

УДК 621.314

И. Л. ГРОМЫКО, Д. В. МИРОШ, В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, И. С. ЕВДАСЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ЕЕ УВЛАЖНЕНИИ

Анализируются результаты экспериментов с однофазными трансформаторами малой мощности, применяемых при продольном электроснабжении железнодорожных потребителей и в линиях автоматической блокировки. Эксперименты проводились при воздействии влаги на изоляцию обмоток, что значительно влияет на ее сопротивление постоянному току, межобмоточные емкости, тангенс угла диэлектрических потерь, коэффициенты абсорбции и поляризации. Полученные результаты в графическом виде авторы используют в качестве дополнительных исходных данных разработанной системы, основанной на применении сверточных нейронных сетей с целью диагностики, классификации неисправностей трансформаторов и оценки остаточного ресурса.

На сегодняшний день более 50 % трансформаторов системы электроснабжения железнодорожной отрасли страны отработали установленный срок службы – 25 лет, согласно ГОСТ 11677–85. Многие из таких трансформаторов могут эксплуатироваться еще длительное время, однако в этом случае должны предъявляться повышенные требования к методам диагностики их технического состояния.

Существующая система технического диагностирования трансформаторов требует доработки. Это объясняется следующими причинами: используемая на практике нормативная документация по эксплуатации трансформаторов не учитывает в полной мере современных методов по технической диагностике; отсутствием современных знаний по технической диагностике у выпускников высших учебных заведений и низкой квалификации в этой области у лиц, принимающих решения; недоверием к новой организации ремонта и нежеланием уходить от системы организации ремонта энергетического оборудования по регламенту из-за складываемых значительных денежных средств на проведение ремонтных работ по старой схеме; недостаточным количеством, высокой стоимостью современных и эффективных приборов технического диагностирования; плохой организацией повышения квалификации специалистов всех уровней по проблемам технической диагностики оборудования; низкой достоверностью проводимых диагностических работ.

При этом следует помнить, что плановое техническое диагностирование позволяет решить следующие задачи: повысить надежность работающих трансформаторов; сократить время ремонтов; уменьшить количество запасных изделий на предприятиях; увеличить срок службы трансформаторов; значительно сократить стоимость ремонтных работ; исключить повторные дефекты.

В Республике Беларусь и за рубежом в последнее время наблюдается тенденция перехода от планово-предупредительных ремонтов к ремонту по фактическому состоянию оборудования [1]. Для реализации обслуживания оборудования по фактическому состоянию ведутся активные разработки и внедрение автоматизированных комплексных систем диагностики и диагностики, позволяющие в различных режимах без отключения оборудования оценивать его текущее техническое состояние [2, 3]. Такие системы помогают выявлять различного вида дефекты, некоторые – фор-

мировать технические рекомендации по продлению срока эксплуатации, планировать сервисное обслуживание и ремонтные циклы.

Современные автоматизированные системы диагностики состояния трансформаторов и электрических машин чаще всего разрабатываются для конкретного вида оборудования и их применение на других типах оборудования требует трудоемкой настройки библиотеки базы данных и значительной технической доработки. Этот недостаток можно ликвидировать за счет применения самообучающихся интеллектуальных систем. Применение искусственных нейронных сетей позволяет унифицировать диагностические исследования, не прибегая к созданию библиотек баз данных для каждого типа трансформатора. Также оптимизируется применение данных систем за счет простоты практического применения и устранения человеческого фактора при анализе результатов. Причем с ростом числа исследований снижается вероятность ошибки, а системный подход позволяет оценить множество факторов между собой в динамике [4–6].

Большинство производителей программного обеспечения и оборудования в сфере мониторинга состояния трансформаторов достигли значительных результатов. В то же время существующие технологии в сфере программного обеспечения позволяют перейти на качественно новый уровень, связанный с применением алгоритмов машинного обучения.

Состояние изоляции обмоток трансформатора можно оценить, измеряя всего несколько параметров: сопротивление изоляции постоянному току, коэффициенты абсорбции DAR , поляризации PI и диэлектрического разряда DD . Значения этих величин позволяют обнаружить расслоение и загрязнение, определить ток утечки, степень влажности и старения, т. е. сделать вывод о пригодности изоляции к дальнейшей эксплуатации.

В настоящее время разработано, проверено на практике и закреплено в стандартах три метода определения степени увлажненности трансформаторов, связанных с измерением емкостей обмоток трансформаторов [7]. Одним из таких методов испытания является «емкость – время» с помощью прибора ЕВ-3. При этом методе производится заряд емкости изоляции, а затем быстрый разряд и медленный. В первом случае определяется емкость, во втором – прирост емкости за счет абсорбционной емкости, которая успевает проявиться за 1 с у влажного трансформатора, но не успевает у сухого.

Оценка состояния изоляции различными емкостными методами возможна только для волокнистой изоляции (класса А), так как для нее характерна зависимость явления поляризации от увлажненности. У многослойной изоляции класса В явление поляризации значительно и у сухой изоляции, из-за чего емкостные методы в этом случае неэффективны.

Широко используется для оценки состояния волокнистой изоляции обмоток класса А (например, обмоток трансформаторов) емкостно-температурный метод. Он заключается в сравнении величин емкости обмоток при разных температурах, различающихся на 50 °С при условии, что низшая температура не ниже +20 °С. Метод основан на том, что емкость сухой изоляции мало изменяется с нагревом, а емкость влажной изменяется не менее чем на 5–10 %.

Кроме емкостно-температурного метода для оценки состояния волокнистой изоляции класса А используется метод частотной зависимости емкости – метод емкостно-частотный [7]. При этом методе емкость изоляции измеряется на частотах 2 и 50 Гц.

В качестве объекта исследования использовались однофазные трансформаторы малой мощности с воздушным и масляным охлаждением, применяемые при продольном электроснабжении железнодорожных потребителей и в линиях автоматической блокировки. Эксперименты проводились на протяжении десяти суток при температуре 20–25 °С и воздействии относительной влажности 87 %. Испытание изоляции первичной и вторичной обмоток трансформатора повышенной влажностью значительно влияет на ее сопротивление постоянному току, межобмоточные емкости и тангенс угла диэлектрических потерь, коэффициенты абсорбции и поляризации. Параметры изоляции контролировались в течение 10 суток, на основании которых были сформированы графические инструменты, являющиеся исходными данными для сверточных нейронных сетей.

Материал представленных исследований продолжает тематику применения искусственных нейронных сетей с целью диагностирования и классификации неисправностей трансформаторов [8–11].

Таблица 1 – Оценка качества изоляции

Индекс поляризации	Коэффициент абсорбции	Качество изоляции
<1	<1,25	Опасное
1–2		Несоответствующее
2–4	1,25–1,6	Хорошее
>4	>1,6	Отличное

Таблица 2 – Результаты измерений для оценки качества изоляции

Сутки	R_{15}	R_{60}	R_{600}	DAR	PI
	МОм				
0	481	798	2000	1,659044	2,50627
1	273	491	1133	1,798535	2,30754
2	140	245	519	1,750000	2,11837
3	95	180	318	1,894737	1,76666
4	86	133	232	1,546512	1,74436
5	58	104	140	1,793103	1,34615
6	55	65	81	1,181818	1,24615
7	61	66	60	1,081967	0,90909
8	41	47	50	1,146341	1,06383
9	37	40	36	1,081081	0,90000
10	32	30	29	0,937500	0,96667

При испытании изоляции согласно ТКП 181–2009 сопротивление измерялось мегомметром MS5201 (на напряжение 1000 В (ГОСТ 3484.3–88 допускает его применение для измерения сопротивления изоляции трансформаторов с высшим напряжением до 10 кВ включительно). Характерными временными отсечками при выполнении измерений сопротивления изоляции обмоток являлись следующие: 15 секунд после начала измерения (R_{15}); 60 секунд (R_{60}); 600 секунд (R_{600}).

Данные измерения необходимы для определения действительного сопротивления (R_{60}), а также коэффициента абсорбции и индекса поляризации.

Коэффициент абсорбции *DAR* (*Dielectric Absorption Ratio*) – это коэффициент диэлектрического поглощения, отражающий степень увлажненности диэлектрика изоляции. Коэффициент используется для принятия решения о необходимости просушки гигроскопической изоляции электрических машин и трансформаторов. Метод измерения основан на сравнении величин сопротивления изоляции, измеренных через 15 и 60 секунд после начала испытаний:

$$DAR = R_{60} / R_{15}.$$

Индекс поляризации *PI* (*Polarization Index*) показывает способность заряженных частиц перемещаться в диэлектрике под воздействием электрического поля, что определяет степень старения изоляции. Метод измерения основан на сравнении величин сопротивления изоляции через 60 и 600 секунд после начала испытаний:

$$PI = R_{600} / R_{60}.$$

В таблице 1 приведены критерии оценки качества изоляции, основанные на результатах измерений индекса поляризации и коэффициента абсорбции.

Измерения проводились между первичной обмоткой и корпусом, так как данная обмотка находится ближе всех остальных к корпусу. Соответственно, при попадании влаги в первую очередь подвергается ее воздействию изоляция первичной обмотки. В таблице 2 частично приводятся результаты оценки качества изоляции.

Согласно ТКП181–2009 сопротивление изоляции сухих трансформаторов с высшим напряжением до 1 кВ включительно при температуре обмоток 20–30 °С должно быть не менее 100 МОм. Коэффициент абсорбции изоляции трансформаторов с высшим напряжением до 35 кВ и мощностью до 1000 кВ·А, при температуре 10–30 °С должен быть не менее 1,3.

Как видно из таблицы 2, при уменьшении действительного сопротивления изоляции со 104 до 65 МОм происходит резкое уменьшение коэффициента абсорбции с 1,79 до 1,18. Также с уменьшением действительного сопротивления (R_{60}) происходит и постепенное уменьшение индекса поляризации PI . Графики изменений сопротивления и индекса поляризации представлены на рисунке 1.

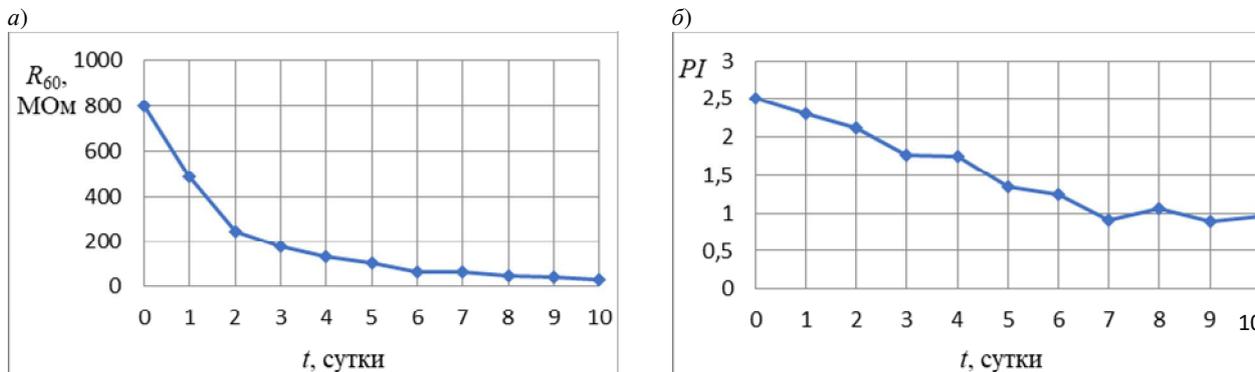


Рисунок 1 – Графики изменений действительного сопротивления (а) и индекса поляризации (б)

Кроме сопротивления изоляции трансформатора были также измерены межобмоточные емкости, представленные на рисунке 2, а и тангенсы угла диэлектрических

потерь на частоте $f = 100$ Гц.

Измерения проводились с помощью RLC -метра MS5308. Часть результатов измерений приведена в таблице 3.

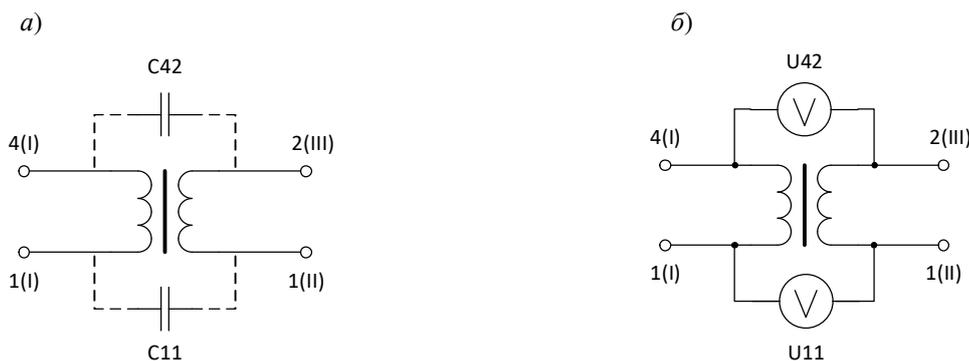


Рисунок 2 – Схема трансформатора ПОбС-5АУ3 с учетом межобмоточных емкостей (а) и межобмоточных напряжений (б)

Таблица 3 – Результаты измерений межобмоточных емкостей и тангенсов углов диэлектрических потерь

Сутки	C11	C42	$tg\delta_{11}$	$tg\delta_{42}$
	пФ			
0	251	251	0,202	0,202
1	328	327	0,267	0,266
2	355	353	0,339	0,336
3	385	384	0,388	0,387
4	405	403	0,445	0,444
5	456	455	0,540	0,544
6	515	512	0,653	0,650
7	541	543	0,674	0,681
8	571	569	0,743	0,728
9	654	653	0,785	0,784
10	746	743	0,890	0,884

Следует отметить, что емкость $C11$ мало отличается от $C42$, так же как и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta_{11}$ от $tg\delta_{42}$.

Как видно из таблицы 3, при воздействии влаги на изоляцию обмотки, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь увеличиваются. С изменением емкостей $C11$ и $C42$, а также сопротивления изоляции, ме-

няться будут и межобмоточные напряжения, схема измерения которых представлена на рисунке 2, б.

Измерения проводились с помощью двухканального осциллографа MDSO ISDS205A.

Для учета не только величин данных напряжений, но и их начальных фаз, были построены фигуры Лиссажу, для различных состояний изоляции трансформатора. Данные фигуры представлены на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, фигуры Лиссажу при нормальном состоянии трансформатора ($R_{60} \geq 100 \text{ МОм}$) практически не отличаются. Фигура Лиссажу с ростом увлажненности изоляции обмоток изменяет свои размеры и наклон.

При этом характер (емкостной, индуктивный или активный) и величина (коэффициент нагрузки изменялся от холостого хода до 1,2 номинальной нагрузки) нагрузки не изменяют данные фигуры (рисунок 4).

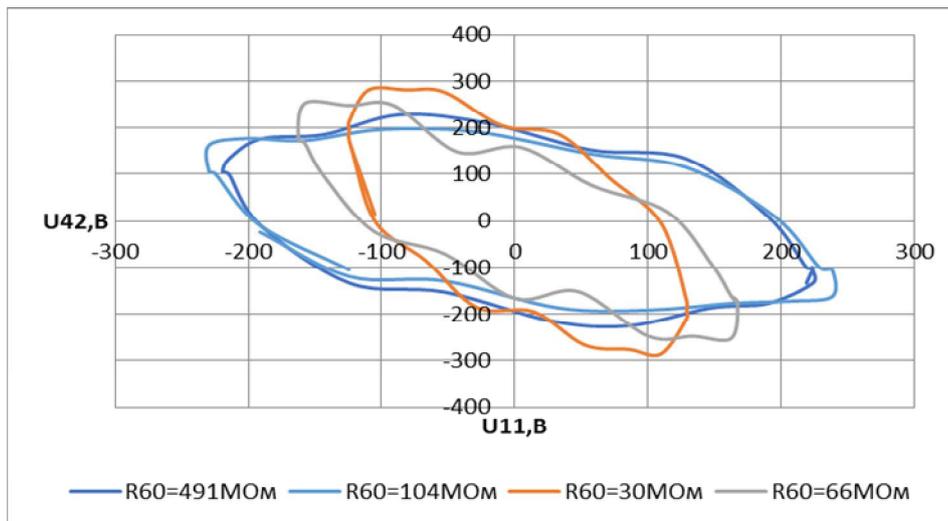


Рисунок 3 – Фигуры Лиссажу межобмоточных напряжений при различных состояниях изоляции трансформатора

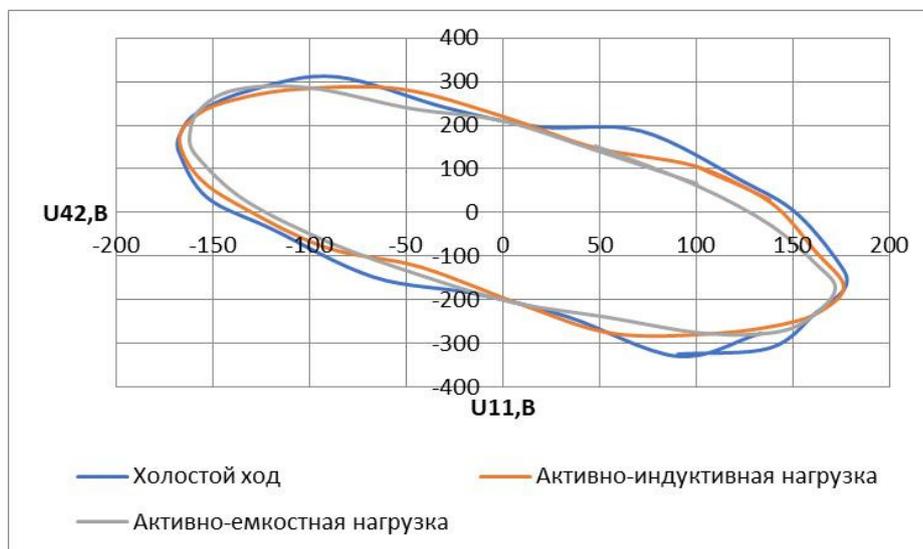


Рисунок 4 – Фигуры Лиссажу при различных видах нагрузки

Полученные фигуры Лиссажу можно использовать для оценки качества изоляции. Данные графические материалы авторы используют в качестве дополнительных исходных данных разработанной системы, основанной на применении сверточных нейронных сетей с целью диагностики, классификации неисправностей трансформаторов и оценки остаточного ресурса [8–11].

Анализ состояния однофазных трансформаторов типа ОЛ и ОМ, применяемых при продольном электропитании железнодорожных потребителей и в линиях автоматической блокировки, можно организовать как при плановых лабораторных испытаниях, так и в полевых условиях.

Разработанная технология представления исходных данных в виде большого числа контролируемых параметров, связанных между собой и изменяющихся по сложным регрессионным зависимостям под воздействием различных факторов (напряжение, температура, влажность и пр.) в виде фигур Лиссажу для сверточных

нейронных сетей, позволяет: сократить затраты на создание и обновление базы данных испытаний; выявлять и классифицировать неисправности; оценивать остаточный ресурс трансформатора; самосовершенствоваться на основе накопления опыта реальных ситуаций.

Список литературы

- 1 Яхья, А. А. Байесовский классификатор как средство повышения эффективности распознавания дефектов в силовых трансформаторах / А. А. Яхья, В. М. Левин // Проблемы энергетики. – 2019. – № 21 (6). – С. 11–18.
- 2 Комбинированные системы сбора передачи технологической и диагностической информации АСУ ТП электроустановок / А. Н. Васев [и др.] // Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (11–12). – С. 16–26.
- 3 Кубарев, А. Ю. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования / А. Ю. Кубарев, А. Б. Акпрова, Ю. Е. Кубарев // Проблемы энергетики. – 2018. – № 20(3–4). – С. 108–115.
- 4 Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях / А. И. Халь-

ясмаа [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 1 (45). – С. 289–300.

5 **Хальясмаа, А. И.** Предпосылки и причины применения методов искусственных нейронных сетей для анализа данных технической диагностики электрооборудования на ПС 35–110 кВ / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Научное обозрение. – 2013. – № 2. – С. 126–131.

6 Оценка состояния силовых трансформаторов на основе анализа данных технической диагностики / А. И. Хальясмаа, [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 114–120.

7 **Казарновский, Д. М.** Испытание электроизоляционных материалов / Д. М. Казарновский. – Л. : Энергия, 1980. – 214 с.

8 **Пехота, А. Н.** Технология использования сверточных нейронных сетей при диагностике состояния трансформаторов / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Вестник

Полоцкого государственного университета. Сер. С. Физико-математические науки (физика). – 2021. – № 7. – С. 63–69.

9 **Пехота, А. Н.** Диагностика трансформаторов с помощью сверточных нейронных сетей / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2021. – № 2. – С. 30–36.

10 **Пехота, А. Н.** Технология применения диагностического комплекса трансформаторов / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2022. – № 3. – С. 26–30.

11 **Галушко, В. Н.** Повышение надежности трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета при межвитковых коротких замыканиях сетей / В. Н. Галушко, И. Л. Громыко, С. И. Зайцев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 85–89.

Получено 15.10.2022

I. L. Gromyko, D. V. Miroch, V. N. Galushko, A. N. Evdasev. Diagnostics of winding insulation quality parameters transformers when its humidification.

The materials of the article analyze the results of experiments with low-power single-phase transformers used in the longitudinal power supply of railway consumers and in automatic blocking lines. The experiments were carried out under the influence of moisture on the insulation of the windings, which significantly affects its resistance to direct current, interwinding capacitances, dielectric loss tangent, absorption and polarization coefficients. The authors use the obtained results in graphical form as additional initial data of the developed system based on the use of convolutional neural networks for the purpose of diagnosing, classifying transformer faults and evaluating the residual life.