

К. Сатаркулов, к.т.н., satarkulov46.k@mail.ru

Г.Н. Ниязова, gulmira-n.86@mail.ru

Институт машиноведения и автоматики НАН КР

Т. Кабаев, tkabaev1947@gmail.com

Р.А. Мырзаканова, raisa-nargiza@mail.ru

Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПО МОНИТОРИНГУ МАСЛЯНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Показаны способы расширения функциональных возможностей существующих информационно-управляющих систем мониторинга силовыми масляными трансформаторами (СМТ) с помощью разработанных новых устройств для: обнаружения газовых пузырьков (УОГП) в СМТ; измерения тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) в СМТ без отбора проб масла в процессе его эксплуатации. Определение конструктивных параметров УОГП, а также значения электрического напряжения, подаваемого на электродные системы УОГП, можно реализовать на основе результатов моделирования. Отмечено, что моделирование характера распределения электрического поля в межэлектродных областях УОГП с трансформаторным маслом, содержащим газы, легко реализовать с помощью комплекса программ ELCUT. Этот же программный продукт можно использовать и при определении конструктивных параметров устройства измерения $tg\delta$.

Ключевые слова: мониторинг; масляный силовой трансформатор; газовые пузырьки; трансформаторное масло; калориметр; моделирование; электрическое поле.

Введение

Одним из важных требований к электроснабжению многих промышленных предприятий является обеспечение непрерывности технологических процессов. Поэтому к электротехническому оборудованию таких предприятий предъявляются высокие требования надежности. Непредвиденные аварии силовых трансформаторов, в том числе и силовых масляных трансформаторов (СМТ), как правило, влекут за собой остановку технологической установки с значительным экономическим и экологическим ущербом [1, 2, 3].

В связи с вышеизложенным для предотвращения аварийного отказа необходимо повысить требования к системе диагностирования СМТ [4].

Постановка задачи

В настоящее время вопросы идентификации внутренних развивающихся дефектов по тепловому полю малоизучены [5]. В [6] рассмотрена информационно-управляющая система (ИУС) для диагностирования СМТ, основанная на использовании

соответствующих датчиков, которые контролируют тепловое поле в верхних слоях над обмотками СМТ.

В данной работе предлагается ряд устройств, которые, по нашему мнению, позволят расширить функциональные возможности упомянутой выше ИУС. Устройства предназначены для:

- измерения тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) трансформаторного масла (ТМ) в процессе эксплуатации СМТ, без предварительного отбора проб масла;
- оперативной регистрации появления газовых пузырьков в ТМ. Например, из-за возникновения короткозамкнутых витков в обмотках СМТ.

Однако газовыделение возможно и в результате разрушения изоляции – например, при воздействии частичных разрядов (ч.р.) на твердую изоляцию. В [7] отмечено, что состав растворенного и выделяющегося газа существенно зависит от вида повреждений трансформатора:

- возникновение дуги только в масле;
- электрические разряды в маслобарьерной изоляции (МБИ);
- слабые ч.р. в МБИ, начинающиеся при температуре выше 400°С;
- термическое разложение масла;
- термическое разложение МБИ.

Эти повреждения уточняются при анализе газа. В перечисленных выше случаях слаборастворимые в масле газы (табл. 1) обнаруживаются в объемах над поверхностью масла (например, в газовом реле), а газы с большей растворимостью обнаруживаются в масле [8], ухудшая его электроизоляционные свойства.

Таблица 1

Предельная растворимость газа в минеральном масле
(насыщенный раствор при 20°С и $9,8 \cdot 10^4$ Па) % по объему

Газ	Содержание газа в масле	Газ	Содержание газа в масле
Воздух	10,3	Окись углерода (СО)	9
Азот (как часть воздуха)	6,98	Метан (СН ₄)	30
Кислород (как часть воздуха)	3,03	Углекислый газ (СО ₂)	120
Азот (N ₂)	8,6	Этан (С ₂ Н ₆)	280
Кислород (О ₂)	15,9	Этилен (С ₂ Н ₄)	280
Водород (Н ₂)	7	Ацетилен (С ₂ Н ₂)	400
Аргон (Ar)	15	Пропилен (С ₃ Н ₆)	1200
-	-	Пропан (С ₃ Н ₈)	1900

Кроме выше отмеченного, в данной работе также предлагаются способ и устройство, позволяющие измерить пробивное напряжение ТМ без отбора проб в процессе эксплуатации СМТ.

Результаты работы

Информационно-управляющая система (ИУС) по мониторингу СМТ с предлагаемыми в работе дополнительными устройствами представлена на рис. 1.

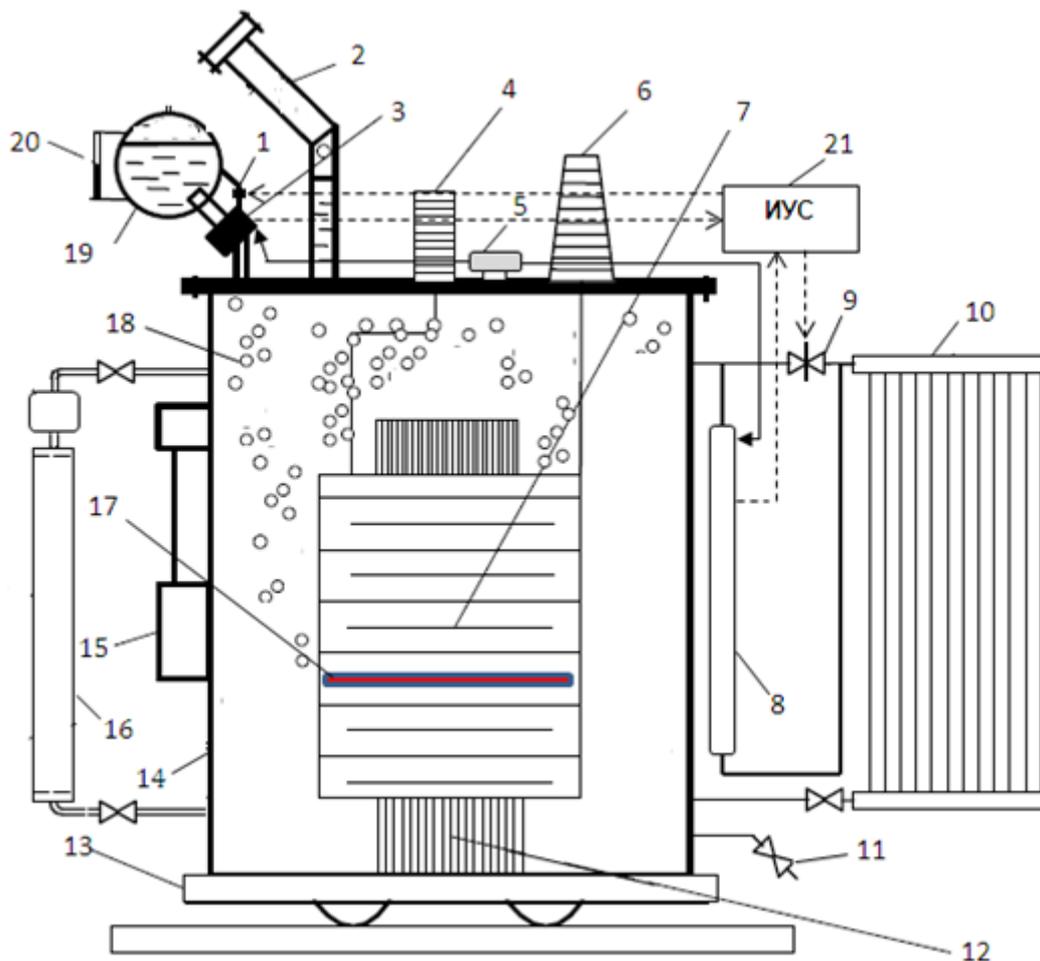


Рисунок 1 – Схема силового масляного трансформатора: 1 – соединительная трубка с дистанционно управляемым клапаном; 2 – выхлопная труба; 3 – устройство для регистрации газовых пузырьков в масле; 4 – вывод (ввод) НН; 5 – компактный высоковольтный трансформатор (КВТ), необходимый для функционирования устройств 3 и 8; 6 – ввод (вывод) ВН; 7 – обмотки высшего и низшего напряжений; 8 – устройство для измерения значения $tg\delta$ ТМ без отбора проб, в процессе эксплуатации СМТ; 9 – кран с дистанционно управляемым клапаном; 10 – радиаторы системы охлаждения; 11 – кран для слива масла; 12 – магнитопроводы; 13 – тележка с катками; 14 – бак; 15 – устройство регулирования под нагрузкой (РПН); 16 – термосифонный фильтр; 17 – короткозамкнутый виток; 18 – пузырьки газа; 19 – расширитель; 20 – указатель уровня масла; 21 – информационно-управляющая система (ИУС).

Устройство для регистрации газовых пузырьков в масле **3** представлено на рис. 2 и выделено пунктирной линией. Его корпус изготовлен из механически прочного диэлектрического материала. Устройство **3** вертикально отходит от трубопровода **1**, соединяющего бак трансформатора **2** с расширителем **4**, а также соединено с расширителем при помощи тонкой высокопрочной диэлектрической трубки **5**. Как

показано на рис. 2, а, в это устройство вмонтированы две металлические пластины 6, выполняющие роль электродов плоского конденсатора.

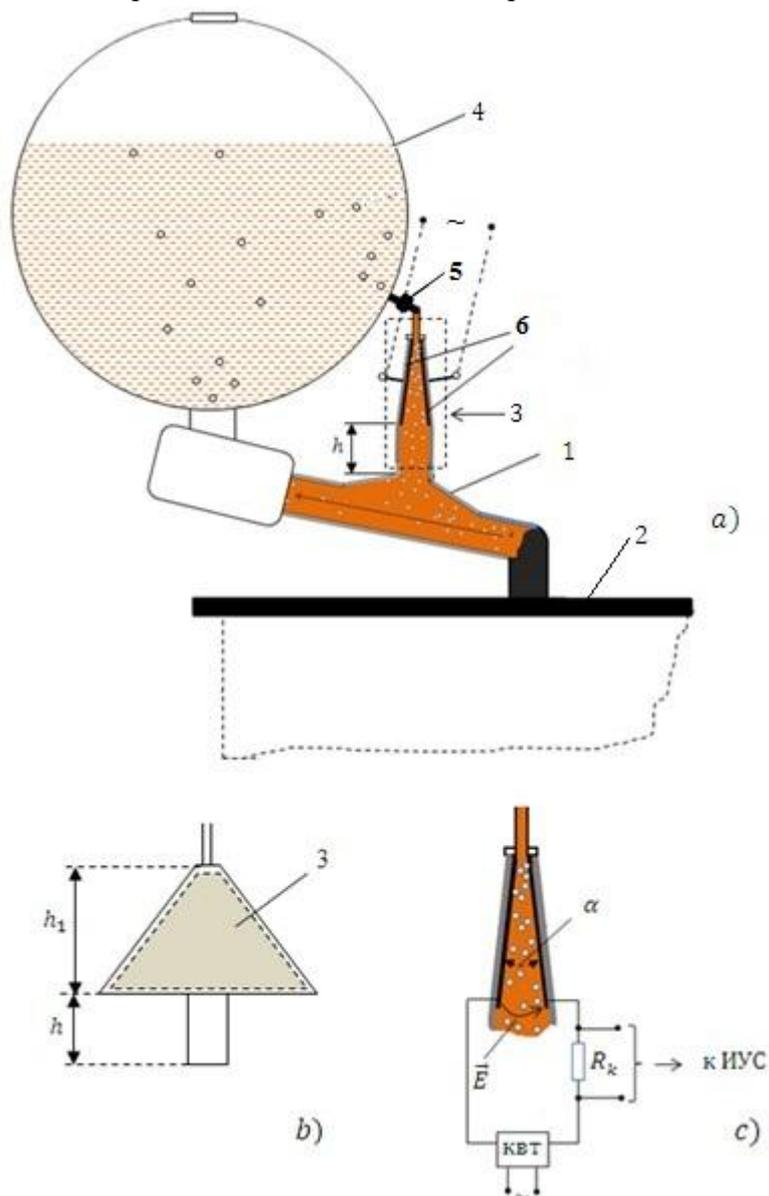


Рисунок 2 – Конструкция устройства для регистрации газовых пузырьков в масле: 1 – трубопровод; 2 – бак трансформатора; 3 – устройство для регистрации газовых пузырьков в масле; 4 – расширитель; 5 – дистанционно управляемый клапан; 6 – металлические пластины, выполняющие роль электродов плоского конденсатора; h – высота цилиндрической части устройства 3; h_1 – высота электрода 6; R_k – калиброванный резистор; КВТ – компактный высоковольтный трансформатор.

Устройство 8 (рис. 1) для измерения значения $tg\delta$ ТМ без отбора проб, в процессе эксплуатации СМТ, представляет собой теплоизолированный снаружи, вертикально расположенный цилиндрический конденсатор (ЦК) с электродами 3 и 5 (рис. 3). Через него сверху вниз может перемещаться ТМ. В этом устройстве заранее, с

высокой точностью, должны быть известны массы и теплоемкости всех элементов, которые могут поглощать тепло.

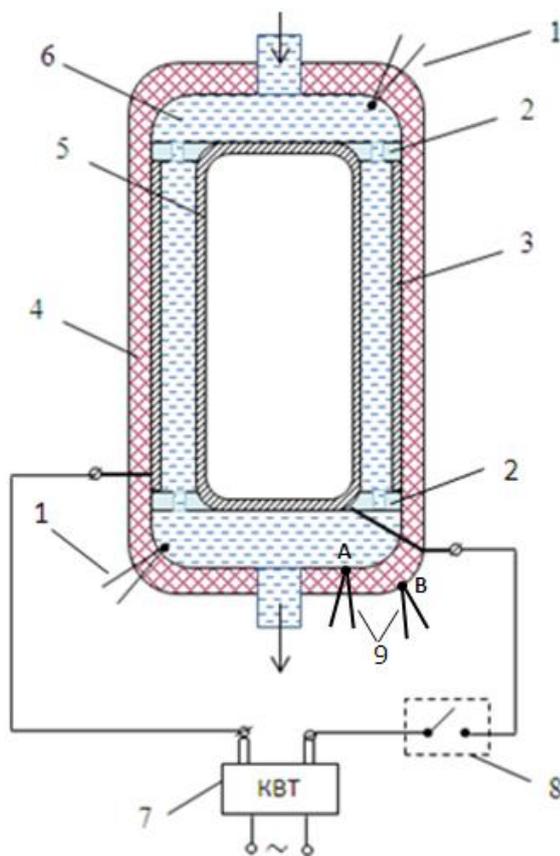


Рисунок 3 – Устройство для калориметрического способа измерения значения $tg\delta$ ТМ: 1 – термодатчики; 2 – фиксирующие элементы из диэлектрика с малой теплоемкостью; 3 – электрод ЦК; 4 – теплоизолирующий диэлектрический материал; 6 – протекающее сверху вниз ТМ; 7 – компактный высоковольтный трансформатор; 8 – дистанционно управляемый выключатель; 9 – термодатчики, измеряющие температуру во внутренней и внешней поверхностях теплоизолирующего материала 4

Алгоритм функционирования ИУС при обнаружении газовых пузырьков

Предположим, что СМТ работает в номинальном режиме без перегрузки.

1. В ИУС поступил сигнал от датчиков (конструкция и место положения этих датчиков представлены в работе [6]), информируя о возрастании температуры в верхних слоях масла над какой-нибудь обмоткой СМТ. Одной из причин возрастания температуры может стать, например, возникновение короткозамкнутых витков в обмотках СМТ.

2. ИУС отправляет диспетчеру информацию об этом событии и производит следующие действия: для уточнения факта появления газовых пузырьков в масле, ИУС, в соответствии с управляющей программой дает команду на включение высоковольтного трансформатора 5 (рис. 1) и подачу напряжения на электроды конденсатора в устройстве для регистрации газовых пузырьков в масле 3 (рис. 1).

3. Если между плоскими конденсаторами 6 (рис. 2, а), особенно в верхних участках, накопились газовые пузырьки (в исходном состоянии дистанционно

управляемый клапан **5** закрыт), то в этом месте возникают ч.р.

4. Падение напряжения в калиброванном резисторе R_k (рис. 2, *с*) от импульсов тока ч.р. подается к соответствующим входам ИУС.

5. После регистрации ч.р. ИУС дает команду на открытие клапана **5** (рис. 2, *а*) и отключение КВТ. Тем самым накопившиеся между обкладками электродов **6** газовые пузырьки устремляются вверх, в сторону расширительного бачка. После этого подается команда на закрытие клапана **5**. Таким образом, регистрируются газовые пузырьки в ТМ, причины появления которых были упомянуты в начале статьи.

Для определения конструктивных параметров УОГП, а также расчета величины напряжения, подаваемого на электроды **6** (рис. 2, *а*), при котором возникают ч.р. в газовых пузырьках, можно воспользоваться комплексом программ ELCUT [9]. С его помощью можно моделировать двухмерные поля методом конечных элементов [10].

Определив конструктивные параметры УОГП, изготавливается его физическая модель, с помощью которой можно уточнять расчетные параметры путем проведения реальных экспериментов. В процессе экспериментов можно снять и осциллограмму падения напряжения в калиброванном резисторе R_k от импульсов тока ч.р. С помощью этого сигнала, который подается на соответствующий вход ИУС, устанавливается факт появления газовых пузырьков в ТМ СМТ.

Алгоритм функционирования ИУС при измерении тангенса угла диэлектрической потери $tg\delta$

Тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) позволяет выявить дефекты масла на ранней стадии их возникновения.

Измерение $tg\delta$ масла в процессе эксплуатации СМТ происходит в следующей последовательности (все действия реализуются автоматически командами от ИУС):

1. По команде ИУС закрывается дистанционно управляемый клапан крана **9** (рис. 1). В результате в калориметр поступает масло из бака СМТ.

2. Дается команда на дистанционно управляемый выключатель устройства **8** (рис. 1) подачей на обкладки конденсатора установленного напряжения U . В это время снимаются показания термодатчиков (фиксируется температура масла), засекается время начала подачи напряжения на обкладки конденсатора.

3. По истечении определенного времени Δt снова снимаются показания термодатчиков и дается команда на отключение напряжения, подаваемого на электроды конденсатора устройства **8**.

За отрезок времени Δt некоторая часть тепловой энергии, выделившейся в масле за счет диэлектрической потери, поглощается контактируемыми с ней элементами калориметра. Просуммировав энергию, поглощенную маслом и всеми остальными элементами, и разделив получившуюся сумму на Δt , определим мощность потерь P . В то же время известна формула $P = U^2 \omega \cdot C \cdot tg\delta$, тогда:

$$tg\delta = \frac{P}{U^2 \omega C},$$

где U – напряжение, приложенное к электродам цилиндрического конденсатора (рис. 3), C – емкость этого конденсатора, $\omega = 2\pi f$.

При определении тепловой энергии Q , выделившейся за счет диэлектрической потери (ДП) в ТМ, под воздействием приложенного к электродам ЦК напряжения U (рис. 3), принимаем допущения:

1. Electrodes ЦК изготовлены из тонкостенных медных листов и имеют малую тепловую инерционность, вследствие чего за короткое время принимают температуру окружающей среды.

2. Не учитывается тепловая энергия, поглощённая мелкими элементами ЦК.

Все формулы для проведения тепловых расчетов взяты из [12].

Тепловая энергия (ТЭ) Q , выделившаяся за счет ДП в ТМ под воздействием приложенного к электродам ЦК напряжения U , в основном расходуется на нагрев электродов и корпуса Q_1 , а также на тепловые потери с поверхности ЦК Q_2 , т.е. его можно представить в виде:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q_1 – ТЭ, израсходованная на нагрев внутреннего и внешнего электродов и корпуса ЦК:

$$Q_1 = c_{мед} \cdot (m_1 + m_2) \cdot \Delta T + c_{кор} \cdot m_{кор} \cdot \Delta T_{кор}.$$

В этом выражении $c_{мед}$ – удельная теплоемкость меди; $(m_1 + m_2)$ – суммарная масса медных электродов; $c_{кор}$ – удельная теплоемкость материала, из которого изготовлен корпус ЦК; $m_{кор}$ – масса корпуса; $\Delta T = (T_2 + T_1)$, где T_1 и T_2 – начальная и конечная температура ТМ; $\Delta T_{кор}$ – разность средней и начальной температуры корпуса $(T_A + T_B) / 2$.

Тепловые потери с поверхности корпуса ЦК Q_2 определяются конвекционным потоком (тепловое излучение незначительно) по формуле:

$$Q_2 = \gamma(T_{вср} - T_0)s_2 \cdot t,$$

где s_2 – площадь внешней поверхности корпуса; $T_{вср}$ – средняя температура на поверхности корпуса в точке B ; γ – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура окружающей среды; t – время измерения.

В заключение отметим, что в работе предложено устройство, которое в отличие от газового реле оперативно реагирует на появление в СМТ газовых пузырьков, и его функционирование основано на электрическом принципе. Предложен способ измерения $tg\delta$ трансформаторного масла в СМТ без отбора проб масла, в процессе его эксплуатации.

Литература

1. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
3. Система автоматизации управления техническим состоянием технологического оборудования нефтегазовых производств / Баширов М.Г. [и др.] // Нефтегазовое

- дело: электрон. науч. журн., 2011. – № 3. – С. 26–40. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Bashirov/Bashirov_4.pdf (дата обращения: 19.11.2020).
4. Семенов В.В. Контроль состояния маслonaполненного оборудования на основе хроматографического анализа газосодержания масла // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве (Computer-Based Conference): Материалы IX Всеросс. науч.-техн. конф. – Новгород: Новг. гос. техн. ун.-т, 2003.– С. 14–15.
 5. Костюкова Т.П., Семенов В.В. Анализ видов, последствий и критических отказов силового энергетического оборудования. Методы обеспечения эксплуатационной безопасности // VII симпозиум «Электротехника 2010»: Сборник научных трудов. – М. 2003. – С. 69–72.
 6. Калматов У.А., Сатаркулов К. Диагностирование силовых трансформаторов по характеру распределения температурного поля в верхних слоях масла // Проблемы автоматики и управления. 2019, №1 (36).
 7. Muller R., Potthoff K., Soldner K. The analysis of gases dissolved in the oil as a means of monitoring transformers and detecting faults. – CIGRE, rep. 12–02, 1970.
 8. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.: ил.
 9. ELCUT Моделирование двумерных полей методом конечных элементов, руководство пользователя. – Санкт-Петербург, 2010.
 10. Сильвестер П., Феррари Р. Методы конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
 11. Асанова С.М., Айдарова А.Р., Сатаркулов К.А. Исследование диагностических возможностей параметров переходных процессов в цепях с распределенными параметрами // Известия КГТУ им. И. Раззакова, 26/2012.
 12. Болгарский, А.В., Термодинамика и теплопередача: учеб.для вузов / А.В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. – М.: Высш. шк., 1975. – 495 с.