

УДК 681.518.5:621.314.222.68
DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-4-21-28

**РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
И МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБМОТОК
СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА 10/04 КВ**

И. Козубай, У.А. Калматов, Т.С. Борукеев, О.С. Суйумбаев

Анотация: С целью выявления межвитковых замыканий предложены новое устройство и метод непрерывного диагностирования силовых масляных трансформаторов напряжением 10/04 кВ, который можно отнести к тепловым методам контроля. Предлагаемый метод базируется на сопоставлении осциллограммы реальной динамики изменения температуры основных элементов (магнитопровод, обмотка, трансформаторное масло), полученной в процессе непрерывного дистанционного мониторинга, с осциллограммой изменения температуры, в результате моделирования.

Ключевые слова: силовой трансформатор; диагностика; непрерывный контроль; трансформаторное масло; температура трансформатора; обмотка; виток.

**10/04 КВ МАЙ ТРАНСФОРМАТОРУНУН ОРОМДОРУНУН
БУЗУЛУШУН ДИАГНОСТИКАЛООНУН ТЕХНИКАЛЫК КАРАЖАТТАРЫН
ЖАНА ЫКМАСЫН ИШТЕП ЧЫГУУ**

И. Козубай, У.А. Калматов, Т.С. Борукеев, О.С. Суйумбаев

Анотация: Бул макалада кубаттуу май трансформаторлорунун оромдорундагы түрмөктөр аралык биригип калышын аныктоо максатында жаңы шайман жана 10/04 кВ чыңалуудагы кубаттуу май трансформаторлорун үзгүлтүксүз диагностикалоо ыкмасы сунушталды, аны жылуулук контролдоо ыкмаларына байланыштырса болот. Сунушталган ыкма үзгүлтүксүз аралыктан мониторинг жүргүзүү процессинде алынган негизги элементтердин (магнит өткөргүч, орогуч, трансформатор майы) температуранын өзгөрүшүнүн реалдуу динамикасынын осциллограммасын моделдөөнүн натыйжасында температуранын өзгөрүшүнүн осциллограммасы менен салыштырууга негизделген.

Түйүндүү сөздөр: кубаттуу трансформатор; диагностика; үзгүлтүксүз көзөмөлдөө; трансформатор майы; трансформатордун температурасы; оромдор; түрмөктөр.

**DEVELOPMENT OF TECHNICAL TOOLS
AND METHOD FOR DIAGNOSTICS OF DAMAGE
TO WINDINGS OF POWER OIL TRANSFORMER 10/04 KV**

I. Kozubai, U.A. Kalmatov, T.S. Borukeev, O.S. Suyumbaev

Abstract. In order to identify interturn short circuits, a new device and method for continuous diagnosis of power oil transformers with a voltage of 10/04 kV is proposed, which can be attributed to thermal control methods. The proposed method is based on comparing the oscillogram of the real dynamics of temperature changes in the main elements (magnetic circuit, winding, transformer oil), obtained in the process of continuous remote monitoring, with the oscillogram of temperature changes, as a result of simulation.

Keywords: power transformer; diagnostics; continuous monitoring; transformer oil; transformer temperature; winding; coil.

Введение. В настоящее время методы дистанционной диагностики силовых трансформаторов развиты слабо. На предприятиях, снабжающих электроэнергией, существующие методы диагностики мощных масляных трансформаторов (КМТ) недоступны, так как для проведения диагностики КМТ требуется выезд ремонтной бригады на объект. Кроме того, ряд диагностического оборудования или инструментов очень дороги (например, метод контроля теплового отражения) и требуют много времени для анализа.

Классификация основных факторов, влияющих на возникновение межконтурного скачка напряжения (Тах) в обмотках масляных трансформаторов мощностью 10/04 кВт, показана на рисунке 1.

Силовое масло может присутствовать в различных областях обмоток тахометра в обмотках трансформаторов, то есть в катушках, расположенных близко друг к другу. Это можно рассматривать в двух вариантах:

Первый – с трансформаторным маслом, второй – с соседними валками.

В первом варианте трансформаторное масло, нагретое во время межвалковых адгезий, поднимается вверх, значение температуры масла регистрируется на теплоотражателе (датчике), расположенном над обмоткой, в верхнем слое которой находятся адгезии.

Во втором варианте вся обмотка нагревается в момент регистрации прилипания, что, в свою очередь, приводит к достижению верхнего предела температуры трансмиссионного масла над обмоткой (рисунок 2, а, б). Для доказательства вышеупомянутых предположений на рисунке 2 показан экспериментальный стенд КМТ, выполненный с тремя рулонами, а результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Результаты измерений эксперимента с использованием терморезисторов теплового регистра, установленных на экспериментальном стенде КМТ. Температурное поле масла в верхнем слое обмотки ($T_{\min} - 47,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) до образования межконтинентальной обмотки (в относительных едини-

цах $T_{i \dot{a}}^{\circ} = T_i^{\circ} / T_{\min}^{\circ}$) показано в таблице 1.

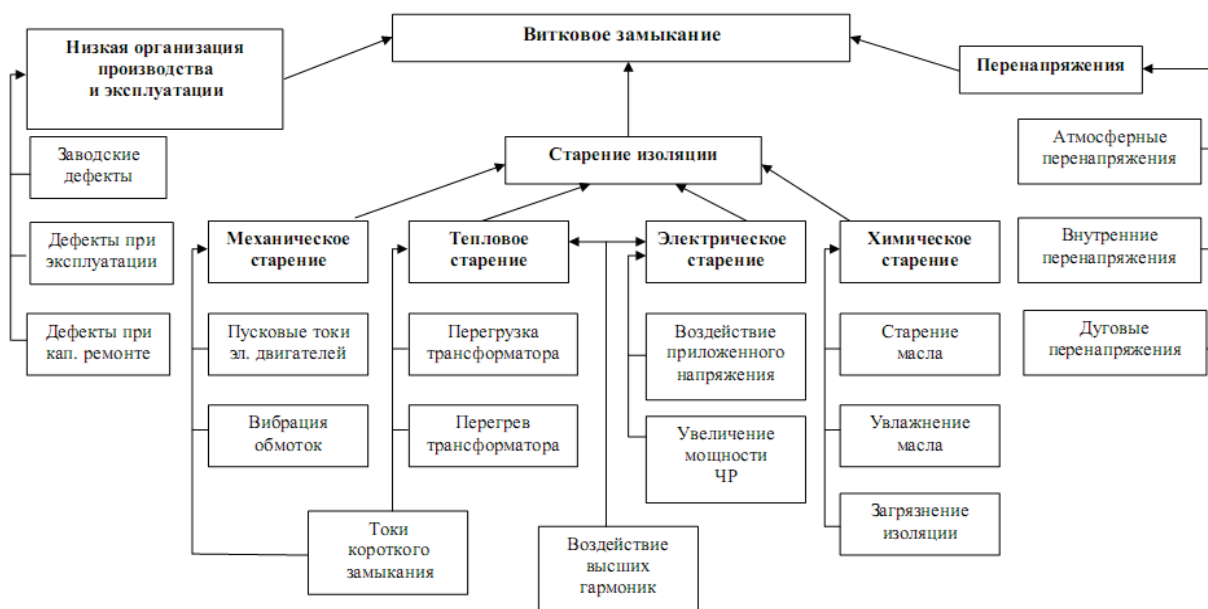


Рисунок 1 – Классификация факторов, влияющих на возникновение межконтурного скачка напряжения в обмотках трансформаторов 6–10/04 кВт

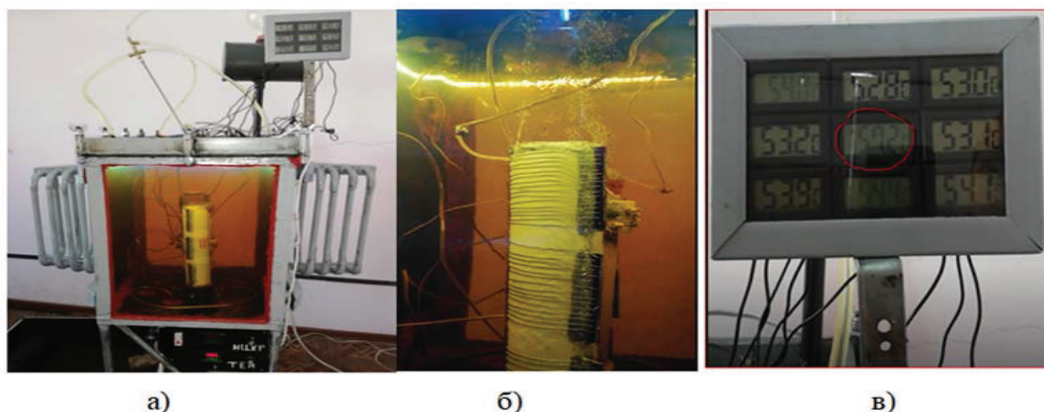


Рисунок 2 – Экспериментальный стенд силового масляного трансформатора [1]

Таблица 1 – Результаты измерений эксперимента с третьей катушкой до образования межконтинентальной катушки

№	T_1/T_{min}	T_2/T_{min}	T_3/T_{min}
T₁	1,033	1,009	1,019
T₂	1,007	1	1,007
T₃	1,011	1,023	1,023

Результат температуры масла в верхнем слое обмотки после образования ($T_{min} = 57,2 \text{ } ^\circ\text{C}$) показан в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений эксперимента с обмотками после образования межкат (4 мин, 42 с после)

№	T_1/T_{min}	T_2/T_{min}	T_3/T_{min}
T ₁	1,072	1,169	1,026
T ₂	1,007	1,003	1,027
T ₃	1	1,016	1,022

Как отмечалось выше, можно диагностировать контакт проводов друг с другом внутри трансформатора.

А во втором варианте вся обмотка, в которой происходит межкат, нагревается, что, в свою очередь, приводит к повышению температуры масла в верхнем слое обмотки (рисунок 3, а, б).

Программа COMSOL Multiphysics помогает моделировать стоп-кадры. С помощью этой программы были использованы результаты моделирования тепловых условий мощного масляного трансформатора [2, 3].

Результаты экспериментального исследования и моделирования (рисунок 3, а, б) подтверждают справедливость сделанных нами прогнозов.

Для объяснения функционирования устройства дистанционной диагностики, а также для уточнения конструкции датчика подачи сигнала на устройство, показано схематическое описание теплового датчика (термопары) с элементами, необходимыми для измерения температуры масла в верхних слоях его обмоток (рисунок 4).

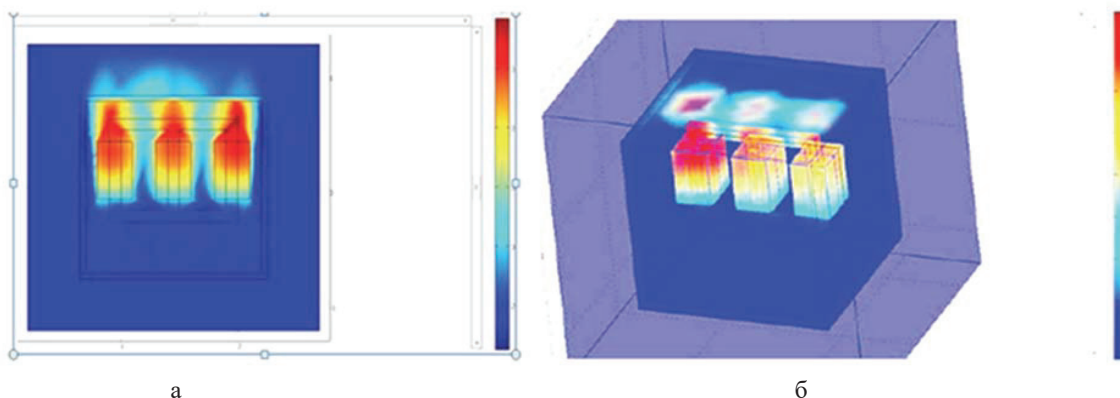


Рисунок 3 – Повышение температуры масла в верхнем слое обмотки:
 а – распределение теплового поля в КМТ без трехфазного дефекта;
 б – распределение теплового поля в КМТ с каким-либо дефектом в трехфазной фазе А (первая левая обмотка) [2, 3]

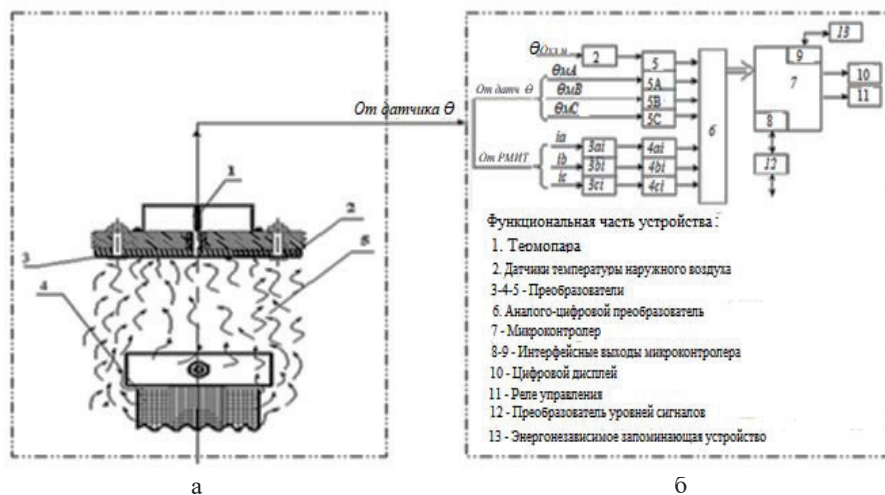


Рисунок 4 – Температура масла в верхних слоях обмоток датчика:
 а – установка и схематическое описание датчика измерения температуры:
 1 – термопара; 2 – стеклотекстолит; 3 – фольга из меди; 4 – восходящий поток нагретого масла;
 5 – обмотка трансформатора; б – функциональная схема термоматчика

В предложенном нами методе, в крышке бака предусмотрены три отверстия, расположенные в верхнем слое обмоток силового масляного трансформатора 2 (на рисунке 4, а), в которые вкручиваются 2 специальные проточные проводники 3 для получения данных от датчиков температуры масла, от которых данные поступают в формы тепловых датчиков температуры 10 (3А, 3В, 3С) и 5 (на рисунке 4, б), входы в преобразователи которых объединены с входами, а выходы объединены со вторичными входами аналого-цифрового преобразователя.

Введение трех специальных проточных проводников с регистраторами температуры масла, расположенных в верхнем слое обмоток силового масляного трансформатора, позволяет непосредственно контролировать тепловое состояние обмоток, не требуя временного прекращения работы КТУ, так как охлаждающая среда, контролируемая обмотками, за счет подъемных сил с их нагревом и движением вверх, достигает расположенных над ними температурных регистраторов 2, непосредственно передает информацию об их состоянии [7, 8].

Наклон тепловых состояний обмоток оценивается по результатам сравнения динамики изменения графика электрических нагрузок каждой обмотки (рисунок 5) с динамикой изменения теплового состояния каждой обмотки, оцениваемой по температуре верхнего слоя масла над обмоткой. Если сравниваемые процессы совпадают 1 (рисунок 5, а), тепловое состояние обмоток допускает дальнейшую эксплуатацию, если нет 2 (рисунок 5, б), – необходимо принять меры, чтобы избежать сбоя в работе.

Согласно функциональной схеме, представленной на рисунке 4, предлагаемая конструкция включает:

- датчик температуры наружного окружения КМТ 2, напряжение-сопротивление, добавленное на входе первого датчика повторителя;
- три регистратора для измерения температуры трансформаторного масла, подключенные к входу вторичного преобразователя напряжения-сопротивления (5а, 5в, 5с);
- три регистратора тока 3аi, 3бi, 3сi, активируемые низким напряжением трансформатора, 4аi, 4бi, 4сi напряжения тока, соответствующий размер интегрируется с включением преобразователей.

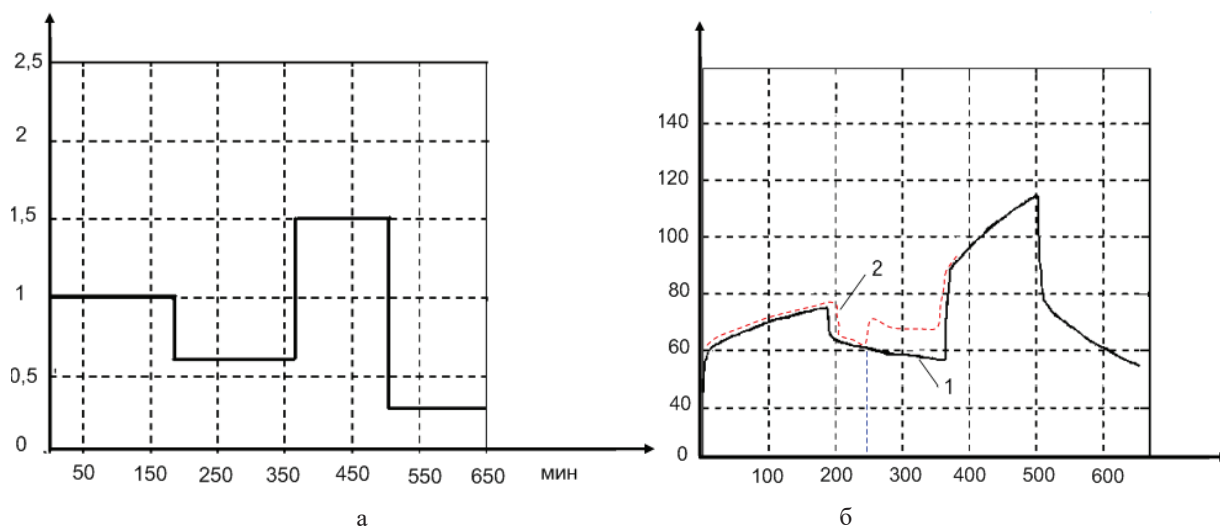


Рисунок 5 – Результат сравнения динамики изменения температуры:
 а – график нагрузки; б – график температуры в верхних слоях масла над обмоткой.
 1 – нагрузка замены масла в верхних слоях масла над обмоткой, соответствующая графику;
 2 – несоответствующая смена

Выходы первого и второго измерительных преобразователей сопротивления-напряжения и третьего измерительного преобразователя тока-напряжения объединяются соответственно с первым, вторым и третьим выходами 6 аналого-цифрового преобразователя, цифровые выходы которых присоединяются к входам 7, относящимся к микроконтроллеру. Он интегрирован с цифровым дисплеем 10 и управляющим реле 11. Интерфейсные выходы микроконтроллера 8, 9 интегрированы с микроконтроллером 7, это означает, что добавлены соответственно уровни сигналов реструктуризатора и энергонезависимого запоминающего устройства 13.

Установка непрерывного контроля температуры ГТО работает следующим образом. Микроконтроллер 7 действует как система сбора данных и вычислительный модуль. С помощью регулируемого (регулируемого) многофункционального измерительного трансформатора производится измерение тока IA, IB, IC каждой фазы. Через промежуток времени, равный Δt , с помощью соответствующих регистраторов осуществляется измерение температуры воздуха вокруг КМТ, температуры масла θ_A , θ_B , θ_C в верхнем слое обмоток. Значение: Δt зависит от типа измерения и выбирается путем корректировки после изменения значений токов нагрузки каждой фазы и последующей стабилизации температуры нагрева обмоток, и, следовательно, значения θ_A , θ_B , θ_C имеют стабилизированный характер.

Измеряемые величины представляют собой пропорциональный двоичный код преобразователя значений проверяемых величин через измерительные преобразователи (5A, 5B, 5C) 5 и (4a_i, 4b_i, 4c_i) 4 и поступают на входы 6 аналого-числового преобразователя, который передает этот код на микроконтроллер 7. Он отображает значения измеренных величин на цифровом дисплее 8, хранит их на энергонезависимом запоминающем устройстве 13 и, при необходимости, отображает уровни сигналов на компьютер через преобразователь 12.

Программная настройка микроконтроллера выполняется по следующему алгоритму:

- θ_{ohl} наружного воздуха, математическая модель зависимости от времени ($\theta_A(t)$), ($\theta_B(t)$), ($\theta_C(T)$), на основе значений температуры, измеренных в условиях точного времени, температур трансформаторного масла в верхнем слое обмоток (θ_A , θ_B , θ_C) и допустимых нагрузок потока каждой фазы;
- сравнивая указанные зависимости по параметрам $\theta_A(t)$, $\theta_B(t)$, $\theta_C(T)$, можно сделать следующий вывод:
 - если, учитывая значение Δt , указанные зависимости аналогичны 1 (рисунок 5, а, б), то можно считать, что межвалковые спайки не зарегистрированы;
 - напротив, если снова сравниваемые зависимости нарушаются, это указывает на то, что в этой фазе произошли межвалковые спайки 2 (рисунок 5, а, б).

Рассмотрим причину нарушения сходства сравниваемых зависимостей. Допустим, в какой-то момент при номинальной нагрузке фаз между постоянными катушками, например, в обмотках фаз, возникали прилипания. Трансформаторное масло, соприкасающееся с указанной областью обмотки, в этом случае нагревается сильнее и быстрее, чем до образования межобмоточного сдвига, и за счет дополнительной создаваемой подъемной силы нагретое масло поднимается вверх, что приводит к повышению температуры масла в верхнем слое обмотки, и указанный рост регистрируется термодатчиками, установленными на крышке трансформатора [4, 5].

Таким образом, аналоговая сборка отличается от указанной сборки тем, что она может и обнаруживает непрерывное управление межконтактным скачком обмоток без необходимости временного отключения трансформатора для установки этой сборки. В программном обеспечении микроконтроллера, работающего по описанному выше алгоритму, создана математическая модель нагрева и охлаждения основных элементов ГИС. Они необходимы для сравнения явной динамики изменений температур основных элементов, полученных в процессе непрерывного контроля, с результатами моделирования. Такое сравнение повышает надежность обнаружения броска.

На рисунке 6 представлены результаты количественного моделирования процесса охлаждения на ЭВМ. На рисунке 6, а – основных элементов X1 – обмоток, X2 – магнита, X3 – трансформаторного масла, а на рисунке 6, б – те же процессы, полученные для сравнения аналитическим методом.

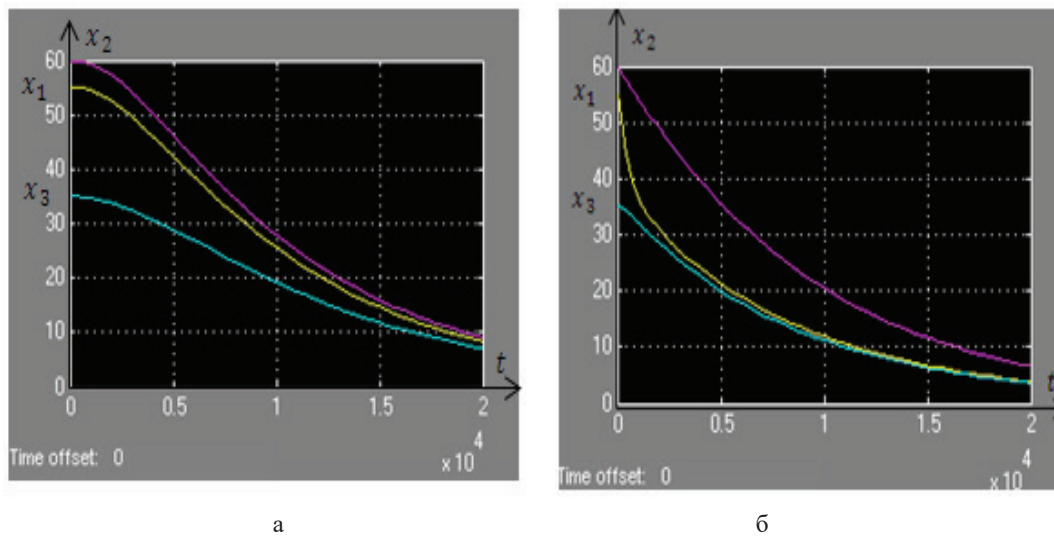


Рисунок 6 – Графическое представление зависимостей, полученных в компьютерной модели (а) и аналитическим методом (б); X1 – обмотка (желтый); X2 – магнитный проводник (фиолетовый); X3 – трансформаторное масло



Рисунок 7 – Связь ГТ 10/04 кВт с мобильным телефоном электромонтера

Анализ результатов приведенных зависимостей позволяет сделать вывод, что на начальном этапе охлаждения обмоток, несмотря на большую инертность тепловых процессов явного ГМТ, фаза охлаждения обмоток протекает быстро, поэтому возникает вопрос о точности аналитического метода расчета охлаждения на начальном этапе охлаждения.

В связи с этим, количественный метод анализа задачи с помощью компьютерного аналога модели был сломан, так как этот метод позволяет при необходимости быстро заменить математическое описание модели в зависимости от ввода в нее новых блоков, приближая ее к ясности.

Напротив, в будущем масляные трансформаторы мощностью 10/04 кВт будут иметь собственный номер мобильного телефона, который будет связан с мобильным телефоном электромонтера, обслуживающего указанный трансформатор. Информация о состоянии трансформатора во время работы будет поступать непосредственно на мобильный телефон электромонтера (рисунок 7).

Информация о рабочем состоянии ГМИ записывается на микропленку в специальном ящике, установленном с правой стороны трансформаторного бака, защищающем его от воздействия различных атмосферных явлений в процессе эксплуатации, и позволяет хранить ее в электронном архиве обслуживающего предприятия.

Выводы. Предложен новый метод диагностики межконтурного скачка обмоток силовых масляных трансформаторов, разработана схема моделирования процесса изменения повышения температуры силовых масляных трансформаторов при их работе в среде Simulink/simpowersystems. Разница между предлагаемой системой и существующей заключается в том, что отказы могут быть предотвращены и своевременно обнаружены на ранних этапах разработки.

Поступила: 05.12.22; рецензирована: 19.12.22; принята: 22.12.22.

Литература

1. *Калматов У.А.* Күч май трансформаторлорунун келемтесинин оромосундагы чабылуусуна диагнос жүргүзүү үчүн техникалык каражаттарды жана ыкмаларды иштеп чыгуу / У.А. Калматов, Т.С. Борукеев // Проблемы автоматизации и управления. 2021. № 3. С. 22–26.
2. *Гнидюк А.Ф.* Принципы моделирования тепловых режимов работы трансформатора / А.Ф. Гнидюк // Вестник Дальневосточного госуд. ун-та. 2013. № 6. С. 86–89.
3. Руководство COMSOL. Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®. URL: https://www.comsol.ru/sc/resources/pdf-offers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES_Essentials_of_Postprocessing_and_Visualization-50_RUS_high.pdf (дата обращения: 05.12.2022).
4. *Калматов У.А.* Диагностирование силовых трансформаторов по характеру распределения температурного поля в верхних слоях масла / У.А. Калматов, К. Сатаркулов // Проблемы автоматизации и управления. 2019. № 1 (36). С. 53–57.
5. *Сатаркулов К.А.* Анализ процесса охлаждения силового трансформатора аналитическим и численным методом / К. Сатаркулов, У.А. Калматов, Н.А. Суюнтбекова // Проблемы автоматизации и управления. 2018. № 2 (35). С. 42–50.