

УДК 621.314
ББК 31.264-08

А.А. ДИМИТРИЕВ, Г.М. МИХЕЕВ, Х.У. КАЛАНДАРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ОТВЕТВЛЕНИЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА ПО ЗАВОДСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Ключевые слова: силовой трансформатор, регулятор напряжения под нагрузкой, техническое диагностирование, язык программирования Python.

В энергосистемах продолжают эксплуатироваться механические устройства регулирования напряжения под нагрузкой, разработанные в XX в. Данные переключающие устройства устанавливаются преимущественно в нейтралях обмоток силовых трансформаторов 110 кВ и выше, что позволяет снизить класс их изоляции до 35 кВ. Технологические ограничения не позволяют создать полупроводниковые устройства с эквивалентными механическим переключателям характеристиками по номинальному току и количеству коммутационных циклов, что объясняет широкое применение устройств с подвижными контактами. Актуальность разработки новых методов диагностики обусловлена выработанным ресурсом большинства таких устройств. Перспективы развития диагностики силовых трансформаторов связаны с активным внедрением технологий искусственного интеллекта. Представленное исследование вносит значимый вклад в решение этой задачи, предлагая метод сравнительного анализа осциллограмм токов контактной системы переключающих устройств, полученных в эксплуатационных условиях и при пусконаладочных испытаниях. Реализация данного подхода требует проведения дополнительных исследований и применения современных методов программирования.

Цель исследования – разработать и верифицировать метод моделирования переходных процессов при коммутации ответвлений обмотки трансформатора с регулятором напряжения под нагрузкой, основанный исключительно на паспортных данных оборудования, с последующим созданием программного обеспечения для генерации типовых осциллограмм токов контактной системы контактора переключающего устройства.

Материалы и методы. Исследования проводились на основе заводских параметров силового трансформатора и переключающего устройства типа РНТА-35/200. В работе были использованы математические методы и основы теории электрических цепей для расчетов индуктивного и полного сопротивления высоковольтной обмотки преобразователя напряжения, ее индуктивности рассеяния на каждом ответвлении на основе заводских параметров, а также методы функционального программирования для проведения моделирования осциллографируемых токов в процессе переключения переключающего устройства.

Результаты. Представлен инновационный подход к воспроизведению осциллограмм токов контактной системы устройства регулирования напряжения под нагрузкой, основанный на компьютерном моделировании переходных процессов коммутации исключительно по паспортным данным оборудования. Предложенная методика позволяет воспроизводить типовые характеристики осциллографируемых токов, подобных тем, которые получают во время пусконаладочных работ.

Выводы. Исследование подтвердило возможность достоверного моделирования переходных процессов токов при переключении ответвлений регулятора напряжения на основе заводских параметров силового трансформатора и переключающего устройства. Для переключающего устройства типа РНТА-35/200 получена осциллограмма тока переходных процессов, которая может быть типовой для диагностики состояния оборудования методом сравнения с реальными кривыми токов осциллографирования, полученными эксплуатационным персоналом. Разработанная методика позволяет своевременно выявлять износ контактной системы и прогнозировать остаточный ресурс электрооборудования, а также открывает новые перспективы для создания интеллектуальных систем мониторинга состояния устройства регулирования под нагрузкой.

Введение. В современных энергетических системах и электротехнических комплексах силовые трансформаторы (СТ) играют ключевую роль в передаче и распределении электрической энергии. Одним из важных аспектов их работы является возможность переключения ответвлений, что позволяет оптимизировать режимы работы преобразователя напряжения в зависимости от изменяющихся условий нагрузки [1–5].

Техническое диагностирование устройства регулирования под напряжением (РПН) любого производителя является достаточно трудоемким и сложным процессом, и выполнять его могут только высококвалифицированные специалисты, владеющие методами диагностики переключающего устройства (ПУ) и современными многоканальными цифровыми измерительными приборами. Основные проблемы, возникающие в процессе определения технического состояния узлов СТ (РПН в частности), заключаются в том, что, во-первых, на данный момент в электрических сетях нет единой регламентированной методики по определению типа неисправности контактной системы РПН, ее локализации, выдаче оценки о дальнейших действиях для персонала без вскрытия бака ПУ; во-вторых, обслуживающий персонал часто не обладает необходимыми компетенциями для грамотного определения неисправности устройства РПН; в-третьих, на рынке практически отсутствуют современные цифровые средства со встроенным программным обеспечением, предназначенные для диагностики ПУ (многоканальные цифровые осциллографы (МЦО)).

Отдельная проблема заключается в отсутствии у обслуживающего персонала эталонных осциллограмм переходных процессов переключения РПН, которые должны регистрироваться при проведении пусконаладочных работ либо в ходе заводских приемочных испытаний трансформатора. Это затрудняет диагностику при плановом обслуживании и послеаварийном восстановлении. Данные обстоятельства приводят к усложнению проведения технической диагностики высоковольтного преобразователя напряжения, и достоверная оценка технического состояния оборудования может быть обеспечена только высококвалифицированными специалистами в области диагностики.

Цель исследования – разработать и верифицировать метод моделирования переходных процессов при коммутации ответвлений обмотки трансформатора с регулятором напряжения под нагрузкой, основанный исключительно на паспортных данных оборудования, с последующим созданием программного обеспечения для генерации типовых осциллограмм токов контактной системы контактора переключающего устройства.

Материалы и методы. В исследовании использовались преобразователи напряжения с заводскими параметрами и механически программируемое устройство типа РНГА-35/200, учитывались их номинальные параметры и конструктивные особенности. Расчетная часть исследования базировалась на аналитических методах описания переходных процессов токов в RLC-цепях и теории коммутационных процессов в контактных системах ПУ. Разработанный алгоритм численного интегрирования дифференциальных уравнений и анализа электрической схемы замещения методом узловых потенциалов был

реализован на языке Python с использованием математических библиотек NumPy и SciPy, предназначенных для научных вычислений многомерных массивов и различных математических функций. Визуализация результатов моделирования выполнялась средствами встраиваемой бесплатной библиотеки Matplotlib. Для сравнения результатов моделирования с данными заводских испытаний использовались статистические методы.

Результаты исследования. Согласно техническим требованиям производителей оборудования, обязательными процедурами при обслуживании контакторов РПН являются фиксация круговых диаграмм и осциллографирование токов в контактной группе [6]. Традиционно для выполнения второй задачи требуется слив трансформаторного масла (ТМ) из бака контактора, что позволяет подключить измерительные клеммы многоканального осциллографа к токоведущим элементам. Однако такой метод напрямую сопряжен с тяжелыми экологическими рисками из-за возможного попадания нефтепродуктов в окружающую среду. Кроме того, после проведения замеров необходимо выполнить обратную заливку масла, что значительно увеличивает продолжительность работ и увеличивает риск ухудшения электроизоляционных свойств диэлектрической жидкости. Важно отметить, что проведение подобных операций возможно только в благоприятных погодных условиях, что вносит дополнительные ограничения в график обслуживания оборудования.

В последние годы разработаны альтернативные методики осциллографирования токов в контактных системах ПУ преобразователей напряжения, исключающие необходимость вскрытия бака и слив ТМ¹. Эти методы основаны на использовании многоканальных ЦО и позволяют проводить диагностику без нарушения герметичности электрооборудования.

Ключевая особенность новых методик заключается в синхронной регистрации токов всех трех фаз контактной системы относительно выводов высоковольтной обмотки трансформатора. При этом учитываются активное и индуктивное сопротивления обмотки, что влияет на форму осциллограмм токов. Несмотря на то, что индуктивность здесь искажает кривые тока по сравнению с традиционными измерениями, данный подход позволяет точно определить временные параметры работы контактов – момент замыкания, размыкания и длительность переходных процессов. Это стало возможным благодаря анализу постоянной времени переходных характеристик тока, что легло в основу метода, известного как интродиагностика².

¹ См., например: Пат. 2643925 РФ, МПК G01R 31/333, С2. 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.

² См.: Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Михеев Г.М. Оперативная диагностика контактора быстродействующего регулятора силового трансформатора // Электротехника. 2005. № 12. С. 41–47.

На сегодняшний день в России и странах СНГ эксплуатируется широкий спектр устройств РПН, отличающихся конструктивными особенностями и производителями. Наибольшее распространение получили быстродействующие РПН с токоограничивающими резисторами, среди которых можно выделить: болгарские переключатели типа РС; немецкие модели *SDV*, *SAV* и *SCV*; украинские РНОА; российские РНТА-35/200 (производства Тольяттинского трансформаторного завода).

Для исследования возможности воспроизведения характеристик переходного процесса токов при коммутации ответвлений РПН с использованием исключительно паспортных данных СТ и устройства регулирования ПУ нами разработана программа на языке высокого уровня Python. Основная задача программы – создание эталонных осциллограмм токов работы контактной системы ПУ и сравнение их с осциллограммами токов, полученных во время проведения диагностики РПН. Данный способ позволит определять неполадки устройства РПН путем сопоставления характеристик переходного процесса кривых токов, автоматически выявлять нарушения контактной системы механически программируемого устройства, а также выдавать экспертную оценку о виде повреждения и рекомендации эксплуатационному персоналу по дальнейшим действиям.

Ход разработки программного комплекса осуществлялся поэтапно. Сначала была создана базовая математическая модель, позволяющая анализировать простейшие случаи коммутации. Затем на языке Python с использованием библиотек SciPy и Matplotlib была написана программа для численных расчетов и визуализации результатов. Особое внимание уделялось оптимизации вычислительных алгоритмов для обеспечения быстрой обработки данных при сохранении необходимой точности расчетов.

Программа прошла несколько циклов тестирования и верификации. Сначала проводилось сравнение результатов моделирования с аналитическими решениями для упрощенных случаев. Затем выполнялась проверка на соответствие данным заводских испытаний конкретных типов трансформаторов. Финальная версия программы позволяет генерировать эталонные осциллограммы токов для различных режимов работы РПН во время переключений между любыми последовательными ступенями.

Функционал разработанной программы включает три ключевых модуля:

- модуль ввода и обработки исходных данных, преобразующий паспортные параметры оборудования в расчетные величины;
- вычислительный модуль, реализующий численное решение системы дифференциальных уравнений переходного процесса;
- модуль визуализации, формирующий эталонные осциллограммы токов и напряжений при переключениях с одного ответвления РПН на другое.

В начале работы программы задаются параметры СТ, указанные заводом-изготовителем (рис. 1).

В таблице приведены основные расчетные соотношения, применяемые в процессе работы программы.

Параметры трансформатора	Значение
Номинальная мощность трансформатора SHOM кВ·А:	25000
Номинальное высшее напряжение UBH кВ:	115
Номинальное низшее напряжение UHN кВ:	10
Параметры РПН N- шт.:	9
ΔU %:	1.76
Параметры РПН N+ шт.:	9
Потери мощности короткого замыкания ΔPK кВт:	10
Напряжение короткого замыкания uK.SP %:	8
Напряжение короткого замыкания uK.MIN %:	6
Напряжение короткого замыкания uK.MAX %:	10
Сопrotивление ответвления Rotv (Омы):	2
Сопrotивление TP Rtr (Омы):	4
Тау (tau):	10
Тип РПН:	РНТА

Рис. 1. Окно ввода параметров силового трансформатора

Основные расчетные соотношения параметров трансформатора

Определяемая величина	Расчетная формула
Определение диапазона регулирования напряжения на каждом ответвлении устройства РПН, где N – число ступеней регулирования	$\Delta U_{\text{РПН}}^* = \frac{\Delta U_{\text{РПН}} N}{100}$
Определение напряжения на каждом ответвлении устройства РПН	$U = U_{\text{BH}} \left(1 \pm \frac{\Delta U_{\text{РПН}}^*}{N} \right)$
Полное сопротивление обмотки высокого напряжения на номинальной ступени СТ	$Z = \frac{U_{\text{КЗ}}}{100} \frac{U^2}{S_{\text{НОМ}}}$
Активное сопротивление обмотки высокого напряжения на номинальной ступени СТ	$R_{tr} = \Delta P_{\text{КЗ}} \frac{U_{\text{BH}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}$
Реактивное сопротивление обмотки высокого напряжения на номинальной ступени СТ	$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$
Номинальный ток обмотки высокого напряжения СТ	$I = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U}$
Общая (приблизительная) индуктивность рассеяния обмотки высокого напряжения на номинальной ступени СТ	$L_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{к\%}} U}{100I \cdot \omega}$ $L_{so} \cong \frac{L_{\text{общ}}}{2}$

Окно с результатами расчетов приведено на рис. 2.

Далее в программном продукте по воспроизведению характеристик переходного процесса токов при коммутации ответвлений обмотки проводились расчеты параметров схемы замещения контактной системы устройства РПН и трансформатора.

Данные расчеты проводились для формирования кривой тока, подобной кривой тока осциллографирования при переключении ответвлений из одного

положения в другое. На этом этапе были формализованы основные уравнения, описывающие динамику переходных процессов при коммутации контактов ответвлений.

N	U (кВ)	Z (Ом)	R_tr (Ом)	X_tr (Ом)	L_so (мГн)
-9	96.78	74.94	0.09	74.94	24.26
-8	98.81	78.10	0.10	78.10	25.02
-7	100.83	81.34	0.10	81.34	25.80
-6	102.86	84.63	0.11	84.63	26.58
-5	104.88	88.00	0.11	88.00	27.37
-4	106.90	91.43	0.11	91.43	28.16
-3	108.93	94.92	0.12	94.92	28.96
-2	110.95	98.48	0.12	98.48	29.78
-1	112.98	102.11	0.13	102.11	30.59
0	115.00	105.80	0.13	105.80	31.42
1	117.02	109.56	0.14	109.56	32.25
2	119.05	113.38	0.14	113.38	33.09
3	121.07	117.27	0.15	117.27	33.94
4	123.10	121.22	0.15	121.22	34.80
5	125.12	125.24	0.16	125.24	35.66
6	127.14	129.32	0.16	129.32	36.53
7	129.17	133.47	0.17	133.47	37.40
8	131.19	137.69	0.17	137.69	38.28
9	133.22	141.97	0.18	141.97	39.17

Рис. 2. Результаты расчетов параметров силового трансформатора

После определения индуктивного, полного сопротивления и индуктивности рассеяния высоковольтной обмотки преобразователя напряжения для каждого ответвления (на основе паспортных данных) требовалось перейти к анализу параметров переходного процесса. Эти параметры в значительной степени определяются характеристиками контактной системы механически программируемого устройства. Для их исследования разработана электрическая модель контактов контактора, при этом вводятся упрощающие допущения: 1) временные факторы работы контактов не учитываются, поскольку контактор считается безынерционным элементом; 2) в разные моменты переключения контактор может быть представлен в виде активных сопротивлений в эквивалентной схеме.

С учетом принятых допущений, а также расчетных параметров трансформатора и переключающего устройства была построена модель переключения контактов контактора РПН (рис. 3, а), которая позволяет исследовать переходные процессы при коммутации контактов, и реализована для цепи «фаза–ноль» (А–N) высоковольтной обмотки трансформатора относительно его выводов.

При моделировании сознательно были исключены некоторые параметры (сопротивления межобмоточных емкостей, емкости между обмотками и корпусом (баком) и активные сопротивления контактов контактора и переключателя) из-за сложности их учета. Влияние данных факторов на форму кривой и амплитуду переходного тока оказывается незначительным по сравнению с воздействием активного и индуктивного сопротивления обмотки, а также сопротивления токоограничивающего резистора.

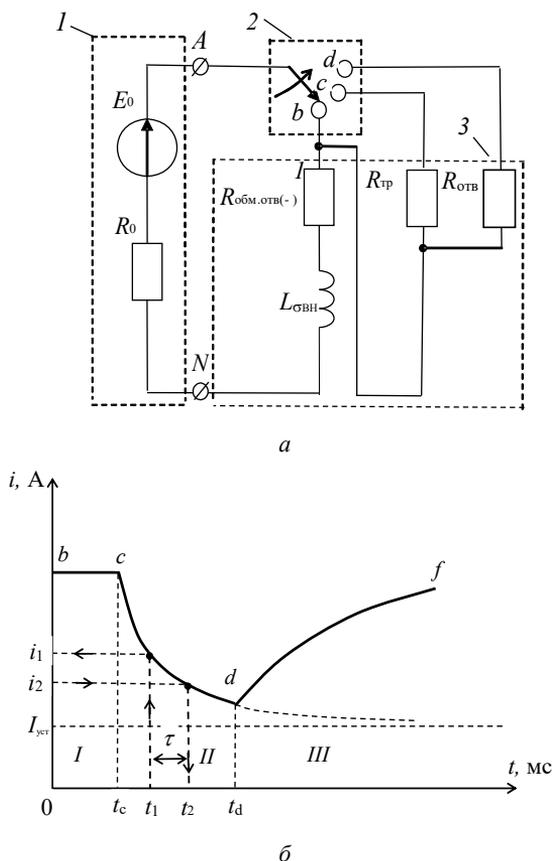


Рис. 3. Модель переключения отвлечения РПН:

a – упрощенная схема замещения цепи «фаза–нейтраль» силового трансформатора относительно высоковольтных вводов с подключенным источником постоянного тока;

б – осциллограмма тока: 1 – источник постоянного тока с внутренней ЭДС E и токоограничивающим сопротивлением R_0 ; 2 – контактор РПН, представленный в виде трехпозиционного переключателя SA1; 3 – обмотка силового трансформатора с индуктивностью L , активным сопротивлением R , токоограничивающим резистором $R_{тр}$

Положения переключателя SA («A-b», «A-c», «A-d») на рис. 3, *a* соответствуют участкам осциллограммы (I, II, III) на рис. 3, *б*. Длительность процесса переключения контактора определяется интервалом между точками «0» и «td».

Процесс работы контактов контактора ПУ в рамках рассматриваемой модели описывается следующими закономерностями:

1. До начала работы контактной системы РПН, когда переключатель SA1 находится в положении «A-b», по цепи высоковольтной обмотки СТ проходит ток

$$i = \frac{E}{R_{\phi} + R_0},$$

где E – напряжение контрольного источника напряжения, В; R_{ϕ} – сопротивление высоковольтной фазы обмотки трансформатора, Ом; R_0 – внутреннее сопротивление источника напряжения, Ом.

2. Переходный процесс обусловлен током в обмотке трансформатора вследствие переключения контактора из положения «*A-b*» в положение «*A-c*» (в дальнейшем время t отсчитывается с момента «своего» переключения):

$$i_2 = \frac{E}{R_\phi + R_0 + R} + \left(\frac{E}{R_\phi + R_0} - \frac{E}{R_\phi + R_0 + R} \right) \cdot \exp\left(-\frac{t(R_\phi + R_0 + R)}{L}\right).$$

3. При переключении контактов в электрической модели из положения «*c*» в «*d*» получим

$$i_3 = \frac{E \left(1 - A_2 \cdot \exp\left(-\frac{t(R_\phi + R_0)}{L}\right) \right)}{R_\phi + R_0},$$

где A_2 – постоянная интегрирования, которая определяется из условия непрерывности тока в индуктивности (все последующие постоянные интегрирования определяются аналогичным образом).

При работе программы доступно окно для выбора моделируемых ступеней (рис. 4).

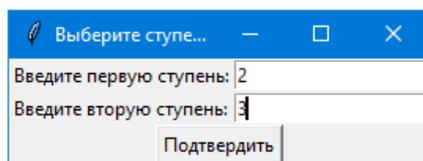


Рис. 4. Окно выбора ступеней устройства РПН для моделирования переходного процесса

На рис. 5 показано графическое отображение результата моделирования процессов переключения ответвлений РПН с использованием заводских параметров СТ.

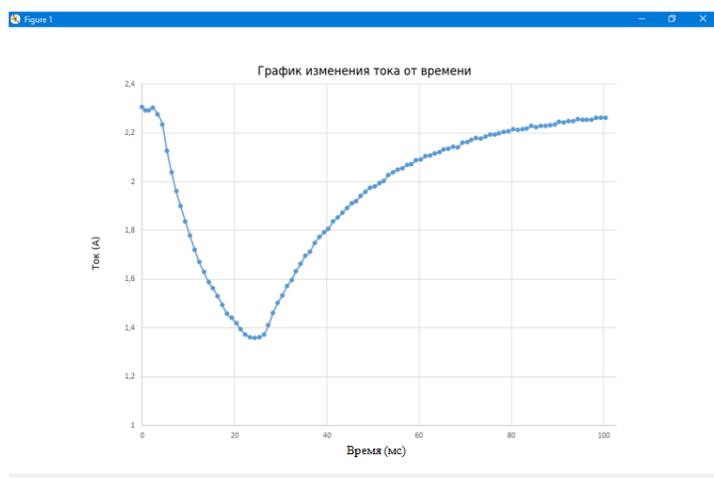


Рис. 5. Графическое отображение результата моделирования процессов переключения ответвлений РПН по заводским параметрам СТ

Процесс верификации методики диагностики РПН направлен на подтверждение соответствия между теоретическими моделями и реальными характеристиками работы переключающих устройств. Основой для сравнения служат смоделированные осциллограммы, построенные на базе паспортных данных трансформатора и параметров РПН, и реальные осциллограммы, полученные в ходе экспериментальных измерений с помощью цифрового осциллографа. Ключевыми параметрами для анализа являются форма кривой переходного тока, постоянная времени процесса переключения и амплитудные значения тока. Рассмотрим осциллограммы РПН РНТА-35/200 трансформатора ТРДН-40000/110, зав. номер № 23591, установленного на п/ст «Южная», г. Чебоксары, приведенные на рис. 6.

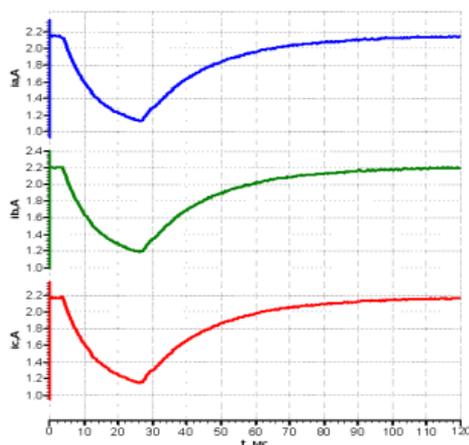


Рис. 6. Осциллограммы РПН РНТА-35/200 трансформатора ТРДН-40000/110, зав. номер № 23591, установленного на п/ст «Южная», г. Чебоксары

Сравнение смоделированных и реальных данных показывает высокую степень совпадения. Например, теоретическая постоянная времени, рассчитанная для участка спада тока, отличается от экспериментально измеренной менее чем на 5%. Такое незначительное расхождение подтверждает точность математической модели и корректность используемых параметров. Амплитудные значения тока также демонстрируют близкие результаты, что свидетельствует о правильном учете сопротивлений обмотки и токоограничивающих резисторов в расчетах.

Таким образом, проведенная верификация подтверждает, что предложенный метод диагностики РПН обеспечивает высокую точность моделирования переходных процессов. Разработанный программный продукт обеспечивает автоматизированное построение эталонных характеристик переходных процессов токов, что, в свою очередь, составляет основу предложенного метода диагностики состояния ПУ.

Выводы. 1. Проведенное исследование подтвердило возможность воспроизведения характеристик переходных процессов тока при коммутации ответвлений РПН исключительно на основе паспортных данных силового трансформатора и переключающего устройства. Разработанная в рамках исследования программа позволила создать универсальный инструмент для генерации эталонных осциллограмм.

2. Ключевым достижением работы стало установление корреляционной связи между заводскими параметрами оборудования и динамическими характеристиками переходных процессов. Это открывает новые возможности для диагностики состояния контактной системы ПУ методом сравнения реальных осциллограмм с эталонными кривыми, полученными расчетным путем.

3. Практическая значимость результатов заключается в создании основ для интеллектуальной системы мониторинга состояния РПН, способной выявлять начальные стадии деградации контактов по отклонениям переходных характеристик. Дальнейшее развитие исследования предполагает расширение базы типовых параметров оборудования, оптимизацию алгоритмов обработки реальных осциллограмм и внедрение методов машинного обучения для автоматизации диагностических решений.

4. Полученные результаты имеют важное значение для повышения надежности работы силовых трансформаторов, снабженных РПН, позволяя перейти от планово-предупредительных ремонтов к системе технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования. Это обеспечит существенную экономию ресурсов при одновременном снижении рисков аварийных отказов в энергосистемах.

Литература

1. Галков А.А., Худогов И.А., Голдобина Е.Р. Классификация устройств РПН // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. 2024. № 6(111). С. 4–11.

2. Галков А.А. Моделирование процесса переключений РПН трансформатора в программном комплексе SimInTech с оценкой достоверности модели путем проведения натурного эксперимента // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4(64). С. 104–114. DOI: 10.20291/2079-0392-2024-4-104-114.

3. Галков А.А. Анализ интенсивности износа устройств РПН серии rs9/rs9.3 в системах тягового электроснабжения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск: Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2024. С. 22–25.

4. Худогов И.А., Галков А.А. Сравнение износоустойчивости устройств «РПН» с гашением дуги в масле и в вакууме // Молодая наука Сибири. 2024. № 2(24). С. 86–92.

5. Худогов И.А., Галков А.А. Системы мониторинга и диагностирования состояния устройств регулирования напряжения под нагрузкой силовых маслонаполненных трансформаторов // Образование – наука – производство: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием). Чита: Иркут. гос. ун-т путей сообщения, 2023. С. 311–316.

6. Лысогор С.Г., Хамитов Р.Н. Проблемы регулирования напряжения силовыми трансформаторами в сетях промышленных предприятий // Инновации. Интеллект. Культура: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. Тюмень: Тюмен. индустриальный ун-т, 2024. С. 81–84.

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

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>).

КАЛАНДАРОВ ХУСЕЙДЖОН УМАРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-энергетических систем, Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, Россия, Чебоксары (huseinjon.86@mail.ru).

Anton A. DIMITRIEV, Georgi M. MIKHEEV, Huseyjon U. KALANDAROV
MODELING OF SWITCHING PROCESSES OF TRANSFORMER WINDING
BRANCHES ACCORDING TO FACTORY SETTINGS

Key words: power transformer, load voltage regulator, technical diagnostics, Python programming language.

Mechanical load voltage regulators developed in the 20th century continue to be used in power systems. These switching devices are mainly installed in the neutral windings of 110 kV and above power transformers, which allows reducing their insulation class to 35 kV.

Technological limitations do not allow the creation of semiconductor devices with characteristics equivalent to mechanical switches in terms of rated current and number of switching cycles, which explains the widespread use of devices with moving contacts. The urgency of development of new methods of diagnostics is conditioned by the exhausted resource of the majority of such devices. The prospects for the development of power transformer diagnostics are connected with the active implementation of artificial intelligence technologies. The presented study contributes to the solution of this problem by proposing a method of comparative analysis of oscillograms of contact system currents of switching devices obtained under operating conditions and during commissioning tests. Realization of this approach requires additional research and application of modern programming methods.

Purpose of the research is to develop and verify the method of modeling of transient processes at switching of transformer winding branches with voltage regulator under load, based solely on the equipment passport data, with the subsequent creation of software for generation of typical oscillograms of contactor currents of the switching device.

Materials and methods. The research was carried out on the basis of factory parameters of power transformer and switching device of RNTA-35/200 type. Mathematical methods and the basics of electrical circuit theory were used to calculate the inductive and total resistance of the high-voltage winding of the voltage converter, its dissipation inductance at each branch on the basis of factory parameters, as well as methods of functional programming to carry out modeling of oscillographic currents in the switching process of the switching device.

Results. An innovative approach to reproduction of oscillograms of currents of the contact system of the voltage regulating device under load based on computer modeling of switching transients based solely on the equipment passport data is presented. The proposed methodology allows to reproduce typical characteristics of oscillograph currents similar to those obtained during commissioning works.

Conclusions. The study confirmed the possibility of reliable modeling of transient currents during switching of voltage regulator taps on the basis of factory parameters of power transformer and switching device. For the switching device of RNTA-35/200 type the oscillogram of transient currents was obtained, which can serve as a typical one for diagnostics of the equipment condition by the method of comparison with real oscillographic current curves obtained by the operating personnel. The developed method allows for timely detection of contact system wear and prediction of the remaining life of electrical equipment, and also opens up new prospects for the creation of intelligent systems for monitoring the state of a control device under load.

References

1. Galkov A.A., Khudonogov I.A., Goldobina E.R. *Klassifikatsiya ustroystv RPN* [Classification of OLTC devices]. *Operativnoe upravlenie v elektroenergetike: podgotovka personala i podderzhanie ego kvalifikatsii*, 2024, no. 6(111), pp. 4–11.
2. Galkov A.A. *Modelirovanie protsessa pereklyuchenii RPN transformatora v programmnom komplekse SimInTech s otsenkoi dostovernosti modeli putem provedeniya naturnogo eksperimenta* [Simulation of OLTC switching process in SimInTech software with model verification through physical experiment]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2024, no. 4(64), pp. 104–114. DOI: 10.20291/2079-0392-2024-4-104-114.
3. Galkov A.A. *Analiz intensivnosti iznosa ustroystv RPN serii rs9/rs9.3 v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya* [Wear rate analysis of RS9/RS9.3 series OLTC devices in traction power supply

systems]. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya energii v usloviyakh Sibiri* [Proc. of Russ. Sci.-Pract. Conf. with Int. Participation «Improving Energy Production and Efficiency in Siberian Conditions»]. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University Publ., 2024, pp. 22–25.

4. Khudonogov I.A., Galkov A.A. *Sravnienie iznosoustoichivosti ustroystv «RPN» s gasheniem dugi v masle i v vakuume* [Comparative wear resistance analysis of oil-type and vacuum-type OLTC devices]. *Molodaya nauka Sibiri*, 2024, no. 2(24), pp. 86–92.

5. Khudonogov I.A., Galkov A.A. *Sistemy monitoringa i diagnostirovaniya sostoyaniya ustroystv regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoi silovykh maslonapolnennykh transformatorov* [Monitoring and diagnostic systems for OLTC devices in oil-filled power transformers]. In: *Obrazovanie – nauka – proizvodstvo* [Proc. of 7th Russ. Sci.-Pract. Conf. (with Int. Participation) «Education – Science – Industry»]. Chita, Irkutsk State University of Railway Transport Publ., 2023, pp. 311–316.

6. Lysogor S.G., Khamitov R.N. *Problemy regulirovaniya napryazheniya silovymi transformatorami v setyakh promyshlennykh predpriyatii* [Voltage regulation issues by power transformers in industrial networks]. In: *Innovatsii. Intellekt. Kultura* [Proc. of 7th Int. Sci.-Pract. Conf. «Innovations. Intelligence. Culture»]. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2024, vol. 1, pp. 81–84.

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).

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>).

HUSEYJON U. KALANDAROV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Transport and Energy Systems, Cheboksary Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Cheboksary, Russia (huseinjon.86@mail.ru).

Формат цитирования: *Димитриев А.А., Михеев Г.М., Каландаров Х.У.* Моделирование процессов переключения ответвлений обмотки трансформатора по заводским параметрам // Вестник Чувашского университета. 2025. № 2. С. 31–42. DOI: 10.47026/1810-1909-2025-2-31-42.