визначення розрахункової температури масла АТ, серед них: використання стандартних методик, що базуються на спрощеннях і теплових параметрах середньостатистичних одиниць ТрО, значення яких, як правило, відомі з малою точністю й тільки для номінального режиму роботи системи охолодження ТрО; відсутнє комплексне діагностування системи охолодження з урахуванням внутрішніх дефектів АТ.

У розділі представлено аналіз існуючих СНК ТрО, які є найбільш розповсюдженими у країнах СНД та ЄС. Загальною особливістю вказаних СНК є практично ідентичні алгоритми обробки й інтерпретації діагностичної інформації у частині контролю системи охолодження ТрО, які базуються на використанні нормативно-технічної документації, заснованій на спрощених ТММ, що знижують достовірність діагностування.

За результатами проведеного у розділі аналізу визначені основні завдання, вирішення яких наведено в подальших розділах. Запропоновано розробку: вдосконаленої ТММ АТ та методу ідентифікації її параметрів, методу та алгоритмів діагностування системи охолодження АТ у режимі експлуатації, програмно-апаратної складової СНК, практичних рекомендацій.

У другому розділі розглянуто основні функції, структуру та алгоритми роботи СНК системи охолодження потужних АТ.

СНК побудована за ієрархічною концепцією з використанням трьох рівнів:

1-й рівень представлений первинними датчиками (аналоговими, цифровими), приладами, вимірювальними системами, які розташовуються на АТ й забезпечують формування первинної діагностичної інформації (наприклад, температури масла, робочого струму навантаження, газомовологовмісту масла).

2-й рівень представлений блоком, що забезпечує виконання наступних завдань в автоматичному режимі: одержання інформації від пристроїв 1-го рівня, обробка й тривале зберігання (більше 30 років) первинної діагностичної інформації на твердотільному диску промислового комп'ютера, встановленого у блоці, забезпечення передачі інформації на 3-й рівень.

3-й рівень представлений пристроєм зв'язку та автоматизованим робочим місцем (АРМ) оператора й забезпечує: інформаційний обмін з 2-м рівнем; обробку, зберігання й візуалізацію діагностичної інформації по АТ; надання можливості передачі діагностичної інформації в сторонні системи.

Визначено напрямки вдосконалювання методології діагностування системи охолодження потужних АТ за рахунок:

1. Використання розрахункової температури масла при порівнянні її з фактично вимірюваною – з метою виявлення аномальних перегрівів АТ, обумовлених внутрішніми дефектами АТ.

2. Контролю стану виконавчих механізмів та елементів системи охолодження, включаючи визначення відпрацьованого ресурсу.

3. Виявлення причин перегрівів АТ, не пов'язаних з несправністю системи охолодження – за рахунок неперервного контролю концентрації розчинених у маслі горючих газів і вологи, що дозволяють виявляти внутрішні дефекти АТ.

Температура масла є інтегральним критерієм теплової оцінки стану АТ. Порівняння розрахункової температури масла з вимірюваною дозволяє виявити аномальні перегріву АТ. Для можливості використання в діагностичних цілях і виключення формування помилкових діагностичних висновків, визначення розрахункової температури масла має бути виконане з точністю не гірше $\pm 2^\circ\text{C}$.

Нехай $v_M(t)$ – перевищення виміряної температури масла АТ над розрахунковою температурою. Тоді:

$$\mathcal{G}_M(t) = \theta_{\text{ВИМІР.}}(t) - \theta_{\text{РОЗРАХ.}}(t) - |\Delta\theta_M|, \quad (1)$$

де $\theta_{\text{ВИМІР.}}(t)$, $\theta_{\text{РОЗРАХ.}}(t)$ – відповідно виміряна та розрахована за ТММ температура масла АТ, $^\circ\text{C}$; $\Delta\theta_M$ – максимальна абсолютна похибка визначення розрахункової температури масла, яка дорівнює $\pm 2^\circ\text{C}$.

Ідентифікація режиму аномального нагрівання АТ відбувається за виконання наступної умови:

$$\mathcal{G}_M(t) > 2^\circ\text{C}. \quad (2)$$

З урахуванням наявних недоліків методів визначення розрахункової температури масла, викладених у стандартах ДСТУ 3463-96 та ІЕС 60076-7, показано необхідність розробки уточненої ТММ АТ, що враховує нелінійність природи теплообміну в АТ, теплові параметри конкретного АТ та здатної автоматично налаштовуватись на поточні режими роботи системи охолодження, які постійно змінюються, що характерно для потужних АТ.

Показано метод виявлення та локалізації несправного радіатора системи охолодження, що заснований на аналізі перепаду температури масла на вході/виході радіатора за наступними критеріями:

1. Аналізу динаміки зниження перепаду температури з одночасним порівнянням результатів для різних радіаторів однієї одиниці АТ.

2. Порівнянні абсолютного значення перепаду температури для рівноцінних радіаторів різних фаз (баків) однофазних АТ, що працюють у трифазній групі, що є загальноприйнятим технічним рішенням для потужних АТ. Різниця температур більш ніж 2°C між однотипними одиницями АТ, що мають схожі умови експлуатації (струм навантаження та температура навколишнього середовища), може бути ознакою порушення роботи системи охолодження.

3. Порівнянні абсолютного значення перепаду температури з характерними значеннями для даного типу системи охолодження: для «М» – 9°C , для «Д» – 15°C . Відхилення від зазначеного значення більш ніж на 2°C є ознакою можливої несправної роботи радіатора.

Крім інтегральної оцінки теплового стану АТ, у роботі наведено актуальність і метод неперервного контролю елементів системи охолодження: електродвигунів вентиляторів (контроль струму навантаження та його залежності від режиму роботи системи охолодження) та складових елементів шафи автоматичного керування охолодженням. Також показано діагностичну цінність параметрів трансформаторного масла у виявленні внутрішніх дефектів АТ (наприклад, місцевих перегрівів, розрядної активності, іскріння контактів), що викликають його аномальне нагрівання, оскільки всі процеси, що відбуваються в АТ, розвиваються в масляному середовищі і залишають у ньому свої сліди. Відомо, що кожному виду дефекту відповідає певний набір і співвідношення газів, які розчиняються у маслі. За результатами проведеного дослідження обрано два параметри з найбільшою питомою діагностичною вагою – вологовміст масла та концентрація газів, розчинених у маслі.

Розроблено алгоритм визначення стану системи охолодження та рівня аномального перегріву АТ в неперервному режимі експлуатації (рис. 1), що одночасно враховує:

- різницю вимірюваної та розрахункової температури масла та її аналіз за абсолютним значенням для уточнення рівня аномального перегріву АТ;
- перепад температури масла на вході/виході радіатора та її порівняння з іншими радіаторами того самого АТ чи інших фаз (при однофазному виконанні обладнання);
- поточний технічний стан елементів системи охолодження та аналіз відповідності поточного стану елементів режиму роботи системи охолодження;
- концентрацію розчинених у маслі газів і вологи.

Характерне значення перепаду температури масла на вході/виході радіатора $\Delta\theta_{px}$ залежить від поточного режиму роботи системи охолодження (9°C або 15°C). Значення припустимих відносних швидкостей зростання концентрації газів V_{zd} та вологовмісту масла V_{vd} прийнято 10%/міс.

У третьому розділі розглянуто й вирішено завдання визначення розрахункової температури масла потужного АТ, що засновано на розробці уточненої ТММ АТ та методу ідентифікації параметрів моделі із використанням масивів вимірювань СНК та результатів заводських теплових випробувань АТ.

Як відомо, основну роль у теплообміні масляного АТ відіграють конвективний теплообмін та випромінювання. З урахуванням цього, у роботі розглянуто обидва способи теплопередачі.

Конвективний теплообмін, який пов'язаний з рухом охолоджуючого середовища, є нелінійним і залежить від ряду параметрів: фізичних властивостей охолоджуючого середовища (густини, теплоємності, теплопровідності, в'язкості, температури та швидкості переміщення); розмірів і властивостей охолоджуваної поверхні (температури, геометричної форми, розташування).

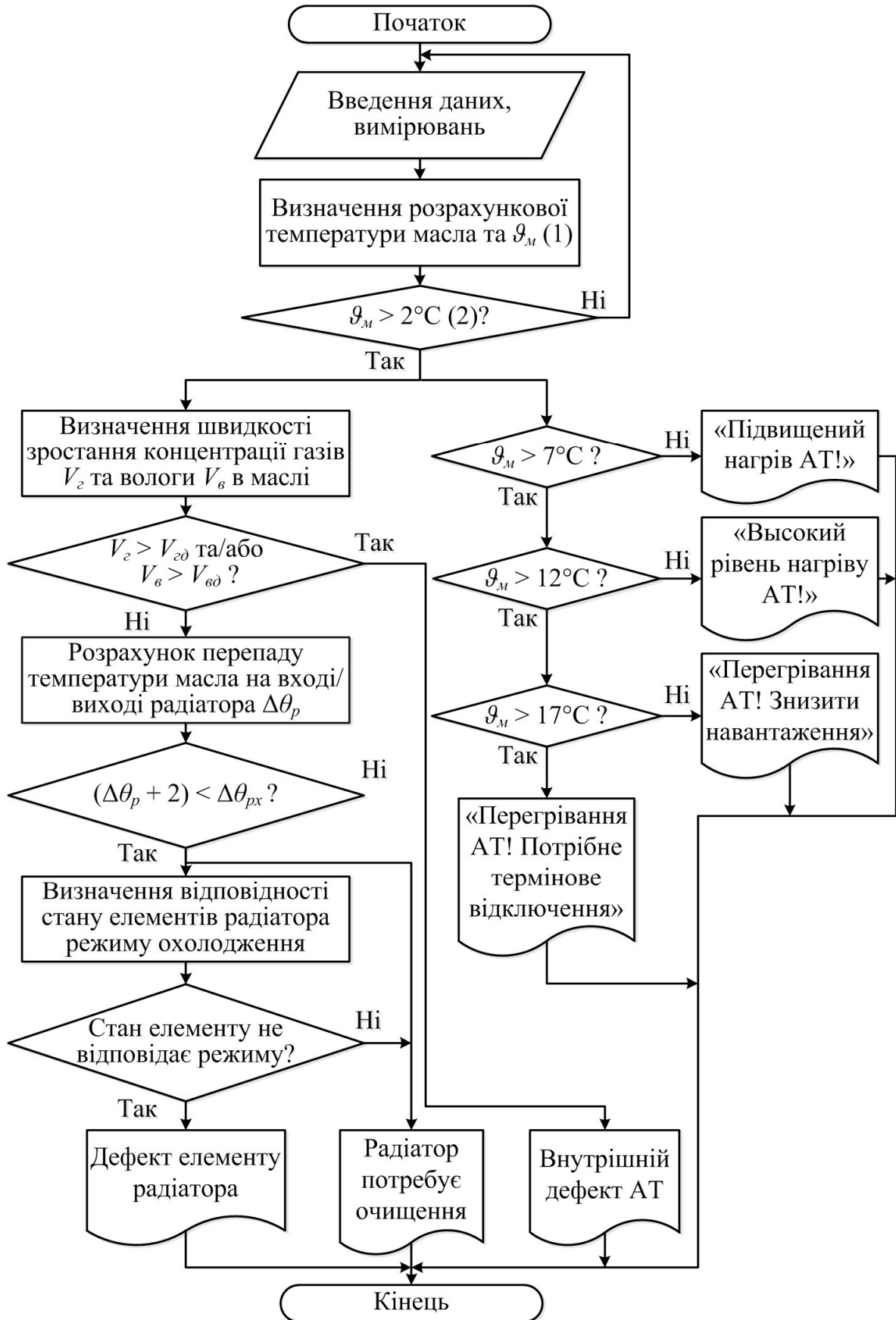


Рис. 1 – Схема алгоритму визначення стану системи охолодження та рівня аномального перегріву АТ в неперервному режимі експлуатації

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням залежить від температури повітря, перепаду температури між поверхнею та повітрям, кольору фарби та властивостей поверхні та ін. Таким чином, тепловіддача випромінюванням також є нелінійною. З метою одержання залежності коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією та випромінюванням від перевищення температури охолоджуваної поверхні над температурою охолоджуючого середовища $\Delta\theta$, обґрунтовано вибір апроксимуючої функції коефіцієнта тепловіддачі α на користь степеневі:

$$\alpha(\Delta\theta) = \gamma \cdot \Delta\theta^\beta, \quad (3)$$

де γ – коефіцієнт пропорційності, Вт/(м²·К ^{$\beta+1$}); β – показник ступеня перевищення температури поверхні тіла.

З урахуванням (3), отримано залежність теплового опору від перевищення температури:

$$R_{th} = \frac{1}{F \cdot \gamma \cdot \Delta\theta^\beta}, \quad (4)$$

де F – площа поверхні, через яку проходить тепловий потік, м².

Після перетворень отримано вираз залежності теплової провідності від перевищення температури:

$$\Lambda_{th}(\Delta\theta) = \varepsilon \cdot \Delta\theta^\beta, \quad (5)$$

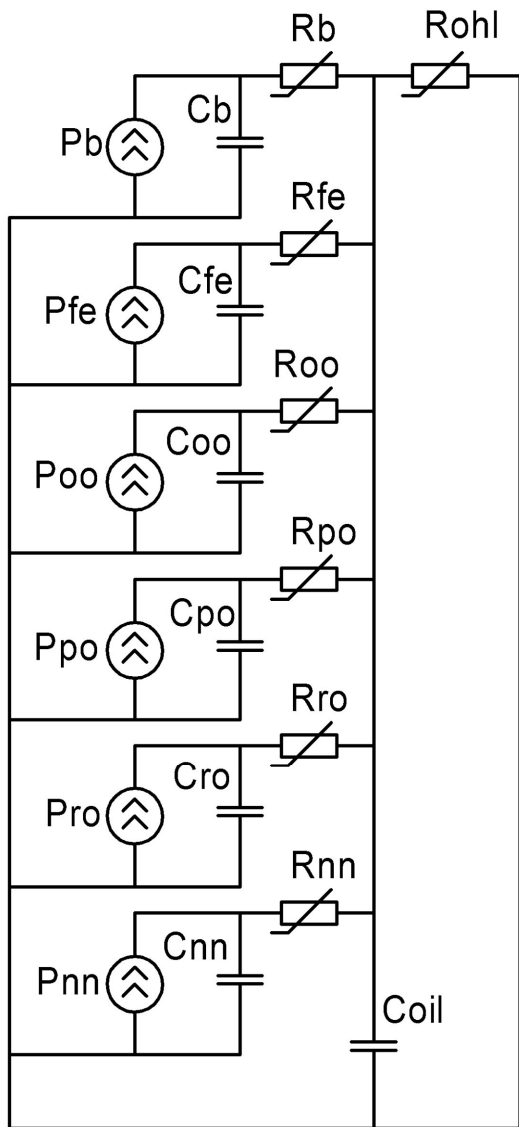
де $\varepsilon = F \cdot \gamma$ – коефіцієнт пропорційності, Вт/К ^{$\beta+1$} .

Незважаючи на те, що масляний АТ не є однорідним тілом, при розробці ТММ АТ кожна з обмоток, магнітна система, бак, а також масло розглянуті незалежно як суцільні однорідні тіла, в яких або виділяється теплота, або воно нагрівається за рахунок надходження теплоти від інших тіл.

В якості об'єкту моделювання обрано однофазний автотрансформатор типу АОДТН-333000/750/330-У1 (виробництва ПАО «Запоріжтрансформатор»), який встановлено на магістральній підстанції 750кВ «Ленінградська» Північно-Західних магістральних електричних мереж ВАТ «ФСК ЕЭС» (Російська Федерація). АТ призначений для зв'язку електричних мереж 750кВ та 330кВ. Вид системи охолодження досліджуваного АТ – комбінована «М/Д» з природною циркуляцією масла, яка може працювати у двох режимах:

1. Із природною циркуляцією повітря, з вимкненими вентиляторами (режим «М») – при струмі навантаження АТ до 60% від номінального.
2. Із примусовою циркуляцією повітря за допомогою вентиляторів (режим «Д») – при струмі навантаження АТ більше 60% від номінального.

З урахуванням нелінійності теплових опорів елементів АТ, особливостей конструкції АТ, розроблено еквівалентну теплову заступну схему АТ для аналізу перехідних теплових процесів (рис. 2).



P_i – теплові втрати в елементах;
 C_i – теплоємності елементів;
 R_i – нелінійні теплові опори;
 b – бак (внутрішня поверхня);
 fe – магнітна система;
 oo – загальна обмотка;
 po – послідовна обмотка;
 ro – регульовальна обмотка;
 nn – обмотка низької напруги;
 oil – трансформаторне масло;
 ohl – радіатори та бак (зовнішн.).

Рис. 2 – Еквівалентна теплова заступна схема АТ для аналізу перехідних теплових процесів

З використанням теплової заступної схеми (рис. 2) розроблено систему однорідних диференціальних рівнянь (6) у звичайному вигляді з урахуванням наступних параметрів, що змінюються в часі:

- температури елементів АТ та охолоджуючого середовища (масла, повітря);

- коефіцієнту навантаження;

- теплових опорів між елементами АТ і маслом, а також між маслом і повітрям (приймаючи до уваги залежність опорів від зміни перевищень температур елементів).

Для можливості використання розробленої уточненої ТММ АТ (6) необхідне попереднє визначення невідомих параметрів C_i , ε_i , β_i . (загалом 21 параметр для кожного режиму роботи системи охолодження).

В дисертації вперше запропоновано метод ідентифікації параметрів розробленої ТММ АТ, який засновано на використанні масивів реальних вимірів СНК із застосуванням стохастичних методів оптимізації – еволюційних алгоритмів та алгоритму імітації відпалу.

Задачу оптимізації у дисертаційній роботі виконано з використанням комп'ютерної програми «Автоматизована система еволюційного синтезу та оптимізації нейромережових моделей», що розроблена на кафедрі програмних засобів Запорізького національного технічного університету.

Експериментальні дані отримано з використанням СНК *SAFE-T*TM зі своїм оригінальним програмним забезпеченням.

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{d}{dt}\theta_b(t) = \frac{1}{C_b} \cdot (K(t)^2 \cdot P_b - \varepsilon_b \cdot (\theta_b(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_b+1}) \\
\frac{d}{dt}\theta_{fe}(t) = \frac{1}{C_{fe}} \cdot (P_{fe} - \varepsilon_{fe} \cdot (\theta_{fe}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{fe}+1}) \\
\frac{d}{dt}\theta_{oo}(t) = \frac{1}{C_{oo}} \cdot (K(t)^2 \cdot P_{oo} - \varepsilon_{oo} \cdot (\theta_{oo}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{oo}+1}) \\
\frac{d}{dt}\theta_{po}(t) = \frac{1}{C_{po}} \cdot (K(t)^2 \cdot P_{po} - \varepsilon_{po} \cdot (\theta_{po}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{po}+1}) \\
\frac{d}{dt}\theta_{ko}(t) = \frac{1}{C_{ko}} \cdot (K(t)^2 \cdot P_{ko} - \varepsilon_{ko} \cdot (\theta_{ko}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{ko}+1}) \\
\frac{d}{dt}\theta_{ro}(t) = -\frac{1}{C_{ko}} \cdot \varepsilon_{ro} \cdot (\theta_{ro}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{ro}+1} \\
\frac{d}{dt}\theta_{nn}(t) = \frac{1}{C_{nn}} \cdot (K(t)^2 \cdot P_{nn} - \varepsilon_{nn} \cdot (\theta_{nn}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{nn}+1}) \\
\frac{d}{dt}\theta_{oil}(t) \cdot C_{oil} = \dots \\
\dots = \frac{1}{C_{oil}} \cdot \left(\begin{array}{l}
\theta_b(t) \cdot \varepsilon_b \cdot (\theta_b(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_b} + \theta_{fe}(t) \cdot \varepsilon_{fe} \cdot (\theta_{fe}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{fe}} + \dots \\
\dots + \theta_{oo}(t) \cdot \varepsilon_{oo} \cdot (\theta_{oo}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{oo}} + \theta_{po}(t) \cdot \varepsilon_{po} \cdot (\theta_{po}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{po}} + \dots \\
\dots + \theta_{ko}(t) \cdot \varepsilon_{ko} \cdot (\theta_{ko}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{ko}} + \theta_{ro}(t) \cdot \varepsilon_{ro} \cdot (\theta_{ro}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{ro}} + \dots \\
\dots + \theta_{nn}(t) \cdot \varepsilon_{nn} \cdot (\theta_{nn}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{nn}} + \theta_{air}(t) \cdot \varepsilon_{ohl} \cdot (\theta_{oil}(t) - \theta_{air}(t))^{\beta_{ohl}}
\end{array} \right) - \dots, \\
\dots - \frac{\theta_{oil}(t)}{C_{oil}} \cdot \left(\begin{array}{l}
\varepsilon_b \cdot (\theta_b(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_b} + \varepsilon_{fe} \cdot (\theta_{fe}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{fe}} + \dots \\
\dots + \varepsilon_{oo} \cdot (\theta_{oo}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{oo}} + \varepsilon_{po} \cdot (\theta_{po}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{po}} + \dots \\
\dots + \varepsilon_{ko} \cdot (\theta_{ko}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{ko}} + \varepsilon_{ro} \cdot (\theta_{ro}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{ro}} + \dots \\
\dots + \varepsilon_{nn} \cdot (\theta_{nn}(t) - \theta_{oil}(t))^{\beta_{nn}} + \varepsilon_{ohl} \cdot (\theta_{oil}(t) - \theta_{air}(t))^{\beta_{ohl}}
\end{array} \right)
\end{array} \right. \quad (6)$$

де $\theta_i(t)$ – миттєві значення температур елементів, °С; t – час, с; C_i – теплоємності елементів, Дж/К; $K(t)$ – миттєве значення коефіцієнту навантаження, в.о.; P_i – теплові втрати в елементах, Вт; $R_i(t)$ – миттєві значення теплових опорів, К/Вт; $\theta_{air}(t)$ – миттєві значення температури навколишнього повітря, °С.

Цільова функція оптимізації представлена в наступному вигляді:

$$f = \sum_{k=1}^N (\theta_{oil}(k) - \theta_{oil.meas}(k))^2, \quad (7)$$

де k – номер групи вимірних параметрів СНК; N – загальна кількість груп параметрів; $\theta_{oil}(k)$, $\theta_{oil.meas}(k)$ – відповідно змодельована за тепловою моделлю (6) і виміряна СНК температура масла АТ, °С.

Для розв'язання (6) у роботі застосовано чисельний метод Рунге-Кутта з фіксованим кроком у програмному пакеті «Scilab v.5.5.2 CeCILL license».

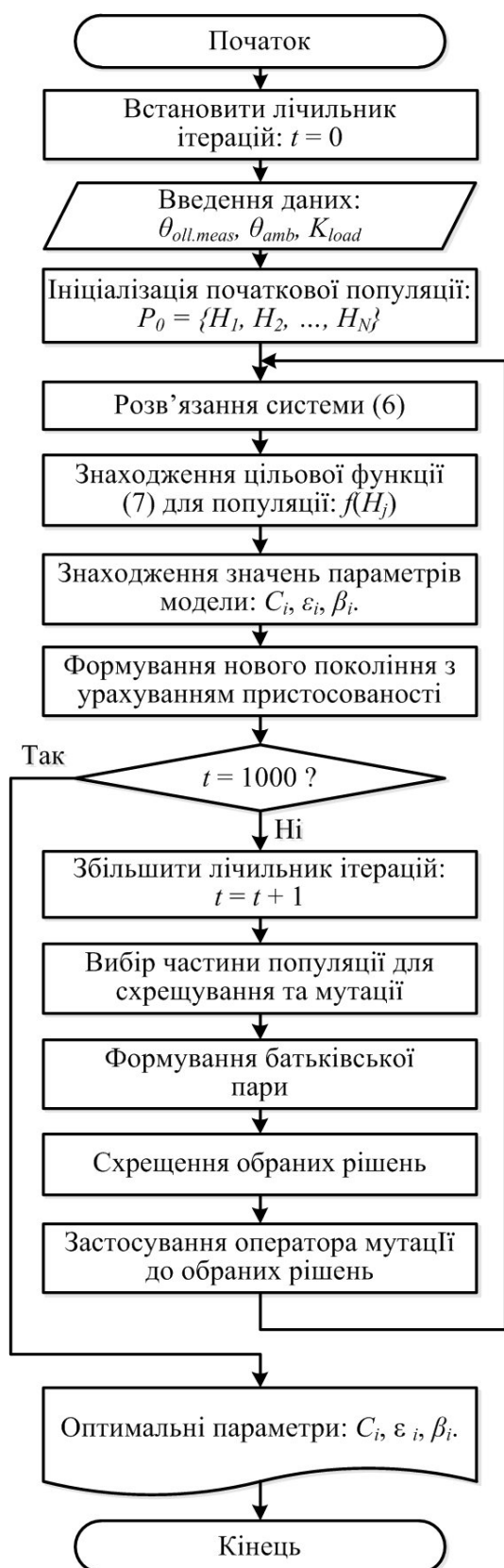


Рис. 3. Схема алгоритму ідентифікації параметрів теплової моделі (6) АТ з використанням методу еволюційного пошуку

У четвертому розділі розглянуто й вирішено наступні задачі:

1. Визначено параметри ТММ (6) досліджуваного АТ з використанням безпосередніх вимірів СНК *SAFE-T*TM і методів стохастичної оптимізації. Схема алгоритму ідентифікації параметрів з використанням методу еволюційного пошуку наведено на рис. 3. Середнє значення цільової функції (7) для режиму «М» склало 0,171°C, для режиму «Д» – 0,109°C. Набір значень керованих змінних, отриманих у результаті виконання 2-етапної оптимізації для режимів роботи системи охолодження «М» та «Д», представлений у табл. 1.

2. Виконано верифікацію параметрів ТММ АТ з використанням масивів вимірів, зареєстрованих СНК (рис. 4). Помилка при визначенні температури масла не перевищила 2°C, що є достатнім при використанні розрахункової температури в діагностичних цілях. Підтверджені працездатність розробленого методу для визначення параметрів ТММ АТ й можливість його застосування в СНК.

3. Показано результати впровадження СНК АТ на магістральній підстанції 750кВ «Ленінградська», а саме: виконувані функції СНК, структура СНК, застосований апаратно-програмний комплекс СНК, виконання заходів щодо забезпечення вимог надійності й умов експлуатації; інформаційне забезпечення СНК; структурна схема формування висновків по стратегії обслуговування обладнання на базі СНК. Наведено практичні рекомендації й перспективні напрямки розвитку СНК.

Результати ідентифікації параметрів ТММ АОДТН-333000/750/330-У1

Елемент АТ	$C, 10^6 \cdot \text{Дж/К}$		$\varepsilon, 10^2 \cdot \text{Вт/К}^{\beta+1}$		β	
	«М»	«Д»	«М»	«Д»	«М»	«Д»
Бак	27,931	28,015	508,12	413,11	0,249	0,243
Магнітна система	42,582	42,752	10,76	9,59	0,252	0,250
Загальна обмотка	4,969	4,984	159,82	69,43	0,254	0,248
Послідовна обмотка	7,617	7,640	187,21	93,61	0,257	0,251
Регульовальна обмотка	2,235	2,242	0,008	0,007	0,248	0,243
Обмотка низької напруги	0,286	0,287	62,58	52,71	0,249	0,232
Радіатори	144,21	139,79	34,83	95,18	0,251	0,121

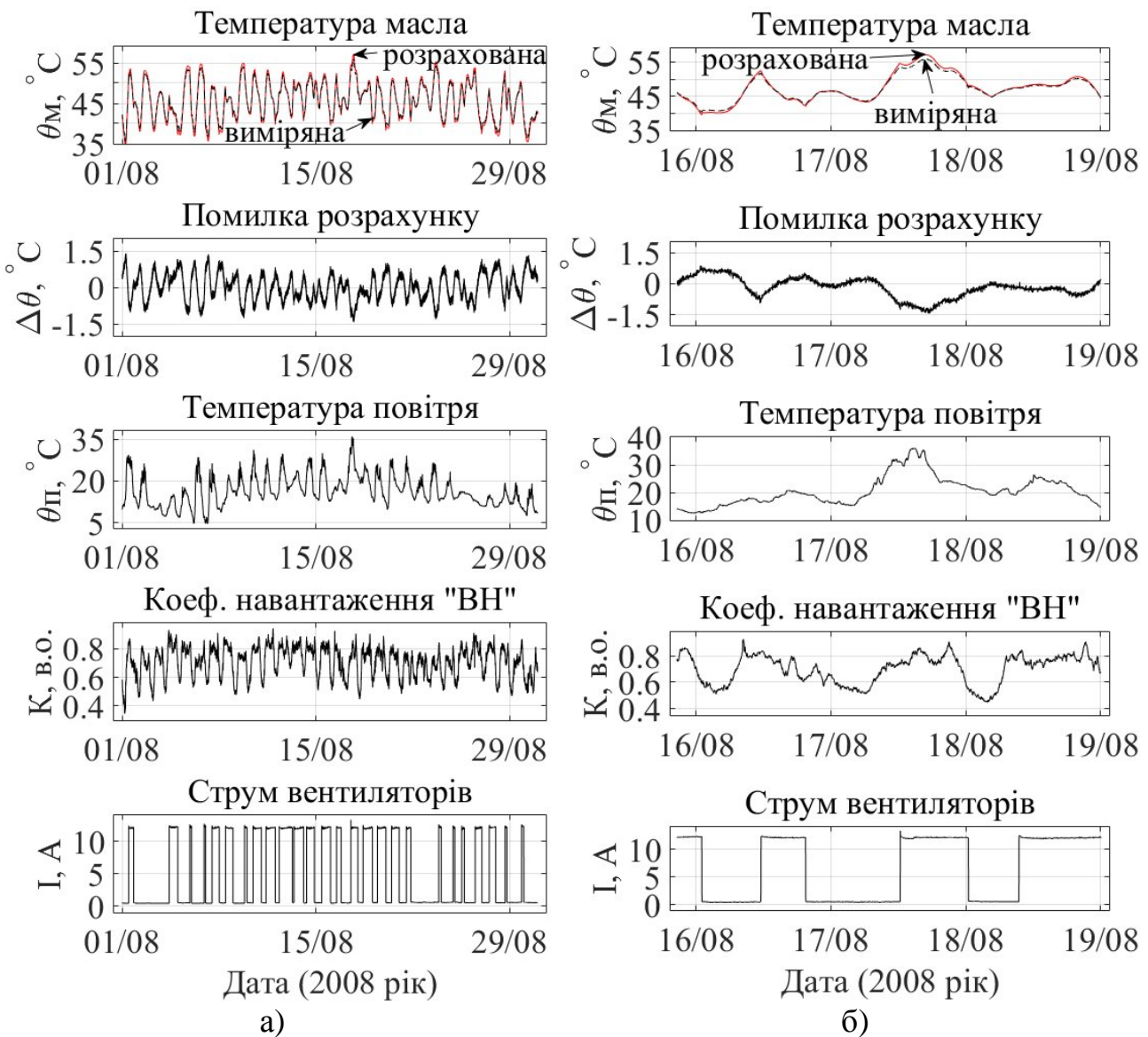


Рис. 4. Фрагменти результатів верифікації теплової моделі АТ у двох режимах роботи системи охолодження «М/Д»: а – за 30 діб; б – за 3 доби

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу наукового обґрунтування та створення автоматизованого комплексу діагностики та неперервного контролю системи охолодження потужних АТ, який дозволяє у режимі експлуатації виявляти несправності та дефекти у системі охолодження на ранньому етапі їхнього виникнення та попереджувати їхній подальший розвиток за рахунок контролю діагностичних параметрів в автоматичному режимі. Основні наукові й практичні результати, отримані в роботі, полягають у наступному:

1. Дістала подальшого розвитку теорія діагностування системи охолодження потужних АТ для застосування в автоматизованих комплексах діагностики та неперервного контролю, яка відрізняється одночасним урахуванням декількох критеріїв: діагностичних параметрів окремих елементів АТ, інтегральної характеристики нагріву АТ за порівнянням безпосередньо вимірної та розрахованої температури масла, перепаду температури масла на вході/виході радіаторів, концентрації розчинених у маслі газів та вологовмісту масла, що забезпечує підвищення достовірності виявлення та локалізації дефектів.

2. Вдосконалено ТММ потужного АТ, яка відрізняється урахуванням нелінійності теплових опорів елементів АТ, використанням теплових параметрів конкретного АТ, автоматичним налаштуванням на поточний режим роботи системи охолодження, що забезпечує можливість визначення в режимі експлуатації розрахункової температури масла з точністю, не гірше $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$, що є достатньою для автоматизованої діагностики системи охолодження АТ.

3. Вперше запропоновано використання у автоматизованих комплексах діагностики та неперервного контролю охолодження АТ удосконаленого виразу для теплових опорів елементів АТ, який відрізняється ступеневу функцією залежності від перевищення температури елемента АТ над охолоджуючим середовищем, що забезпечує урахування нелінійної природи теплообміну в АТ та можливість налаштування на поточний режим роботи системи охолодження у режимі експлуатації.

4. Вперше запропоновано метод ідентифікації параметрів ТММ АТ, який відрізняється використанням масивів безпосередніх вимірів СНК, результатів заводських теплових випробувань АТ та застосуванням стохастичних методів оптимізації – генетичних алгоритмів та імітації відпалу, і забезпечує достатню для діагностування системи охолодження точність розрахунку температури масла за ТММ при різних режимах роботи системи охолодження.

5. Розроблено, виготовлено та впроваджено в промислову експлуатацію автоматизований комплекс діагностики та неперервного контролю системи охолодження потужних АТ, що дозволяє у режимі експлуатації виявляти та попереджати дефекти у системі охолодження, за рахунок автоматизації

контролю діагностичних параметрів АТ та суттєво підвищує їх надійність. На основі наведених у роботі положень запропоновано удосконалення експлуатаційної діагностики силових АТ, що забезпечує можливість технічного обслуговування на основі реального технічного стану.

6. Наведені в дисертації науково-обґрунтовані рішення, методи й алгоритми використані під час розробки та створення систем неперервного контролю стану силового трансформаторного обладнання *SAFE-TTM*, виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя); система встановлена на підстанції 750кВ «Ленінградська» Північно-Західних магістральних електричних мереж ВАТ «ФСК ЕЭС» (Російська Федерація); загальна кількість трансформаторного обладнання, контрольованого системами неперервного контролю *SAFE-TTM* перевищує 200 одиниць, проводяться подальші впровадження таких систем на підстанціях 220–750 кВ на території України та за кордоном.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рассальский А. Н. Современные методы диагностики оборудования трансформаторных подстанций класса напряжения 220–750кВ / А. Н. Рассальский, С. П. Конограй, А. Р. Лучко, А. А. Гук // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. — 2008. — № 45. — С. 119—125.

2. Рассальский А. Н. Применение тепловой модели силового автотрансформатора для расчета нагрева его элементов в режиме эксплуатации / А. Н. Рассальский, С. П. Конограй, А. Р. Лучко, А. А. Гук // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. — 2009. — № 7. — С. 133—138.

3. Рассальский А. Н. Результаты внедрения системы непрерывного контроля силовых автотрансформаторов на подстанции «Ленинградская» / А. Н. Рассальский, С. П. Конограй, А. А. Сахно, А. Г. Спица, А. А. Гук // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського. — 2009. — №3(56), ч.1. — С. 150–153.

4. Конограй С. П. Прогнозирование температуры верхних слоёв масла силового трансформаторного оборудования с помощью нейронных сетей / С. П. Конограй // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. — 2010. — № 55. — С. 43—48.

5. Рассальский А. Н. Комплексный подход к диагностике высоковольтного оборудования подстанций 220 — 1150 кВ под рабочим напряжением в режиме эксплуатации / А. Н. Рассальский, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. А. Гук // Електротехніка і електромеханіка. — 2010. — № 4. — С. 23—25.

6. Конограй С. П. Применение модели старения твёрдой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации / С. П. Конограй // *Электротехніка і електромеханіка*. — 2010. — № 1. — С. 43—45.

7. Андриенко П. Д. Особенности непрерывного контроля характеристик влагосодержания изоляции маслонаполненного электрооборудования / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно, С. П. Конограй, Л. С. Скрупская // *Электротехніка та електроенергетика*. — 2014. — № 2. — С. 32—41.

8. Андриенко П. Д. Определение нагрузочной способности силовых трансформаторов с использованием систем непрерывного контроля и стохастической оптимизации / П. Д. Андриенко, С. П. Конограй // *Электротехнические и компьютерные системы*. — 2015. — № 19(95). С.91—96.

9. Пат. 106309 Україна, МПК G01R 31/00 (2006.01), G01R 31/02 (2006.01), G01R 31/06 (2006.01). Система моніторингу високовольтного електротехнічного обладнання / Рассальська С.М., Сахно О.А., Конограй С.П.; заявник та власник Рассальська С.М., Сахно О.А., Конограй С.П. — № а201303103; заявл. 14.03.2013; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.

10. Пат. 29486 Республика Казахстан, МПК G01R 31/00 (2006.01), G01R 31/02 (2006.01), G01R 31/06 (2006.01). Система мониторинга высоковольтного электротехнического оборудования (ВЭО) / Рассальская С.М., Сахно А.А., Конограй С.П.; заявитель и патентообладатель Рассальская С.М., Сахно А.А., Конограй С.П. — № 2013/2010.1; заявл. 03.07.2013; опубл. 15.01.2015, Бюл. № 1.

11. Пат. 2554574 Российская Федерация, МПК G05B 15/00 (2006.01). Система мониторинга высоковольтного электротехнического оборудования (ВЭО) / Рассальская С.М., Сахно А.А., Конограй С.П.; заявитель и патентообладатель Рассальская С.М., Сахно А.А., Конограй С.П. — № 2013127145/08; заявл. 14.06.2013; опубл. 27.06.2015, Бюл. № 18.

12. Сахно А. А. Диагностирование высоковольтного оборудования распределительных установок 110–750кВ в непрерывном режиме / А. А. Сахно, С. П. Конограй // *Электрические сети и системы*. — 2012. — № 4. — С. 61—65.

13. Конограй С. П. Методы непрерывного контроля и оценки состояния высоковольтного оборудования подстанций: Материалы VII Международной научно-технической конференции «Силовые трансформаторы и системы диагностики» (Д39) [Электронный ресурс] / С. П. Конограй, А. Н. Рассальский, А. А. Сахно. — 80 Min / 700 MB. — Москва : МА ТРАВЭК. — 2010. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. — Систем. вимоги: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 98, 2000, XP ; Adobe Acrobat Reader 5.0. — Назва з контейнера.

14. Сахно А. А. Непрерывный контроль и оценка остаточного ресурса электротехнического оборудования на классы напряжения 110кВ и выше: Материалы IX Международной научно-технической конференции «Силовые трансформаторы и системы диагностики» (Д18) [Электронный ресурс] / А. А. Сахно, С. П. Конограй. — 80 Min / 700 MB. — Москва : МА ТРАВЭК. — 2012. —

1 електрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. — Систем. вимоги: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 98, 2000, XP ; Adobe Acrobat Reader 5.0. — Назва з контейнера.

15. Сахно А. А. Развитие методологии диагностики высоковольтного оборудования в системах непрерывного контроля SAFE-T: Материалы X Международной научно-технической конференции «Силовые трансформаторы и системы диагностики» (Д2-02) [Электронный ресурс] / А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. Г. Спица. — 80 Min / 700 MB. — Москва : МА ТРАВЭК. — 2013. — 1 електрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. — Систем. вимоги: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 98, 2000, XP ; Adobe Acrobat Reader 5.0. — Назва з контейнера.

АНОТАЦІЇ

Конограй С. П. Автоматизований комплекс діагностики та неперервного контролю системи охолодження потужних автотрансформаторів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2015.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню питань підвищення експлуатаційної надійності потужних автотрансформаторів (АТ) шляхом удосконалення діагностики їх реального технічного стану за рахунок створення і застосування автоматизованого комплексу діагностики та неперервного контролю системи охолодження АТ. Комплекс у режимі експлуатації забезпечує виявлення несправностей та дефектів на ранніх етапах їхнього виникнення. У роботі представлено метод діагностування систем охолодження потужних АТ у неперервному режимі експлуатації, що одночасно враховує: діагностичні параметри елементів системи охолодження, інтегральну характеристику нагрівання АТ, концентрацію розчинених газів і вологи в маслі. Для уточнення розрахунку температури масла АТ запропоновано удосконалену теплову математичну модель АТ. Вперше розроблено метод ідентифікації параметрів теплової моделі АТ з використанням вимірів СНК, результатів заводських теплових випробувань і застосуванні стохастичних методів оптимізації. Наведено результати впровадження розробок в експлуатацію, проведено аналіз результатів, сформульовано основні практичні рекомендації.

Ключові слова: потужні автотрансформатори, система охолодження, автоматизований комплекс діагностування, неперервний контроль.

Конограй С. П. Автоматизированный комплекс диагностики и непрерывного контроля системы охлаждения мощных автотрансформаторов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Одесский

национальный политехнический университет, Одесса, 2015.

Диссертационная работа посвящена исследованию и решению проблем повышения эксплуатационной надёжности мощных автотрансформаторов (АТ) путём совершенствования диагностики их реального технического состояния на базе создания и применения автоматизированного комплекса диагностики и непрерывного контроля (СНК) системы охлаждения АТ. Комплекс позволяет в режиме эксплуатации выявлять дефекты на ранней стадии их возникновения. Своевременно принятые меры по исправлению дефектов системы охлаждения позволяют предотвратить как несанкционированные отключения силовых АТ от перегрева, так и крупные аварии. При эксплуатации АТ возможно возникновение аномального нагрева, т.е. превышения реальной температуры элементов АТ над температурой, которая должна быть в бездефектной единице оборудования. К основным причинам возникновения аномального нагрева АТ необходимо отнести неисправности или дефекты в системе охлаждения. Кроме дефектов в системе охлаждения, аномальный нагрев АТ также может быть обусловлен различными дефектами внутри бака АТ. Таким образом, температура масла является интегральным критерием тепловой оценки состояния АТ. Для выявления аномальных нагревов АТ в работе предложено производить сравнение расчетной температуры масла с реально измеренной.

В работе предложена усовершенствованная тепловая математическая модель АТ, отличающаяся учетом нелинейности тепловых сопротивлений элементов АТ и использованием тепловых параметров конкретной единицы АТ, что обеспечивает возможность определения расчетной температуры масла в режиме эксплуатации с точностью, достаточной для автоматизированной диагностики системы охлаждения – не хуже $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$. При этом, впервые предложено использование в СНК системы охлаждения АТ степенной зависимости тепловых сопротивлений элементов АТ от превышений температуры элементов АТ над охлаждающей средой, что обеспечивает возможность учёта нелинейной природы теплообмена в АТ и текущего режима работы системы охлаждения.

Для идентификации параметров тепловой модели АТ впервые предложен метод, основанный на использовании непосредственных измерений СНК, результатов заводских тепловых испытаний АТ и применении стохастических методов оптимизации – генетических алгоритмов и имитации отжига. Для исключения формирования ложных диагностических заключений на базе расчетной температуры масла в работе выполнена проверка адекватности работы тепловой модели АТ с использованием массивов измерений СНК.

При возникновении препятствий движению масла через масляные каналы радиатора (вследствие неисправности) появляется разница в температуре таких радиаторов по сравнению с нормально функционирующими, которая также использована при разработке алгоритма диагностирования системы охлаждения в непрерывном режиме эксплуатации.

Выявление причин аномальных перегревов АТ, не связанных с неисправностью системы охлаждения, предложено осуществлять на базе непрерывного контроля растворенных в масле газов и влагосодержания масла, позволяющих выявлять большое количество видов внутренних дефектов АТ.

На основе представленных в работе положений предложено совершенствование эксплуатационной диагностики АТ, которая обеспечивает снижение объема периодических испытаний и предоставляет возможность планирования технического обслуживания АТ на основе реального технического состояния его системы охлаждения.

Представленные в диссертации научно-обоснованные решения, методы и алгоритмы использованы при разработке и создании систем непрерывного контроля силового трансформаторного оборудования *SAFE-T*TM, производства ООО «Энергоавтоматизация» (г. Запорожье); система установлена на подстанции 750кВ «Ленинградская» филиала ОАО «ФСК ЕЭС» Магистральных электрических сетей Северо-Запада (Российская Федерация); общее количество трансформаторного оборудования, оснащенного системами *SAFE-T*TM, превышает 200 единиц, проводятся дальнейшие внедрения систем в Украине и за рубежом. Внедрение подобных систем позволит перейти к обслуживанию по реальному техническому состоянию, что в свою очередь позволит снизить эксплуатационные затраты и повысить эксплуатации.

Ключевые слова: мощные автотрансформаторы, система охлаждения, автоматизированный комплекс диагностики, непрерывный контроль.

Konogray S. P. Automated diagnostic and continuous monitoring complex of large power autotransformers cooling system. – Manuscript.

The thesis for Ph.D. degree obtaining on the specialty 05.09.01 – Electric machines and apparatuses. – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2015.

The thesis is devoted to the improvement of large power autotransformers (AT) operation through the use of automated continuous monitoring complex of AT cooling system. It allows detecting malfunctions at an early stage of their occurrence in in operating conditions. The new method for continuous monitoring of AT cooling system in operating conditions was introduced. It takes into account both diagnostic parameters of cooling system, integrated heating characteristic of AT and the concentration of dissolved gases and moisture in oil. The improved thermal mathematical model of AT to clarify the oil temperature calculation was suggested. For the first time, the method of thermal model parameters identification was received. It is based on the use of on-line measurements, results of AT thermal testing and application of stochastic optimization methods. The developments were realized in the on-line monitoring system, which was installed on the substation. The main results of installation were analyzed; the main practical advices were formulated.

Keywords: large power autotransformers, cooling system, automated diagnostic complex, on-line monitoring.

Підписано до друку 26.10.2015. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний № 1.
Друк принтерний. Ум. друк. арк. 0,83. Друк арк. відбиток 83.
Наклад 100 прим. Замовлення № 7994/10.2015-А.

Видавець: ТОВ «Видавництво “Кругозір”»

Адреса редакції:
Україна, 69035, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 158, оф. 248.
тел. (061) 270-78-76, моб. (066) 541-41-01
krugozor.zp@ukr.net

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 4798 від 27.11.2014 р.