

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

УДК.: 62-592.35

*Брякин И.В.¹, bivas2006@yandex.ru**Бочкарев И. В.¹, elmech@mail.ru**Гунина М.Г.², mg_gunina@mail.ru**Иззатов А.Ж.², aspandiyar.07@mail.ru*¹*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР*²*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова*РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ
ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Предложен новый способ оперативного контроля качества трансформаторного масла, суть которого состоит в том, что в работающем трансформаторе создается дополнительный высокочастотный измерительный электрический контур, содержащий измерительный коаксиальный емкостной датчик, в качестве электродов которого предложено использовать непосредственно конструктивные элементы трансформатора. Процедуры определения состава и свойств заполняющего этот датчик трансформаторного масла основаны на контроле зависимости между физико-технологическими параметрами масла и емкостью этого датчика. Посредством высокочастотного гармонического электрического поля в трансформаторном масле, находящемся в датчике, возбуждают поляризационные процессы и регистрируют реакцию масла на них в виде высокочастотного тока обмотки НН, являющегося информационным сигналом. Оценка качества масла осуществляется путем сравнения параметров указанного сигнала с заранее заданными допустимыми значениями. Разработан вариант структурной блок-схемы устройства для реализации предложенного способа, а также электрические схемы первичного измерительного преобразователя, посредством которого преобразуется, фильтруется и усиливается информационный сигнал, и вторичного измерительного преобразователя, регистрирующего необходимые компоненты информационного сигнала. Эффективность предлагаемой системы мониторинга подтверждена соответствующими экспериментальными исследованиями. Получено, что предлагаемая система контроля обеспечивает идентификацию критического дефекта в масле в виде повышенного влагосодержания с погрешностью не хуже 10%, а порог чувствительности достигает порядка десятых долей *ppm*.

Ключевые слова: трансформатор, трансформаторное масло, старение масла, зондирующее высокочастотное гармоническое электрическое поле, конденсатор связи, коаксиальный емкостной датчик, квадратурный синхронный детектор, объемное сопротивление трансформаторного масла, высокочастотный электрический ток обмотки низкого напряжения.

Введение

Силовые маслonaполненные трансформаторы составляют основу любой системы электроснабжения и являются при этом наиболее дорогостоящими ее элементами. Поэтому диагностика технического состояния трансформаторов представляет чрезвычайно важную и актуальную задачу, решение которой обеспечить их требуемую эксплуатационную надежность. Такая диагностика позволит выявить дефекты, которые образуются вследствие физического старения трансформатора, проводить целенаправленные мероприятия по ремонту и предотвращению выхода трансформатора из строя, что повышает его готовность для дальнейшей эксплуатации [1–7]. Все это обеспечивает увеличение срока службы трансформатора и повышает надежность электроснабжения.

Постановка задач исследования

В первую очередь надежность функционирования силовых трансформаторов, особенно высокого напряжения, зависит от состояния их изоляции, поэтому именно она является главным объектом диагностики при оценке состояния трансформатора [8–10]. В маслonaполненном электрооборудовании система изоляции содержит как твердые

материалы, так и жидкие компоненты в виде трансформаторного масла. При этом оценку состояния такой системы изоляции в целом можно осуществлять посредством контроля качества только трансформаторного масла. Более того, такой контроль позволяет оценить и состояние других конструктивных составляющих трансформатора, а также выявить и своевременно ликвидировать возникновение и развитие дефектов в них. Поэтому считается, что в масле условно содержится около 70 % информации о состоянии маслonaполненного оборудования, в том числе и силовых трансформаторов [11]. Это объясняется тем, что масло непосредственно контактирует со всеми внутренними элементами трансформатора, за счет чего является весьма информационно ёмкой средой, поскольку на изменение его свойств однозначно влияет целый ряд различных эксплуатационных факторов и дефектов трансформаторов [12–14]:

- старение масла и твердой изоляции за счет деградиационных процессов вследствие различных электрических, тепловых, химических и механических воздействий;
- наличие в масле продуктов старения твердой изоляции;
- искрение в контактных соединениях и разряды в масле;
- локальные перегревы токо- и магнитоведущих элементов трансформатора, например, за счет неисправности контактов, наличия короткозамкнутых контуров и т.д;
- загрязнение и увлажнение изоляции за счет контакта с воздухом;
- некачественная очистка трансформатора и процедура заливки нового масла, например, попадание воды при смене масла;
- повышение влаго- и газосодержания за счет нарушения герметичности в герметичных исполнениях трансформаторах и т.д.

Таким образом, контроль качества трансформаторного масла позволяет определить не только его собственные физико-химические характеристики и работоспособность, но и состояние твердой изоляции, контактов, обмоток и магнитопровода, герметичность бака, качество обслуживания трансформатора, а также позволяет отслеживать динамику процесса эксплуатационного старения изоляции трансформатора. Оценка качества трансформаторного масла осуществляется путем сравнения текущих показателей с предельно допустимыми значениями, приведенными в [15,16].

Многие из перечисленных выше дефектов и отклонений параметров элементов трансформатора от нормированного состояния, а также начинающиеся внутренние повреждения нельзя определить даже при вскрытии трансформатора, но можно диагностировать путем контроля качества трансформаторного масла. Именно поэтому оценка качества масла позволяет без вскрытия трансформатора определить с высокой достоверностью его техническое состояние, работоспособность и надежность работы.

Очевидно, что диагностику качества масла наиболее целесообразно проводить непосредственно на работающем трансформаторе без вывода его из нормального режима функционирования, что позволит исключить необходимость временного прерывания энергоснабжения потребителей.

Результаты исследований

В настоящее время известно большое количество различных способов контроля качества трансформаторного масла [17–20]. Проведенный анализ показал, что одним из эффективных способов контроля состояния масла является электроимпульсный метод измерения электрической емкости чувствительного элемента, заполненного маслом. В качестве таких элементов используют специальные измерительные емкостные датчики, которые погружают в тестируемое трансформаторное масло. Указанные датчики выполняют в виде пары плоскопараллельных или цилиндрических электродов. В рабочем пространстве датчика, заполненном маслом, создают высокочастотное импульсное магнитное поле и регистрируют аналоговый сигнал, пропорциональный величине электроемкости датчика, зависящей от величины влагосодержания в контролируемом масле [21,22].

Однако использование емкостных датчиков обладает целым рядом недостатков, основными из которых являются:

1. Сложность конструктивной реализации, обусловленная необходимостью использования специального измерительного емкостного датчика, содержащего погружную пару электродов, обычно коаксиальных цилиндрических.

2. Сложность процедуры контроля и ее проведения непосредственно во время эксплуатации трансформатора, поскольку введение емкостного датчика внутрь бака работающего трансформатора значительно нарушает надежность его работы.

3. Невозможность его применения для герметичного исполнения маслонаполненного оборудования, что сужает область применения этого способа.

Для устранения указанных недостатков разработан новый способ оперативного контроля качества трансформаторного масла. Его сущность заключается в том, что контроль качества трансформаторного масла осуществляют непосредственно во время эксплуатационной работы трансформатора, причем в качестве коаксиального емкостного датчика применяют совокупность конструктивных элементов трансформатора: в качестве первого такого конструктивного элемента используют первый слой обмотки НН, являющийся первым электродом коаксиального емкостного датчика, а в качестве второго такого конструктивного элемента используют поверхность магнитопровода трансформатора, являющегося вторым электродом коаксиального емкостного датчика. В заполненном трансформаторным маслом пространственном промежутке между первым слоем обмотки НН и поверхностью магнитопровода возбуждают высокочастотное гармоническое электрическое поле. В качестве информационного сигнала используют высокочастотный электрический ток \dot{I}_0 обмотки низкого напряжения трансформатора, который измеряют посредством измерительного трансформатора тока, регистрируют действующие значения активной I_a и реактивной I_p составляющих высокочастотного электрического тока \dot{I}_0 . В качестве диагностических параметров состояния трансформаторного масла используют его объемное сопротивление G_M и объемное сопротивление G_B содержащейся в нем технической воды, которые сравнивают с заранее заданными эталонными значениями $G_{ЭМ}$ и $G_{ЭВ}$, которые определяют непосредственно после заполнения трансформатора маслом с нормированными параметрами. При этом высокочастотное гармоническое электрическое поле в пространственном промежутке между первым слоем обмотки НН и поверхностью магнитопровода, заполненном трансформаторным маслом, возбуждают на резонансной частоте параллельного электрического контура, образованного индуктивностью обмотки НН и коаксиальным емкостным датчиком. Кроме того, для исключения взаимного влияния измерительной высокочастотной низковольтной электрической цепи и низкочастотной рабочей электрической цепи трансформатора высокочастотное низковольтное напряжение, возбуждающее высокочастотное гармоническое электрическое поле в рабочем пространстве коаксиального емкостного датчика, подают на обмотку НН от соответствующего высокочастотного низковольтного источника питания через высокочастотный фильтр в виде конденсатора связи, а соединение выводного конца обмотки НН трансформатора с силовым фидером осуществляют через соответствующий низкочастотный фильтр в виде дросселя.

Сущность предлагаемого способа оперативного контроля качества трансформаторного масла поясняется его принципиальной блок-схемой реализации (рис.1).

На рисунке 1 обозначено: 1 – бак силового трансформатора; 2 – трансформаторное масло; 3 – магнитопровод; 4 – обмотка высокого напряжения (ВН); 5 – обмотка низкого напряжения (НН); 6 – вывод обмотки ВН; 7 – вывод обмотки НН; 8 – высокочастотный фильтр в виде конденсатора связи с емкостью $C_{св}$; 9 – генератор высокочастотного гармонического напряжения U_0 ; 10 – измерительное устройство, входным элементом

которого является измерительный трансформатор тока; 11 – низкочастотный фильтр в виде дросселя с индуктивностью L_{ϕ} ; 12 – зажим заземления; 13 – заземляющий провод; A – «фаза» ВН; a – «фаза» НН; \dot{E} – высокочастотное гармоническое электрическое поле, возбуждаемое в пространственном промежутке между первым слоем обмотки НН и поверхностью заземленного магнитопровода, заполненном трансформаторным маслом; \dot{I}_0 – высокочастотный ток обмотки НН, создаваемый в электрической цепи трансформатора высокочастотным генератором синусоидального напряжения 9. Магнитопровод 3 гальванически связан с баком 1 посредством специально предусмотренной самой конструкцией трансформатора металлической перемычкой.

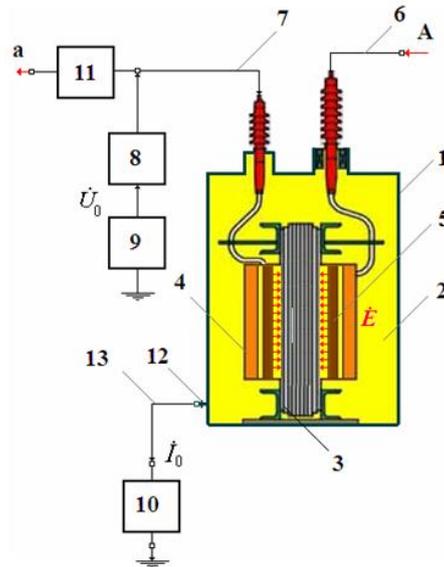


Рисунок 1 – Обобщенная блок-схема реализации способа оперативного контроля параметров масла силового трансформатора

Высокочастотный ток \dot{I}_0 протекает по цепи «высокочастотный фильтр 8 – вывод 7 обмотки НН – обмотка НН – маслонаполненный пространственный промежуток между первым слоем обмотки НН и поверхностью заземленного магнитопровода 3 – зажим заземления 12» и далее по заземляющему проводу 13 через измерительное устройство 10 замыкается на «землю».

Предложенный способ оперативного контроля параметров масла силового трансформатора реализуют следующим образом. От генератора 9 через высокочастотный фильтр 8 на вывод 7 обмотки НН 5, находящейся под низкочастотным рабочим напряжением фазы «а», подают относительно заземления высокочастотное гармоническое напряжение \dot{U}_0 , посредством которого в пространственном промежутке между первым слоем обмотки 5 НН и поверхностью заземленного магнитопровода 3, заполненном трансформаторным маслом 2, возбуждают высокочастотное гармоническое электрическое поле \dot{E} . Посредством высокочастотного гармонического электрического поля \dot{E} в трансформаторном масле 2, находящимся в пространственном промежутке между первым слоем обмотки 5 НН и поверхностью заземленного магнитопровода 3, возбуждают поляризационные процессы и регистрируют измерительным устройством 10, входным элементом которого является измерительный трансформатор тока, реакцию трансформаторного масла 2 на поляризационные процессы в виде высокочастотного тока \dot{I}_0 обмотки НН, являющегося информационным сигналом. Для исключения взаимного влияния высокочастотного гармонического напряжения \dot{U}_0 и низкочастотного рабочего напряжения «фазы» a

высокочастотное гармоническое напряжение \dot{U}_0 подключается к выводу 7 обмотки НН 5 через высокочастотный фильтр 8 в виде конденсатора связи с емкостью $C_{св}$, а сам вывод 7 обмотки НН 5 подключен к фидеру фазы «а» через низкочастотный фильтр 11 в виде дросселя с индуктивностью L_{ϕ} .

В целом последовательность процедур для реализации предложенного способа оперативного контроля параметров масла силового трансформатора показана на функциональной структурной блок-схеме (рис. 2).

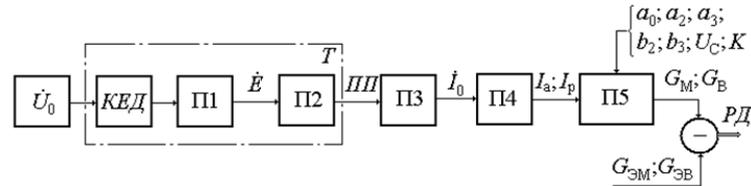


Рисунок 2 – Функциональная структурная блок-схема способа оперативного контроля параметров масла силового трансформатора

На рисунке 2 обозначено: T – трансформатор; $КЕД$ – коаксиальный емкостной датчик, первым и вторым электродами которого являются соответственно первый слой обмотки 5 НН и поверхность заземленного магнитопровода 3; П1 – процесс возбуждения высокочастотного электрического поля \dot{E} в рабочей зоне $КЕД$; П2 – процедура инициирования поляризационных процессов в трансформаторном масле, находящемся в рабочей зоне $КЕД$; \dot{U}_0 – высокочастотное напряжение, подаваемое на $КЕД$; ПЗ – процедура измерения высокочастотного тока \dot{I}_0 обмотки НН; П4 – процедура регистрации действующих значений соответственно активной I_a и реактивной I_p составляющих тока \dot{I}_0 обмотки НН; П5 – процедура определения значений объемных проводимостей соответственно масла G_M и воды G_B ; $G_{ЭМ}$ и $G_{ЭВ}$ – эталонные значений объемных проводимостей соответственно масла и воды; a_0, a_2, a_3, b_2 и b_3 – постоянные конструктивные коэффициенты коаксиального емкостного датчика; K – коэффициент преобразования измерительного устройства 10 (рис.1); $U_C = U_0$ – действующее значение высокочастотного электрического напряжения \dot{U}_0 , возбуждающего высокочастотное гармоническое электрическое поле \dot{E} в рабочем пространстве $КЕД$; РД – результат диагностики состояния трансформаторного масла, полученного в результате сравнения G_M с $G_{ЭМ}$ и G_B с $G_{ЭВ}$.

Видно, что после процесса П1 возбуждения высокочастотного электрического поля \dot{E} в рабочей зоне $КЕД$ и процедуры П2 инициирования поляризационных процессов в трансформаторном масле, находящемся в рабочей зоне $КЕД$, осуществляют процедуру ПЗ измерения высокочастотного тока \dot{I}_0 обмотки НН и процедуру П4 регистрации действующих значений соответственно активной I_a и реактивной I_p составляющих высокочастотного тока \dot{I}_0 обмотки НН. После этого выполняют процедуру П5 определения значений объемных проводимостей соответственно масла G_M и воды G_B , которые используют в качестве диагностических параметров состояния трансформаторного масла и сравнивают эти параметры с заранее заданным соответствующим эталонными значениями $G_{ЭМ}$ и $G_{ЭВ}$ объемных проводимостей соответственно масла и воды, формируя тем самым итоговый результат диагностики РД состояния трансформаторного масла. При этом эталонные сигналы $G_{ЭМ}$ и $G_{ЭВ}$ формируют по результатам измерений, полученным сразу после заполнения трансформатора маслом с нормированными параметрами.

Полное аналитическое описание основных физических процессов, протекающих в трансформаторе при реализации предложенного способа оперативного контроля параметров трансформаторного масла, приведены в [23]. Получено, что величины G_M и G_B можно определить в соответствии со следующими выражениями:

$$G_M = \frac{KU_0 I_p b_3 + KU_0 I_a a_3 - a_0 b_3 (I_p^2 + I_a^2)}{(I_p^2 + I_a^2)(a_3 b_2 - a_2 b_3)}; \quad (1)$$

$$G_B = \frac{a_0 b_2 b_3 (I_p^2 + I_a^2) - a_2 b_3 KU_0 (I_a + I_p)}{(I_p^2 + I_a^2) b_3 (a_3 b_2 - a_2 b_3)}, \quad (2)$$

где I_a и I_p – регистрируемые действующие значения активной и реактивной составляющих полного высокочастотного электрического тока \dot{I}_0 в цепи обмотки НН.

Разработка аппаратной реализации предложенного способа

Принципиальная блок-схема устройства для реализации предложенного способа показана на рис. 3.

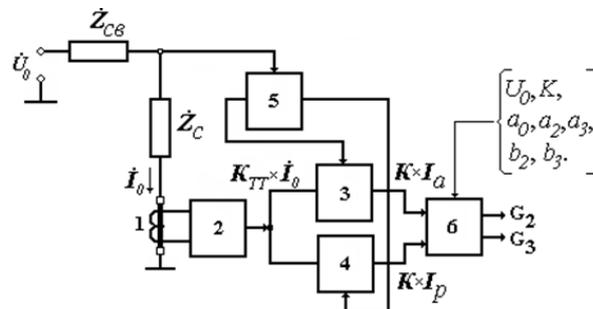


Рисунок 3 – Структурная блок-схема устройства

На рис. 3 через \dot{Z}_{cb} и \dot{Z}_c обозначены комплексные сопротивления конденсатора связи и коаксиального емкостного датчика. Измерительный трансформатор тока 1 в совокупности с измерителем тока 2 образуют своего рода первичный измерительный преобразователь (ПИП), посредством которого информационный сигнал \dot{I}_0 преобразуется, фильтруется и усиливается. В свою очередь квадратурные синхронные детекторы 3 и 4 совместно с формирователем опорного напряжения для синхронных детекторов 5 функционально представляют собой вторичный измерительный преобразователь (ВИП), регистрирующий необходимые составляющие компоненты I_a и I_p сигнала \dot{I}_0 [24]:

$$\begin{cases} I_a = K \cdot |\dot{I}_0| \cdot \cos(\arg \dot{I}_0); \\ I_p = K \cdot |\dot{I}_0| \cdot \sin(\arg \dot{I}_0), \end{cases} \quad (3)$$

где $K = K_{TT} \cdot K_{CD}$ – коэффициент преобразования измерительного устройства; K_{TT} и K_{CD} – коэффициенты преобразования измерительного трансформатора тока 1 и квадратурных синхронных детекторов 3 и 4; $(\arg \dot{I}_0)$ – угол между входным и опорным напряжениями синхронного детектора.

На рисунке 4 представлена принципиальная электрическая схема ПИП ДВИК. Схемотехнически она составлена из следующих основных функциональных блоков: входного дифференциального измерительного усилителя DA3; узкополосного фильтра, выполненного на базе DA5; широкополосного усилителя DA6; буферного усилителя DA7.

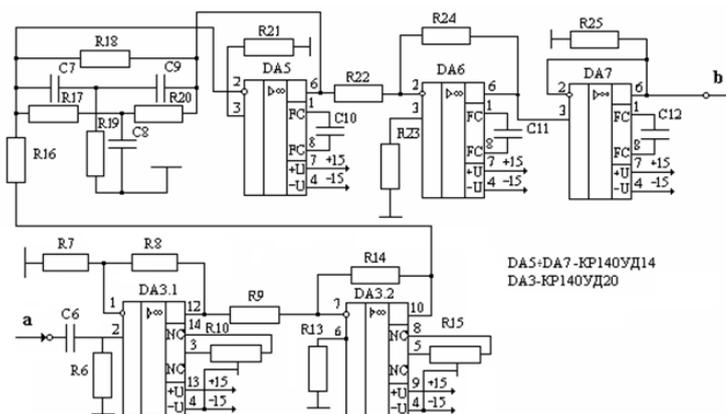


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема ПИП ДВИК

Электрический сигнал «а» с выхода измерительной обмотки измерительного трансформатора тока 1 поступает на вход преобразователя тока в напряжение, собранного на ОУ DA3. Узкополосный активный фильтр собран на ОУ DA5 и частотно-избирательной RC цепи, выполненной в виде двойного Т-образного моста. Резонансная частота двойного Т-образного моста соответствует частоте синусоидального напряжения питающего генератора. Добротность моста составляет $Q=30$. Двойной Т-образный мост (C7-C9, R17-R20), включенный в обратную связь ОУ DA5, на частоте резонанса будет иметь сравнительно большое сопротивление, что обеспечивает в свою очередь ОУ наибольший коэффициент передачи. Данное схемное решение активного фильтра позволяет эффективно выделять информационный сигнал той же частоты, что и рабочая частота генератора низковольтного высокочастотного синусоидального напряжения, в качестве которого использовался стандартный генератор типа Г3-118. Сигнал с выхода активного фильтра усиливается широкополосным усилителем DA6 с коэффициентом передачи $K=10$ и через буферный усилитель DA7 поступает в виде сигнала «b» на вход последующих электронных блоков.

На рисунке 5 представлена принципиальная электрическая схема вторичного измерительного преобразователя (ВИП) ДВИК, состоящая из входных канальных усилителей DA1 и DA7; компаратора DA2; квадратурных синхронных детекторов (СД) 3 и 4 информационных сигналов, собранных соответственно на ОУ DA3, DA4, DA5 и DA8, DA9, DA11; выходных буферных канальных усилителей DA6 и DA10; формирователей синфазного и квадратурного опорных напряжений для СД, выполненных соответственно на элементах DD1.1, DD1.2 и DD2.1, DD2.2.

Формирование исходного опорного напряжения в виде меандра для СД реализовано на компараторе DA2 путем соответствующего преобразования синусоидального сигнала \dot{U}_0 («d») от генератора Г3-118. Включение компаратора DA2 по приведенной схеме обеспечивает скорость нарастания выходного напряжения до 16 В/мкс, а порог срабатывания при этом составляет 3 мВ.

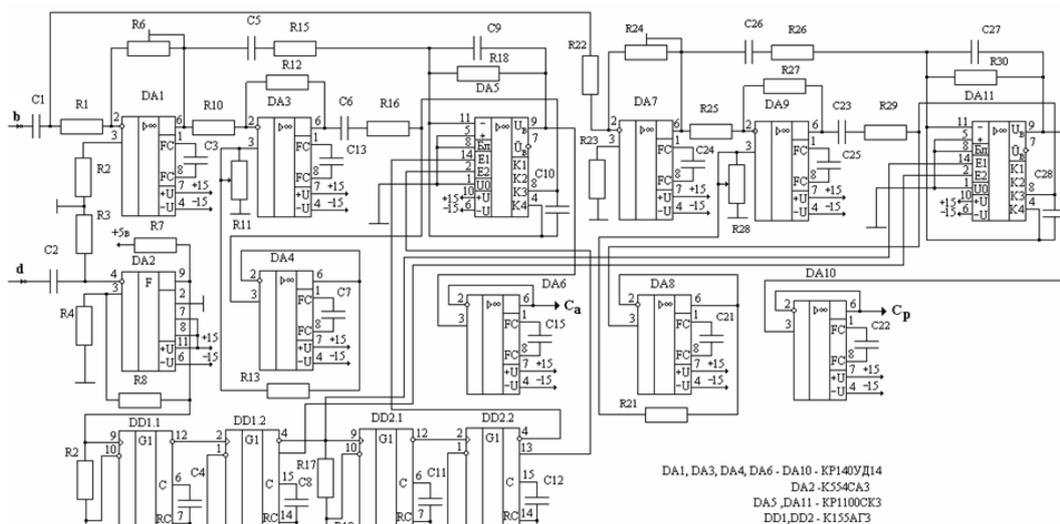


Рисунок 5 – Принципиальная электрическая схема ВИП ДВИК

Необходимые фазы опорных напряжений (синфазного и квадратурного) задаются фазовращателями, выполненными соответственно на одновибраторах DD1.1, DD2.2 и DD2.1, DD2.2, путем регулировки сопротивлений R9 и R19. Каждый из фазовращателей обеспечивает возможность регулировки фазы своего выходного сигнала (вида меандр) относительно входного от 0^0 до 180^0 . При этом формируются опорные напряжения необходимой фазы, которые и обеспечивают соответствующий релейный режим работы СД. В качестве выходных усилителей для СД используются специализированные ОУ DA5 и DA11 со встроенными четырехканальными аналоговыми коммутаторами. Противофазно работающие последовательно-параллельные ключи этих коммутаторов позволяют работать СД с достаточно малыми сигналами, напряжение которых не превышает 0,5 В. СД обладают следующими техническими характеристиками: частотный диапазон 10 Гц÷100 кГц; динамический диапазон 100 дБ; подавление некогерентного шума 70дБ; порог чувствительности 5 мкВ до 10 кГц и 20мкВ до 100кГц.

Продетектированные сигналы « C_a » и « C_p », являющиеся синфазной и квадратурной составляющими информационного сигнала, через соответствующие выходные буферные усилители DA6 и DA10 поступают для дальнейшей обработки на вход информационно-вычислительного блока (ИВК) 6.

Информационно-вычислительный блок (ИВК) 6 был реализован на базе стандартной системы сбора данных E502 производства «ЛКард» [25] и регистрирующего устройства в виде ноутбука. При этом система сбора данных E502 производства «ЛКард» осуществляла аналогово-цифровое преобразование составляющих компоненты I_a и I_p информационного сигнала \dot{I}_0 с последующим вводом их численных значений (в цифровом виде) в регистрирующее устройство, программное обеспечение которого было ориентировано на реализацию измерительного алгоритма и соответствующую визуализацию результатов алгоритмической обработки измерительной информации. Система сбора данных E502 производства «ЛКард» фактически представляет собой универсальный 16- битный модуль ввода/вывода до 32 аналоговых и 17 цифровых сигналов в персональный компьютер через интерфейсы USB 2.0 (high-speed) и Ethernet (100 Мбит) с частотой преобразования до 2 МГц и возможностью их цифровой обработки в реальном времени.

Экспериментальная проверка

Работоспособность и эффективность предлагаемой системы мониторинга была проверена в процессе проведения соответствующих экспериментальных исследований, где в качестве контролируемого объекта был использован силовой трансформатор марки

ТМ-25-6/0,4 с жидкостным наполнителем в виде трансформаторного масла ТКп (ТУ 38.101890–81), а в качестве исследуемого информационного параметра было выбрано влагосодержание H в трансформаторном масле.

Экспериментальные исследования проводились при постоянной температуре окружающей среды (25°C) и током в нагрузке трансформатора 25 А при установившемся рабочем режиме трансформатора.

Следует заметить, что для влагосодержания H в масле использовалась феноменологическая зависимость, сформулированная в соответствии с тем, что объемное электрическое сопротивление диэлектрика, расположенного между коаксиальными электродами цилиндрического конденсатора, равно:

$$G_{\text{дм}} = g_v \cdot d / (2\pi l), \quad (4)$$

где d и g_v – толщина слоя и удельное объемное сопротивление диэлектрика; l – осевая длина электродов конденсатора.

Тогда можно записать

$$H = \frac{M_3}{M_2} \propto \frac{G_3}{G_2}, \quad (5)$$

где M_3 и M_2 – масса соответственно технической воды и трансформаторного масла.

При экспериментальных исследованиях применялись соответствующим образом подготовленные восемь проб в виде наборов жидкостных смесей «вода-масло», где дисперсионной средой является масло, а дисперсной фазой – вода, т.е. своего рода эмульсия воды в масле (в/м – обратный тип). Для каждой такой пробы предварительно отдельно определялись весовые доли дисперсионной среды и дисперсной фазы гравитационным методом, т.е. взвешиванием на электронных весах, после чего посредством специального эмульгирующего устройства уже изготовлялась сама проба. В этом случае гарантировано задавались необходимые уровни влагосодержания H_i , которые в последующем определялись уже предлагаемым косвенным методом высокочастотного импеданса. В последующем изготовленные пробы в определенной последовательности помещались в бак трансформатора.

Посредством ДВИК осуществлялась регистрация необходимых информационных сигналов, после алгоритмической обработки которых определялось текущее значение влагосодержания в виде соответствующих результатов измерений. Иными словами, по результатам 10 наблюдений влагосодержания для каждой из проб $\{H_{ij}\}$ ($i = 1 \div 8$ – номер пробы, $j = 1 \div 10$ – номер результата наблюдения i -ой пробы) был определен соответствующий результат измерений в виде среднего арифметического группы результатов наблюдений $\{H_i^*\}$ для каждой из подготовленных проб.

В таблице 1 представлены обобщенные результаты экспериментальных исследований по выявлению возможности практического определения влагосодержания H в трансформаторном масле посредством ДВИК.

При анализе полученных результатов наблюдений использовались соответствующие соотношения метода статистических характеристик выходного ДВИК.

Таблица 1– Результаты экспериментальных исследований

Номер пробы i	Заданное значение H_i (ppm)	Результат измерений H_i^* (ppm)	δ (%)
1	5	6,25	25
2	10	11,4	14
3	15	16,65	11
4	20	21,8	9
5	25	27	8
6	30	32,25	7,5

7	35	37,21	6,3
8	40	42,4	6

По результатам проведенного анализа данных экспериментальных исследований был построен график относительной погрешности δ определения текущего значения влагосодержания в масле (рис. 6), где по оси абсцисс ($0-H$) отложены эталонные значения влагосодержания каждой жидкостной пробы, а по оси ординат ($0-\delta$) – погрешность соответствующих измерений этих эталонных значений влагосодержания, реализуемых посредством предлагаемого метода.

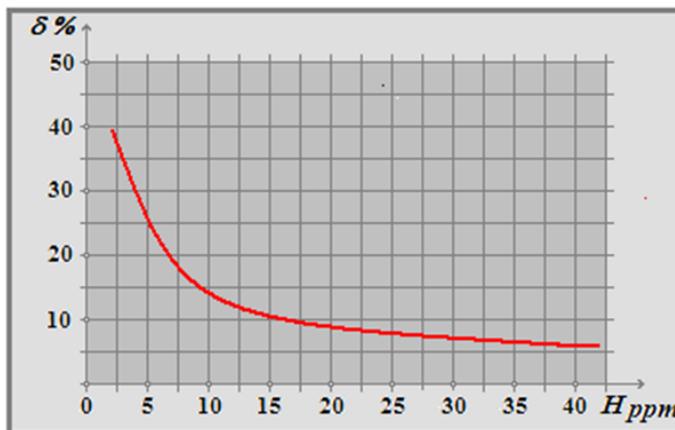


Рисунок 6 – График относительной погрешности δ определения H

Следует отметить, что количество эталонных наборов (проб) жидкостных смесей было выбрано, исходя из существующих четырех классов технического состояния масла. Данного количества проб, учитывая сложность технологии их приготовления, вполне достаточно для проведения корректных экспериментальных исследований. В связи с тем, что значимость результатов измерений оценивалась по критерию Фишера, измерение влагосодержания каждой из эталонных проб осуществлялось с десятикратным повторением, что в итоге и определяло требуемый уровень достоверности эксперимента в целом.

Приведем классификацию технического состояния масла по величине влагосодержания, наличию и степени развития дефектов для влагосодержания в масле:

1. Норма, менее 5 ppm, т.е. отсутствие явных дефектов.
2. Рабочее-Норма, с отклонениями менее 10 ppm, т.е. малозначимый дефект.
3. Рабочее-Норма, со значительными отклонениями от 10 до 15 ppm, т.е. значительный дефект.
4. Ухудшенное состояние, с отклонениями от 15 до 25 ppm, т.е. критический дефект.

Из рисунка 6, с учетом указанной классификации технического состояния масла, следует вывод о том, что идентификация критического дефекта в масле в виде повышенного влагосодержания осуществляется с погрешностью не хуже 10%, а порог чувствительности ДВИК достигает порядка десятых долей ppm. Поэтому при пониженном влагосодержании $H < 5\%$ КИЯ функционирует в режиме, приближающемся к его порогу чувствительности, что и определяет наблюдаемый на рисунке 6 тренд понижения точности измерений.

Характер кривой зависимости δ от H говорит о наличии аддитивной погрешности измерительных преобразований, связанных с наводками, дрейфом и вибрациями. Дальнейшее конструктивно-технологическое совершенствование ДВИК позволит реализовать в полной мере существующие потенциальные возможности и эффективное функционирование системы в целом.

Несмотря на то, что в данной работе ставилась задача определения технического состояния масла по величине влагосодержания, обобщая, можно констатировать, что посредством предлагаемой системы мониторинга в принципе можно, используя

соответствующий алгоритм обработки регистрируемых информационных параметров, определить следующие характеристики изоляционного масла: 1 – влагосодержание; 2 – диэлектрические потери, обусловленные процессом накопления в масле продуктов старения и загрязнения; 3 – содержание растворенных в масле газов.

Например, тангенс угла диэлектрических потерь в соответствии с формулой (3) определяется следующим отношением I_p/I_a , а диэлектрические потери можно определить из выражения:

$$P_{II} = U_c^2 \cdot \omega_p \cdot C \cdot \frac{I_p}{I_a}, \quad (6)$$

где C – величина суммарной емкости ИКЯ, которую можно определить из выражения:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{D - \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2} \cdot \frac{2\pi \cdot l \cdot G_2}{g_2} - \frac{\epsilon_3 - 1}{\epsilon_3} \cdot \frac{2\pi \cdot l \cdot G_3}{g_3}}, \quad (7)$$

где D – средняя величина зазора между первым внутренним рядом обмотки НН и поверхностью магнитопровода; ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 – диэлектрические постоянные соответственно воздуха, трансформаторного масла и технической воды; g_2 и g_3 – удельные объемные сопротивления трансформаторного масла и технической воды.

Выводы

Предложенный способ оперативного контроля качества трансформаторного масла имеет по сравнению с известными расширенные функциональные и эксплуатационные возможности. Это обусловлено тем, что преимуществами предлагаемого технического решения контроля являются:

- 1) возможность осуществления диагностики масла непосредственно во время эксплуатации под нагрузкой в режиме реального времени;
- 2) можно определить несколько типичных параметров изоляционного масла;
- 3) простота ввода низковольтного высокочастотного синусоидального напряжения в силовую низкочастотную высоковольтную цепь;
- 4) использование в качестве элементов измерительной системы непосредственно элементов самого трансформатора, что упрощает технологию проведения контрольных измерений;
- 5) высокая точность и расширенная информативность измерений;
- 6) возможность использования в качестве сигнализатора критического уровня содержания влаги в масле.

Последние два признака существенно упрощают всю измерительную систему контроля параметров масла внутри бака трансформатора.

Однако очевидно, что предлагаемый способ имеет и определенные недостатки:

- 1) каждый объект управления требует индивидуальной настройки режимов работы системы с соответствующей калибровкой функциональных измерительных модулей;
- 2) предлагаемая система мониторинга ориентирована на конструктивные особенности маслонеполненных трансформаторов с обмоткой НН, размещенной внутри обмотки ВН, что в определенном смысле ограничивает области применения рассматриваемой системы контроля.

Необходимо подчеркнуть, что разработанный способ контроля масла и предложенные принципиальные схемы его реализации можно применять не только для контроля технического состояния силовых трансформаторов, но и для диагностики других типов маслонеполненного оборудования, например, реакторов, масляных выключателей, измерительных трансформаторов тока и напряжения и т.п.

Литература

1. Давиденко, И.В. Оценка технического состояния силовых трансформаторов по результатам традиционных испытаний и измерений / И.В. Давиденко. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 96 с.
2. Гун И.Г., Салганик В.М., Евдокимов С.А., Сарлыбаев А.А. Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условиях эксплуатации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – № 1(37). – С. 102–105.
3. Прахов И.В., Путенихина А.В., Мельников А.В., Молчанов Н.А., Привалова В.М. Методы оценки технического состояния высоковольтного трансформатора // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 3. – С. 59–62.
4. Баширов М.Г., Прахов И.В., Богданов Д.И., Буланкин Е.И., Молчанов Н.А. Современные методы оценки технического состояния и прогнозирования ресурса высоковольтного трансформатора // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 4. – С. 63–66.
5. Степанов В.М., Андреев К.А. Технические решения по диагностике силовых трансформаторов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып. 6–1. – С. 74–81. (приведены наиболее массовые виды повреждений, их причины, а также существующие средства их диагностики).
6. Сизганова Е.Ю., Степанов А.Г., Южанников А.Ю. Методы оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. – 165 с.
7. Кейта А. Оценка технического состояния силовых трансформаторов по каждому виду измерения // Молодой ученый. – 2019. – № 3 (241). – С. 35–50.
8. Schreiter S., Lohmeyer H., Werle P. Multidimensional Analysis of a Real Transformer Fleet Based on the Evaluation of Oil Properties. Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, 2019, pp 697–704. https://doi:10.1007/978-3-030-31676-1_66.
9. Jagnandan Negi, Gaurav Maithani. Power Transformer Condition Assessment Through Insulating Oil Testing. Proceedings of Integrated Intelligence Enable Networks and Computing, 2021, pp 161–170. https://doi:10.1007/978-981-33-6307-6_17.
10. Wilson, A.C.M. Insulating liquids: their uses, manufacture and properties/ London, New York: Peter Peregrinus LTD, 1980. - 221 p.
11. Sokolov V., Bassetto A., Oommen T.V., Hauptert T., Hanson D. Transformer fluid: a powerful tool for the life management of an ageing transformer population. Proceedings of the TechCon 2003 Asia-Pacific. Pp. 1-19.
12. Куракина О.Е., Козлов В.К., Туранова О.А., Туранов А.Н. Исследование изменения структурно-группового состава трансформаторного масла в процессе эксплуатации // Problemele energeticii regionale, 2018, 2 (37). – С. 39-45.
13. Fofana I., Borsi H., Gochenbach J. Fundamental investigation on some transformer liquids under various outdoor condition // IEEE Trans, on Dielec. and Electric. Insulat. 2001. V.8. №6. P.1040–1047.
14. Высогорец С.П., Васильев А.П. Оценка качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 1 (166). – С. 84–92.

15. Стандарт организации «Энергетические масла и маслохозяйства электрических станций и сетей. Организация эксплуатации и технического обслуживания/Нормы и требования» НП «ИНВЭЛ». СТО 70238424.27.100.053–2009.
16. Испытание мощных трансформаторов и реакторов / Г.В. Алексеенко, А. К. Ашрятов, Е.В. Веремей, Е.С. Фрид; Выпуск 32. –М.: Энергия, 1978. –520 с.
17. Валиуллина Д.М., Гарифуллин М.Ш., Козлов В.К. Аналитический обзор. Методы и средства диагностики изоляционных масел. – Казань: ООО «ИЦ Энергопрогресс», 2003. –144 с.
18. Туранова О.А, Козлов В.К., Туранов А.Н. Исследование трансформаторных масел современными методами. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – 92 с.
19. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Спектральный экспресс-анализ изоляционных масел. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2003. – 110 с.
20. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. Методы оптической спектроскопии в диагностике состояния изоляции маслонаполненного электрооборудования. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 192 с.
21. Мельников А.В., Сырцов А.Б., Ульянов Е.А. Устройство для измерения влажности // Патент РФ № 2377552. 2007148135/28. Опубликовано 27.12.2009 Бюл. № 36.
22. Шапошников В.В., Лебедев А.В., Щербаков В.Н., Гапонов В.Е. Устройство контроля влажности // Патент РФ № 2471178. 2011132554/28. Опубликовано 27.12.2012. Бюл. № 36.
23. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Система мониторинга технического состояния силового трансформатора по состоянию масла // Вестник КГЭУ. – 2022. –Т. 14. – № 1 (53). – С. 34–46.
24. Брякин И.В. О некоторых принципах и методах повышения точности измерения технологических параметров длинномерных материалов// Проблемы автоматизации и управления.– Бишкек, 2001. – С. 188 – 197.
25. Bryakin I.V., Bockarev I.V., Khramshin V.R., Khramshina E. A. Developing a Combined Method for Detection of Buried Metal Objects. - Basel: Machines (Switzerland) Machines 2021; 9(5): 92. <https://doi.org/10.3390/machines9050092>.