

УДК 621.314
ББК 31.264-08

Г.М. МИХЕЕВ, А.А. ДИМИТРИЕВ,
Х.У. КАЛАНДАРОВ, О.В. ФЕДОРОВ

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Ключевые слова: силовые трансформаторы, переключающие устройства, регулятор напряжения под нагрузкой, контакты контактора, многоканальный цифровой осциллограф, диагностирование, трансформаторное масло.

В электрических сетях практически всех классов напряжений основным звеном в работе по передаче электрической энергии является силовой трансформатор. На данный момент около 60% из них эксплуатируются в нашей стране со значительным превышением срока эксплуатации, что повышает требования к их техническому контролю и диагностике всех их узлов. Переключающие устройства являются неотъемлемой частью силовых трансформаторов. Они необходимы для регулирования напряжения на шинах подстанций в зависимости от нагрузки потребителей. От их работы зависят надёжность электроснабжения и качество электрической энергии. В то же время они являются одними из уязвимых узлов преобразователей напряжения. Хотя параметры диагностических признаков для переключающих устройств не столь обширны по сравнению с параметрами самих силовых трансформаторов, они требуют к себе особого внимания со стороны эксплуатационного персонала. Это связано с многообразием не только типов переключающих устройств, но и методов их диагностики. По этой причине в данной статье была совершена попытка провести анализ существующих подходов и методов диагностирования этих механических управляемых устройств регулирования напряжения. Предлагается новый подход к диагностике высоковольтного оборудования, в том числе силового трансформатора, – интродиагностика. Он основан на методах неразрушающего (без вскрытия баков и слива диэлектрических жидкостей) контроля параметров, характеризующих состояние электрооборудования. Приводится оригинальный способ диагностирования устройства регулирования напряжения под нагрузкой, основанный на осциллографировании и последующем анализе работы контактной системы данного устройства без слива трансформаторного масла из бака контактора.

В 1885 г. фирмой Вестингауз (США) впервые было предложено использование трансформаторного масла (ТМ) одновременно в качестве изолирующей и охлаждающей среды преобразователей напряжения [1]. Вот уже второе столетие этим изобретением пользуется весь мир.

В самой конструкции трансформатора с тех времён произошли весьма значительные изменения. Тем не менее отказаться от ТМ полностью наш мир пока не в состоянии.

В последние три десятилетия в электроэнергетике человечеству всё же удалось уйти от повсеместной зависимости от ТМ. В высоковольтных выключателях и вводах, а также на силовых трансформаторах (СТ) напряжением

до 35 кВ включительно мощностью менее 5 МВ·А уже практически не используется вышеупомянутая диэлектрическая жидкость.

Однако на СТ напряжением 110 кВ и выше и в контакторах переключающих устройств (ПУ) применяется и в ближайшем будущем будет использоваться ТМ. Следует отметить, что ПУ является одним из основных и одновременно проблемных узлов на СТ [15].

ПУ бывают двух типов: переключатели без возбуждения (ПБВ) и регуляторы напряжения под нагрузкой (РПН). Последние устанавливаются главным образом на СТ напряжением 110 кВ и выше. Известно, что причиной более 30% аварий и отказов на СТ является выход из строя ПУ [6]. Положение усугубляется ещё и тем, что парк СТ в России и странах СНГ заметно устарел. Около 60% из них работают с превышением нормативного срока эксплуатации и исчерпали свой ресурс [6]. Для уменьшения количества аварий на таких СТ необходимо проведение своевременного и полноценного диагностирования используемого оборудования [10].

Практически на всех РПН, кроме устройств с вакуумными дугогасительными камерами, главные и дугогасительные контакты контактора размещаются в отдельной ёмкости от основного бака СТ и омываются ТМ [2, 3, 12–14, 16]. Причина размещения узлов контактов контактора в отдельной ёмкости заключается в том, что здесь происходит гашение дуги во время разрыва цепи тока на обмотке трансформатора, где расположено ПУ [9, 11]. Вследствие этого процесса ТМ разлагается на углеродосодержащие примеси. С течением времени вся диэлектрическая жидкость, находящаяся в этой ёмкости, становится непригодной для дальнейшей эксплуатации. По этой причине задачей эксплуатационного персонала являются периодический анализ ТМ из бака контактора и, при необходимости, своевременная его замена.

Следует отметить, что объём такого масла, подлежащего замене, не столь велик по сравнению с объёмом диэлектрической жидкости, которая залита в бак СТ. В зависимости от типа РПН он варьируется от 70 до 400 л.

Заметим, что в зависимости от мощности и класса напряжения трансформатора в его баке может находиться от нескольких до сотни тонн масла.

Тем не менее даже замена ТМ в ёмкости бака РПН для эксплуатационного персонала требует значительных трудовых затрат. Согласно СТО 34.01-23.1-001-2017, для этого необходимо заблаговременно приготовить свежее масло, проверить его на сокращённый химический анализ и определить количественное влагосодержание¹.

Дополнительно надо иметь передвижную ёмкость в виде масловоза, насос и шланг для закачки и выкачки ТМ. Для выполнения этой работы оформляется наряд-допуск, а значит, привлекаются несколько работников из числа ремонтного и оперативного персонала. Данную работу следует выполнять исключительно в сухую погоду, когда отсутствуют атмосферные

¹ СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Стандарт организации. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2017. 262 с.

осадки. В противном случае в ёмкость контактора возможно попадание влаги, что приведёт к последующему ухудшению качества масла.

Согласно СТО 34.01-23.1-001-2017, после закачки ТМ в бак контактора следует повторно отобрать пробу масла на определение пробивного напряжения и количественного содержания в нём влаги.

Что касается диагностирования самого устройства РПН, то этот процесс ещё более трудоёмок и технически сложен. Поэтому данную работу может выполнить только высококвалифицированный персонал, владеющий методами диагностирования РПН и управления современными приборами.

Согласно требованиям завода изготовителя для диагностирования устройства РПН необходимы снятие круговой диаграммы и осциллографирование токов в контактной системе контактора. Для выполнения второй задачи следует сливать ТМ из бака контактора. Только в этом случае возможно подключение зажимов многоканального осциллографа к выводам контактов контактора. Данная процедура может повлечь за собой ухудшение качества диэлектрической жидкости и загрязнение окружающей среды продуктами нефтехимии [6].

После осциллографирования токов следует заново залить бак контактора ТМ. Естественно, такой процесс занимает много времени, а оператор становится заложником погодных условий, так как данную работу невозможно проводить в сырую или дождливую погоду.

В настоящее время существует иной подход к решению этой задачи. В работах [2, 4–8] для различных РПН разработаны методики осциллографирования контактной системы контактора, не требующие вскрытия его бака и слива из него ТМ. Диагностирование выполняется с применением многоканального цифрового осциллографа (ЦО). Он должен иметь высокую помехозащищённость, которая необходима для работы на действующих подстанциях в полевых условиях, а также встроенную специальную программу и автоматический запуск начала регистрации токов осциллографирования. Заметим, что обычные многоканальные ЦО не имеют таких функций и потому с их помощью невозможно выполнить работу по методикам, приведённым в [3–8].

Суть этих методик заключается в одновременном осциллографировании токов всех трёх фаз контактной системы контактора РПН относительно выводов фаз обмотки трансформатора с учётом активного и индуктивного её сопротивлений. Заметим, что осциллографирование токов производится во время вывода в ремонт трансформатора при переключении ответвлений его обмотки с одного на другое положение с помощью привода РПН.

Естественно, в этом случае индуктивность обмотки трансформатора существенно искажает форму кривой токов осциллографирования по сравнению с кривыми токами, полученными традиционным способом. Однако время начала, конца, а также продолжительность совместной работы контактов левого и правого плеча контактора удаётся определить по изменению постоянной времени переходного процесса. Данный метод снятия осциллограмм токов

без вскрытия бака контактора РПН авторами был назван одним словом – интродиагностика [6].

Сегодня в России и в странах ближнего зарубежья эксплуатируются множество типов РПН разных конструкций и производителей. Причем некоторые из них имеют по несколько модификаций. Наиболее распространёнными являются быстродействующие РПН с токоограничивающими резисторами, которые выпускаются разными производителями. Среди них РПН типа РС болгарского производства, *SDV*, *SAV* и *SCV* – немецкого производства, РНОА – украинского производства, РНТА-35/200 – российского производства и т.д. [6].

Вышеуказанные РПН имеют трёхфазное исполнение, т.е. все три фазы контактов контактора находятся в едином баке. Исключение составляет РПН типа РНОА, который имеет пофазное исполнение, а значит, каждая фаза контактора РПН имеет отдельный бак и обособленный привод.

У многих быстродействующих РПН контактор располагается в нейтрали высоковольтной обмотки трансформатора. Исключение составляет РПН типа *SDV* немецкого производства. Контактор этого РПН размещается на высоковольтной обмотке трансформатора, соединённой по схеме «треугольник». Обычно данное ПУ устанавливается на СТ собственных нужд электростанций. В этом случае выводы ЦО подключены непосредственно к выводам трёх фаз и нейтрали СТ, а значит, осциллографирование токов происходит одновременно на всех трёх фазах высоковольтной обмотки.

РПН типа РНТА-35/200 (производитель Тольяттинский трансформаторный завод) имеет следующую особенность. В нём переключатели, силовые контакты и предизбиратель располагаются внутри контактора, а в схеме контактной системы отсутствуют второй дугогасительный контакт и его токоограничивающий резистор. Данное устройство не имеет соединительных валов и редукторов, так как контактор совмещён с устройством привода. Интродиагностика этого типа РПН производится так же, как и на других ПУ с токоограничивающими резисторами. Однако РПН типа РНТА-35/200 является единственным устройством, которому можно провести полноценную интродиагностику в режиме, когда трансформатор находится под рабочим напряжением. Для этого необходима небольшая доработка – вынос на корпус силового трансформатора трёх изолированных проводников с выводов токоограничивающих резисторов каждой из фаз обмотки. Это решение позволит регистрировать сигналы в цепях токоограничивающих резисторов РПН с одновременным осциллографированием токов в фазах обмотки силового трансформатора.

По причине многообразия конструкций РПН, эксплуатируемых на территории России и в странах СНГ, схемы, по которым производится осциллографирование токов в режиме интродиагностики, разные. Так, например, для РПН серии РС схема осциллографирования токов выглядит так, как показано на рис. 1.

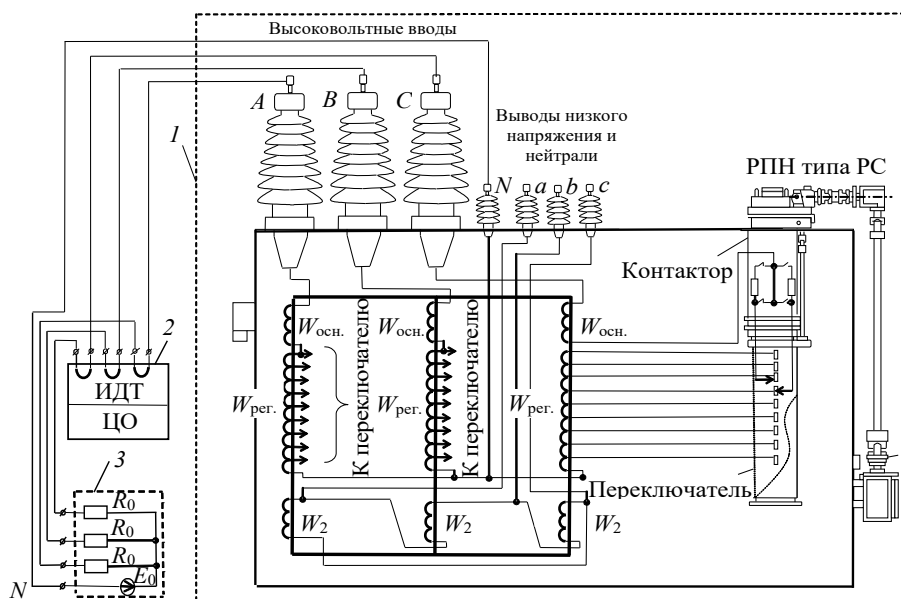


Рис. 1. Схема осциллографирования токов в контактной системе РПН серии РС:

1 – силовой трансформатор; 2 – многоканальный цифровой осциллограф (ИДТ – измерительные датчики тока);

3 – источник напряжения постоянного тока, где E_0 и R_0 – ЭДС и сопротивление источника напряжения постоянного тока, соответственно

На рис. 2 представлены осциллограммы токов, поясняющие суть метода интродиагностики, на рис. 2, *a* – реальные осциллограммы тока фазы контактной системы контактора. Они получены при отсоединенной (1) и присоединенной (2) обмотках трансформатора к многоканальному ЦО. В случае, когда обмотка не участвует в процессе осциллографирования, кривые тока практически идентичны кривым на осциллограммах, представленных в паспорте завода изготовителя. Иная картина складывается, когда индуктивность обмотки участвует в процессе осциллографирования (кривая 2).

Анализ осциллограммы показывает, что кривая на ней является кусочно-непрерывной. Она состоит из пяти разных интервалов. Переключение контактной системы начинается в момент, когда ток начинает уменьшаться по экспоненциальному закону (кривая вогнутая). Процесс работы контактной системы РПН завершается в момент минимального значения тока. Затем ток увеличивается по экспоненциальному закону (кривая выпуклая).

Известно, что контактор РПН состоит из симметричных левого и правого плеча, а токоограничивающие резисторы равны между собой по величине ($R_1 = R_2$). Поэтому постоянные времени исследуемой кривой τ_2 (от момента времени t_1 до t_2) и τ_4 (от момента времени t_3 до t_4) в процессе переключения равны. Следовательно, τ_2 равно τ_4 :

$$\tau_2 = \tau_4 = \frac{L}{R_0 + R_\phi + R_1}.$$

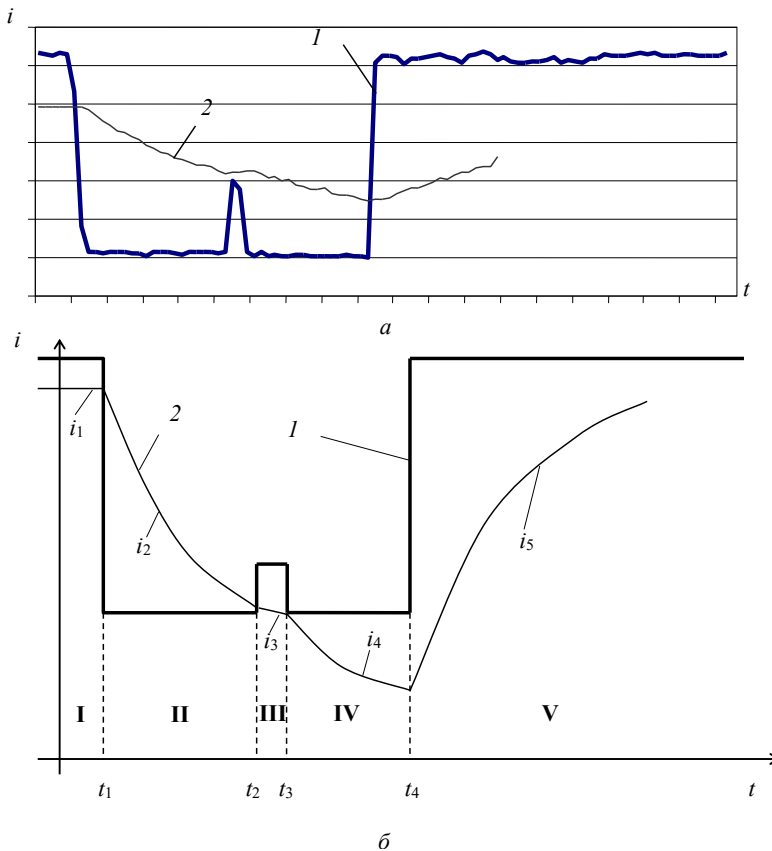


Рис. 2. Осциллограммы тока контактов контактора РПН одной из фаз:
 а – осциллограммы тока фазы контактной системы контактора при отсоединенной (1) и присоединенной (2) обмотке трансформатора;
 б – осциллограммы фазного тока, построенные для произвольных параметров $E, R_0, L, R_\phi, R_1, R_2$ при отсоединенной (1) и присоединенной (2) обмотках трансформатора:
 I – время совместной работы главных и дугогасительных контактов левого плеча контактора;
 II – время работы дугогасительного контакта правого плеча контактора;
 III – время совместной работы дугогасительных контактов левого и правого плеча контактора;
 IV – время работы дугогасительного контакта правого плеча контактора;
 V – время совместной работы главных и дугогасительных контактов правого плеча контактора

От момента времени t_2 до t_3 в так называемом положении «моста» постоянная времени τ_3 больше постоянных времени τ_2 и τ_4 .

$$\tau_3 = \frac{L}{R_0 + R_\phi + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}},$$

или с учетом равенства R_1 и R_2

$$\tau_3 = \frac{L}{R_0 + R_\phi + \frac{R_1}{2}}.$$

Определение параметров процесса переключения контактов контактора РПН производится следующим образом. Вначале находят четыре характерные

точки t_1, t_2, t_3, t_4 осциллограммы токов. Затем определяют интервалы между точками t_1 и t_4 , которые соответствуют длительности переключения РПН. После этого находят длительность нахождения контактов контактора в положении так называемого «моста» посредством определения времени через интервал между точками t_2 и t_3 .

Характерные точки осциллограммы – границы интервалов однородных участков кривой переходного тока – определяются следующим образом:

t_1 – момент времени окончания первого интервала наибольшего тока;

t_2 и t_3 – моменты, где резко (скачком) изменяются постоянные времени кривой тока переключения контактов контактора РПН.

Длительность переключения контактов определяют по формуле

$$t_{\text{пер}} = t_4 - t_1,$$

и находится длительность нахождения контактной системы в режиме «моста»

$$t_{\text{моста}} = t_3 - t_2.$$

Затем определяется время переключения главных контактов $t_{\text{пгк}}$ (для РПН типа РС, РСГ, SAV, SCV, SDV) или дугогасительных (для РПН типа РНОА) контактов контактора РПН во II и IV интервалах:

$$t_{\text{пгк1}} = t_2 - t_1,$$

$$t_{\text{пгк2}} = t_4 - t_3.$$

Следует отметить, что более точное определение характерных точек t_1, t_2, t_3, t_4 возможно (процедурой) нелинейной аппроксимацией экспериментальной зависимости, представленной на рис. 2, а (кривая 2) целевой функцией:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t - t_1) + i_3(t - t_2) + i_4(t - t_3) + i_5(t - t_4),$$

где $i_1(t) = 0$ при $t > t_1$; $i_2(t - t_1) = 0$ при $t < t_1$ и $t > t_2$; $i_3(t - t_2) = 0$ при $t < t_2$ и $t > t_3$; $i_4(t - t_3) = 0$ при $t < t_3$ и $t > t_4$; $i_5(t - t_4) = 0$ при $t < t_4$.

Такая аппроксимация становится доступной с применением современных вычислительных средств при представлении экспериментальных значений тока в виде массива данных $[i(t_n), t_n]$, где $n = 0, 1, 2, \dots, M$ (M – некоторое натуральное число). Для выполнения этой процедуры для измерения токов необходимо использовать цифровой осциллограф, записывающий значения тока в энергонезависимую память с достаточной частотой дискретизации [6].

Следует уточнить, что применение обычного многоканального аналогового осциллографа типа Н107 и других цифровых многоканальных регистраторов для диагностики контактов контактора описанным методом практически невозможно. С помощью многоканального ЦО регистрация токов в контактной системе контактора РПН в режиме интродиагностики и преобразование кривой тока осциллографирования с использованием встроенной программы к обычному виду, представленной в паспорте РПН, производятся достаточно легко и быстро.

Следует подчеркнуть, что в режиме интродиагностики возможно проводить обследование тех РПН, которые установлены на СТ, обмотки которых соединены в звезду [6]. Если эти устройства установлены на обмотках, соединённых по схеме «треугольник», то их диагностирование возможно проводить только после вскрытия ёмкости РПН и слива из неё ТМ.

На рис. 3 продемонстрированы особенности осциллографирования токов РПН, контакторы которого располагаются на обмотке трансформатора, соединённой по схеме «треугольник» [3, 7].

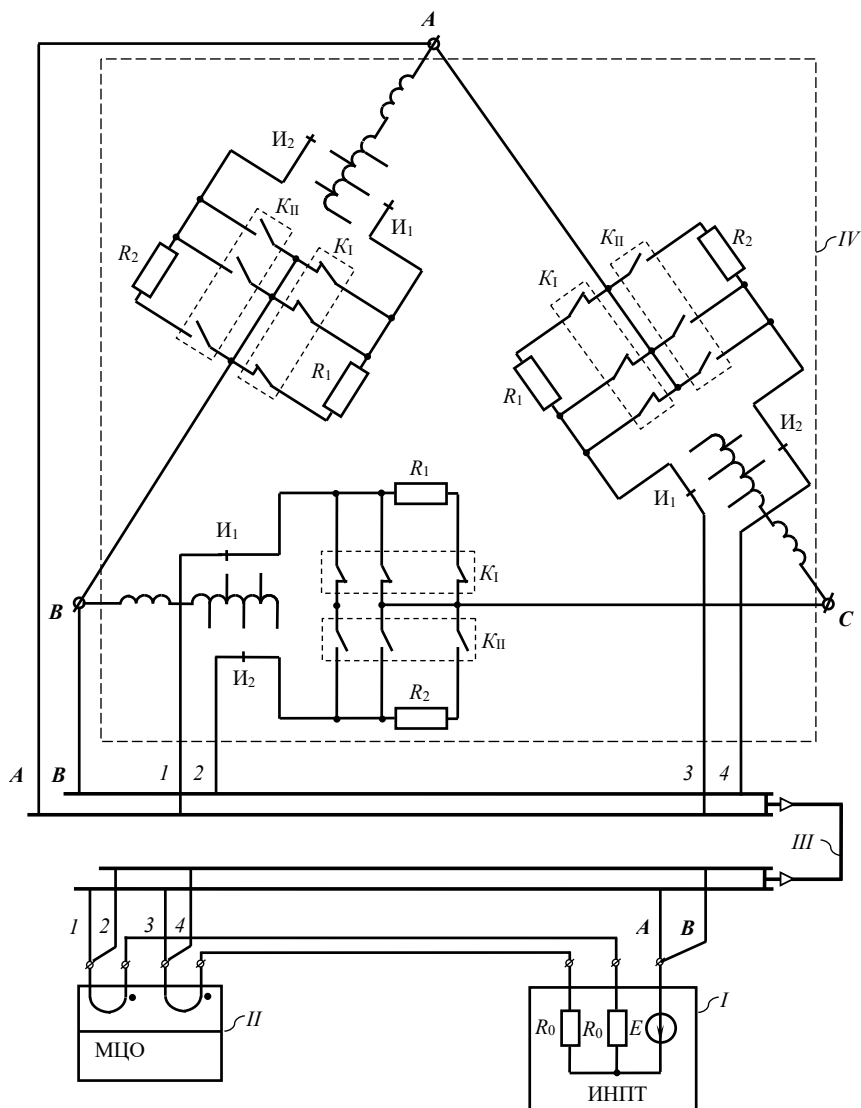


Рис. 3. Схема осциллографирования ПУ, установленного на высоковольтной обмотке трансформатора, собранной по схеме «треугольник»:
 ИНПТ (I) – источник напряжения постоянного тока,
 E, R_0 – ЭДС и его внутреннее сопротивление, соответственно;
 МЦО (II) – многоканальный цифровой осциллограф;
 III – шестижильный кабель, где 1, 2, 3, 4, A, B – его выводы;
 IV – силовой трансформатор с РПН, где K_1 и K_2 – блок контактов контактной системы первого и второго плеча контактора, R_1, R_2 – токоограничивающие резисторы,
 I_1, I_2 – переключатели (избиратели),
 A, B, C – высоковольтные выводы обмотки преобразователя напряжения

Таким ПУ является РПН серии *SDV*. Здесь для регистрации осциллограмм токов в контактной системе необходимо разорвать цепь обмотки, соединённой по схеме в «треугольник», где установлен РПН. Такое решение позволяет исключить наложение осциллограмм разных фаз. Оно осуществляется установкой изолирующих прокладок на левом и правом плече контактной системы одной из фаз после вскрытия бака контактора РПН и слива из него ТМ [12–14, 16].

В качестве изолирующих прокладок электротехнический персонал в эксплуатации применяет обыкновенный картонный лист толщиной в 3 мм, размером 80×200 мм.

В работе [7] предложен способ осциллографирования токов контактной системы трёхфазных РПН типа *SDV* без установки изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными главными, дугогасительными и вспомогательными контактами контактора на одной из его фаз.

Суть способа заключается в направлении токов с первых двух линейных выводов, имеющих одинаковый потенциал, к третьему линейному выводу СТ с целью создания разрыва между первыми линейными его выводами. Подключение осциллографа к выводам контактора таким образом позволяет осциллографировать токи в контактной системе без установки изолирующих прокладок. Использование такой схемы также даёт возможность выявить несинхронную работу контактной системы разных фаз РПН посредством анализа осциллограмм.

Выводы. 1. В России и странах СНГ на сегодняшний день применяются переключающие устройства разных производителей и модификаций, которые требуют индивидуального подхода для определения их работоспособности. Для проведения диагностики регуляторов напряжения под нагрузкой необходимо не только владеть методиками диагностики, но и иметь современные многоканальные цифровые осциллографы со встроенным программным обеспечением и автоматическим запуском регистрации осциллографируемых токов.

2. Использование методов интродиагностики вкупе с цифровым многоканальным осциллографом позволяет определять параметры процесса переключения контактов контактора РПН для схем соединения высоковольтных обмоток в «звезду» и «треугольник».

Литература

1. Колтмен Дж.У. Трансформатор // В мире науки. 1988. № 3. С. 68–76.
2. Методические указания по наладке устройств переключения ответвлений обмоток под нагрузкой (производства НРБ и ГДР) трансформаторов РПН. М.: Союзтехэнерго, 1981. 44 с.
3. Михеев Г.М., Иванова Т.Г., Каландаров Х.У., Турдиев А.Х. Диагностирование переключающего устройства трансформатора // Электрические станции. 2016. № 1(1014). С. 50–56.
4. Михеев Г.М., Шевцов В.М., Баталыгин С.Н., Федоров Ю.А. Диагностика состояния контактных систем РПН силовых трансформаторов путем цифрового осциллографирования // Промышленная энергетика. 2006. № 3. С. 20–22.
5. Михеев Г.М., Шевцов В.М., Федоров Ю.А., Баталыгин С.Н. Методика цифрового осциллографирования процесса переключения контактов РПН типа РНОА-110/1000 // Промышленная энергетика. 2007. № 3. С. 8–11.

6. Михеев Г.М. Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования. М.: ДМК Пресс, 2010. 297 с.

7. Пат. 2643925 РФ, МПК G01R 31/333, C2. Способ снятия осциллограмм токов трехфазного регулятора напряжения под нагрузкой, установленного на обмотке высшего напряжения силового трансформатора, собранной по схеме треугольник, и устройство для его осуществления / Михеев Г.М., Каландаров Х.У., Иванова Т.Г., Турдиев А.Х. № 2015111295; заявл. 27.03.2015; опубл. 06.02.2018, Бюл. № 4. – 13 с.

8. Пат. 2377586 РФ, МПК G01R 31/06, G01R 27/26, C1. Способ определения индуктивности рассеяния трехфазной высоковольтной обмотки силового трансформатора / Михеев Г.М., Шевцов В.М., Батальгин С.Н. [и др.]; заявитель ООО "Инженерный центр". № 2008114112/28; заявл. 10.04.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36. – 11 с.

9. Турсунов Д.А., Исмоилов И.К. Анализ вопросов применения устройств регулирования силовых трансформаторов // Universum: технические науки. 2020. №8-3 (77). С. 8–11.

10. Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А. Методика технического обслуживания и ремонта промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию // Фундаментальные исследования. 2016. № 2. С. 308–313.

11. Широков О.Г., Медведев К.М., Прохорчик М.А. Структура автоматической системы технического диагностирования устройства РПН силового трансформатора // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2012. № 2(49). С. 1–8.

12. Якобсон И.Я. Испытания переключающих устройств силовых трансформаторов. М.: Энергия, 1970. 56 с.

13. Якобсон И.Я. Наладка быстродействующих переключающих устройств силовых трансформаторов. М.: Энергия, 1976. 96 с.

14. Якобсон И.Я. Наладка и эксплуатация переключающих устройств силовых трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 120 с.

15. Cincar N., Milojevic G. On-Load Tap Changer Testing Methods. DV Power, Sweden, 2014.

16. C Rep. 411 VEB Transformatorenwerk "Karl Liebknecht" (TRO) (Bestand). Available at: <https://www.archivportal-d.de/item/UVM2VHVWXWNSEHMLN7D7JX4CMKQQEN2A>.

МИХЕЕВ ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (mikheevg@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2208-9723>).

ДИМИТРИЕВ АНТОН АНАТОЛЬЕВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (Meterling21@mail.ru).

КАЛАНДАРОВ ХУСЕЙДЖОН УМАРОВИЧ – кандидат технических наук, и.о. доцента кафедры электроснабжения и автоматики, Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Таджикистан, Худжанд (huseinjon.86@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4137-3538>).

ФЕДОРОВ ОЛЕГ ВАСИЛЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры управления инновационной деятельностью, Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород (fov52@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5268-6399>).

Georgi M. MIKHEEV, Anton A. DIMITRIEV,
Huseyjon U. KALANDAROV, Oleg V. FEDOROV
ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES AND METHODS
OF DIAGNOSTICS OF ON-LOAD TAP CHANGER
OF POWER TRANSFORMERS

Key words: power transformers, switching devices, on-load tap changer, contactor contacts, multichannel digital oscilloscope, diagnostics, transformer oil, operating staff.

In electrical networks of almost all voltage classes, the main link in the work on the transmission of electrical energy is a power transformer. At the moment, about 60% of them are operated in our country with a significant excess of service life, which increases the requirements for their technical control and diagnostics of all units. Switching devices are an integral part of power transformers. They are necessary to regulate voltage on substation busbars depending on the load of consumers. Not only the reliability of power supply of industrial enterprises, cities and agriculture, but also the quality of electrical energy depends on their operation. At the same time, they are one of the vulnerable nodes of voltage converters. Although the parameters of diagnostic signs for switching devices are not as extensive as the power transformer itself, they nevertheless require special attention from the operating personnel. This is due not only to the variety of switchgear types that exist, but also to the methods used to diagnose them. For this reason in this work an attempt has been made to analyze the existing approaches and methods of diagnosing these mechanical controlled voltage regulators. We propose a new approach in terms of diagnostics of high-voltage equipment, including power transformers – introdiagnostics. It is based on methods of non-destructive (without opening tanks and draining dielectric liquids) control of parameters that characterize the state of electrical equipment. We present an original method of diagnosing the on-load tap changer, based on oscillography and subsequent analysis of operation of the on-load tap changer contact system without draining transformer oil from the diverter switch's tank.

References

1. Koltmen D.U. *Transformator* [Transformer]. Moscow, V mire nauki Publ, 1988, 76 p.
2. *Metodicheskie ukazaniya po naladke ustroystv pereklyucheniya otvetvlenii obmotok pod nagruzkoi (proizvodstva NRB i GDR) transformatorov RPN* [Guidelines for adjusting the tap changers for on-load tap changers (manufactured by the German Democratic Republic and the Republic of Bulgaria)]. Moscow., Soyuztekhnenergo Publ., 1981, 44 p.
3. Mikheev G.M. *Diagnostirovanie pereklyuchayushchego ustroystva transformatora* [Diagnosing of transformer switching device]. *Elektricheskie stantsii*, 2016, no. 1(1014), pp. 50–56.
4. Mikheev G.M. *Diagnostika sostoyaniya kontaknykh sistem RPN silovykh transformatorov putem tsifrovogo ostsillografirovaniya* [Diagnostics of the contact systems of the on-load tap changers of power transformers by digital oscillography]. *Promyshlennaya energetika*, 2006, no. 3, pp. 20–22.
5. Mikheev G.M. *Metodika tsifrovogo ostsillografirovaniya protsessa pereklyucheniya kontaktov RPN tipa RNOA-110/1000* [Technique of a digital oscillograph of the contact change-over process of the tap changer of RNOA-110/1000 type]. *Promyshlennaya energetika*, 2007, no. 3, pp. 8–11.
6. Mikheev G.M. *Elektrostantsii i elektricheskie seti. Diagnostika i kontrol' elektrooborudovaniya* [Power plants and electrical networks. Diagnosis and control of electrical equipment]. Moscow, Dodeka-XXI/DMK Press Publ., 2010, 297 p.
7. Mikheev G.M., Kalandarov Kh.U., Ivanova T.G., Turdiev Kh.U. *Sposob snyatiya ostsillogramm tokov trekhfaznogo regulatora napryazheniya pod nagruzkoi, ustanovlennogo na obmotke vysshego napryazheniya silovogo transformatora, sobrannoi po skheme treugol'nik i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for taking oscillograms of currents of three-phase voltage regulator under load, installed on the highest voltage winding of power transformer, assembled in delta circuit and device for its implementation]. Patent RF, no. 2643925, 2018.
8. Mikheev G.M., Shevtsov V.M., Batalygin S.N. *Sposob opredeleniya induktivnosti rasseyaniya trekhfaznoi vysokovol'noi obmotki silovogo transformatora* [Method for taking oscillograms of currents of three-phase voltage regulator under load, installed on the highest voltage winding of power

transformer, assembled in delta circuit and device for its implementation]. Patent RF, no. 2377586, 2009.

9. Tursunov D.A., Ismoilov I.K. *Analiz voprosov primeneniya ustroystv regulirovaniya silovykh transformatorov* [Analysis of the application of devices regulating power transformers]. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 8-3(77), pp. 8–11.

10. Khismatullin A.S. *Metodika tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta promyshlennykh silovykh transformatorov po tekhnicheskomu sostoyaniyu* [Methodology of maintenance and repair of industrial power transformers by technical condition]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 2, pp. 308–313.

11. Shirokov O.G., Medvedev K.M., Prokhorchik M.A. *Struktura avtomaticheskoi sistemy tekhnicheskogo diagnostirovaniya ustroystva RPN silovogo transformatora* [Structure of automatic system of technical diagnostics of tap changer of power transformer]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo*, 2012, no. 2(49), pp. 1–8.

12. Yakobson I.Ya. *Ispytaniya pereklyuchayushchikh ustroystv silovykh transformatorov* [Esting Switching Devices of Power Transformers]. Moscow, Energiya Publ., 1970, 56 p.

13. Yakobson I.Ya. *Naladka bystrodeistvuyushchikh pereklyuchayushchikh ustroystv silovykh transformatorov* [Adjustment of quick acting switching devices of power transformers]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 96 p.

14. Yakobson I.Ya. *Naladka i ekspluatatsiya pereklyuchayushchikh ustroystv silovykh transformatorov* [Adjustment and exploitation of switching devices of power transformers]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 120 p.

15. Cincar N., Milojevic G. *On-Load Tap Changer Testing Methods*. Sweden, DV Power Publ., 2014, 150 p.

16. C Rep. 411 VEB Transformatorenwerk "Karl Liebknecht" (TRO) (Bestand). Available at: <https://www.archivportal-d.de/item/UVM2VHVWXWNSEHMLN7D7JX4CMKQQEN2A>.

GEORGI M. MIKHEEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Power Supply and Intellectual Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (mikheevg@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2208-9723>).

ANTON A. DIMITRIEV – Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Intellectual Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (Meterling21@mail.ru).

HUSEYJON U. KALANDAROV – Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor, Department of Power Supply and Automation, Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Tajikistan, Khujand (huseinjon.86@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4137-3538>).

OLEG V. FEDOROV – Doctor of Technical Sciences, Professor of Innovation Management Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod (fov52@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5268-6399>).

Формат цитирования: Михеев Г.М., Дмитриев А.А., Каландаров Х.У., Федоров О.В. Анализ существующих подходов и методов диагностирования регуляторов напряжения под нагрузкой силовых трансформаторов // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 61–72. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-61-72.