

А.А. Раздобреева¹, М.В. Востриков¹, В.А. Тихомиров²

¹ Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

СПОСОБ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ И МОНИТОРИНГА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЯГОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ЗАБАЙКАЛЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Аннотация: В статье рассматриваются способы продления срока эксплуатации тяговых трансформаторов, анализ их текущего состояния на тяговых подстанциях за период 1996-2021 гг. в границах Забайкальской железной дороги. Предложен проект комплексной технической диагностики и оценки остаточного ресурса тяговых трансформаторов с целью прогнозирования рисков развития дефектов и выхода их из строя в условиях пропуска поездов повышенного веса, включающий в себя методологические подходы, аппаратные и программные средства.

Ключевые слова: Тяговый трансформатор, диагностика, дефект, остаточный ресурс, мониторинг, изоляция, тяжеловесное движение, высшие гармоники.

A. A. Razdobreeva¹, M. V. Vostrikov¹, V. A. Tikhomirov²

¹ Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

A METHOD FOR COMPLEX ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE AND MONITORING OF THE RESIDUAL LIFE OF TRACTION TRANSFORMERS ON THE TRANS-BAIKAL RAILWAY WITH THE USE OF MODERN TECHNICAL APPROACHES IN ORDER TO EXTEND THEIR SERVICE LIFE

Abstract: The article discusses ways to extend the service life of traction transformers, an analysis of their current state at traction substations for the period 1996-2021 within the boundaries of the Trans-Baikal Railway. A project of complex technical diagnostics and evaluation of the residual life of traction transformers is proposed in order to predict the risks of defects and their failure in conditions of passing trains of increased weight, including methodological approaches, hardware and software.

Keywords: Traction transformer, diagnostics, defect, residual life, monitoring, isolation, heavy traffic, higher harmonics.

Введение

С 70-х годов прошлого века на Забайкальской железной дороге началась электрификация участка Петровский Завод - Карымская, строительство путевой автоматической блокировки, развитие крупных сортировочных станций Чита-1, Карымская, Уруша, Белогорск, удлинение путей более чем на 100 промежуточных станциях, позволившее увеличить их емкость на 11,5 тысяч вагонов.

Новый век предъявил дороге повышенные требования по пропуску длинносоставных и тяжеловесных поездов, повышению скоростей движения поездов. С этой целью была произведена работа по удлинению и укладке новых приемоотправочных путей, рассчитанных на пропуск поездов длиной 71 условный вагон в четном направлении и 100 вагонов в нечетном, обновлению всей производительной инфраструктуры на шести решающих станциях.

Увеличение веса поезда положительно сказывается на экономике как отдельно взятой железной дороге, так и на ОАО «РЖД» в целом. Пропуск тяжеловесных поездов создает значительные нагрузки на элементы системы тягового электроснабжения (СТЭ), увеличивая износ изоляции тяговых трансформаторов и другого электрооборудования. Кроме того, в отдельные моменты времени, например, при восстановлении графика движения в послеоконный период, в графике движения поездов имеют место режимы сгущения, которые вызывают значительные всплески нагрузок. Это приводит к ненормальной работе тяговых транс-

форматоров, увеличению необходимой потребной мощности – т.е. их перегруз. Несмотря на то, что перегрузка трансформатора в вплоть до полуторократного значения допустима в течение определенного времени, она вызывает многократное увеличение скорости старения твердой изоляции (правило Монтзингера). Силовой (тяговый) трансформатор является одним из важнейших элементов, определяющих надежность электроснабжения. Кроме того, он является одним из наиболее дорогостоящих устройств СТЭ, поэтому своевременная диагностика технического состояния трансформатора, способная обеспечить детальную информацию о состоянии объекта, является актуальной задачей.

Величина и гармонический состав токов в обмотках силовых трансформаторов тяговых подстанций зависит в первую очередь от тяговых токов электровозов. При повышении веса грузовых поездов уровень высших гармоник токов, протекающих по обмоткам тяговых трансформаторов, также увеличится. В результате дополнительного нагрева, вызываемого гармониками, ускоряется износ оборудования, увеличиваются потери электроэнергии, имеют место "скрытые" издержки, которые могут быть значительными. Следовательно, учет неизбежного старения изоляции трансформаторов от воздействия высших гармоник также является актуальной задачей. В настоящее время на сети железных дорог России находятся в эксплуатации около 4500 силовых трансформаторов, в том числе около 2200 трансформаторов на класс напряжения 110-220 кВ. Более 50% отработали установленный стандартами нормативный ресурс 25 лет. На Забайкальской железной дороге общее количество трансформаторов на класс напряжения 110-220 кВ составляет 81. Из них 38 трансформаторов имеют срок эксплуатации 25 лет и более, а 41 трансформатор отработал более 20 лет.

Таким образом, около половины трансформаторов отработали установленный стандартами ресурс. Так как трансформаторы являются одним из наиболее дорогостоящих элементов системы электроснабжения, то наряду с плановой заменой устаревшего оборудования, встает задача продления срока эксплуатации. Решить данную задачу возможно методом ретроспективного анализа отработанного ресурса изоляции трансформаторов. При этом стало бы возможным для каждого трансформатора определить остаточный ресурс изоляции и на основе методов прогнозирования определить вероятностную дату его замены. Существующие методики не в полной мере учитывают изменения свойств твердой изоляции трансформатора в зависимости от отработанного времени, поэтому разработка методов ретроспективного анализа износа изоляции также является актуальной задачей.

Анализ текущего состояния силовых трансформаторов тяговых подстанций Забайкальской железной дороги

Забайкальская железная (ЗабЖД) дорога проходит через Забайкальский край и Амурскую область. Общая протяжённость 3336,1 км. В составе дороги 10 энергоучастков (ЭЧ), обслуживающих 47 тяговых подстанций (ТП).

В настоящее время основным видом силовых трансформаторов, установленных на ЗабЖД, является трансформатор типа ТДТНЖ-40000/220-У1 - трехфазный, с дутьевым охлаждением, трехобмоточный, с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН), с диапазоном регулирования $\pm 9 \times 1,78\%$ со стороны ВН. В таблице 1 приведены годы введения в эксплуатацию силовых трансформаторов.

Таблица 1 - Годы введения в эксплуатацию силовых трансформаторов

ЭЧ	Наименование ТП	Количество	Год ввода	
1	2	3	4	
ЭЧ-6 Хилок	Тарбагатай	2	1974	
	Бада	2	1974	
	Хилок		1	1974
			1	1975
	Харагун		1	1975
			1	1974
	Могзон		1	1985
			1	1974

Продолжение Таблицы 1.

1	2	3	4
ЭЧ-1 Чита	Сохондо	1	1995
		1	2003
	Лесная	1	2006
		1	2005
		1	1988
	Чита	2	1973
	Новая	2	1973
		1	2017
Карымская	1	1983	
	1	1973	
ЭЧ-7 Шилка	Урульга	1	1994
		1	2003
	Размахнино	1	1984
		1	1987
	Шилка	2	1984
	Приисковая	2	1988
Шапка	2	1988	
ЭЧ-11 Чернышевск	Чернышевск	1	1988
		1	2000
	Бушулей	1	1989
		1	1991
	Зилово	2	1989
	Урюм	1	1985
Сбега	1	1989	
ЭЧ-2 Могоча	Ксеньевская	2	1991
		2	1991
	Пеньковская	2	1991
	Могоча	2	1988
	Семиозёрный	2	1988
	Амазар	2	1988
ЭЧ-10 Ерофей Павлович	Чичатка	2	1988
		1	1987
	Аячи	2	1988
	Ерофей Павлович	2	1987
	Большая Омутная	2	1987
ЭЧ-3 Сковородино	Бамовская	2	1987
		2	1986
	Ульручи	1	1974
		1	1986
		1	1988
	Талдан	2	1988
2		1985	
ЭЧ-9 Магдагачи	Гонжа	1	1986
		1	2002
	Магдагачи	-	-
	Сулус	2	1985
	Чалганы	1	1985
		1	1991
	Сиваки	1	1985
Мухинская	1	2002	
ЭЧ-4 Свободный	Шимановская	2	1985
		2	1984
	Свободный	1	1985
		1	1987
	Михайло Чесноковская	1	2006
	2	1984	

Окончание Таблицы 1.

1	2	3	4
ЭЧ-4 Свободный	Белогорск	2	1983
	Короли	1	2003
		1	1983
	Завитая	1	1984
		1	1983
Буря	2	1983	

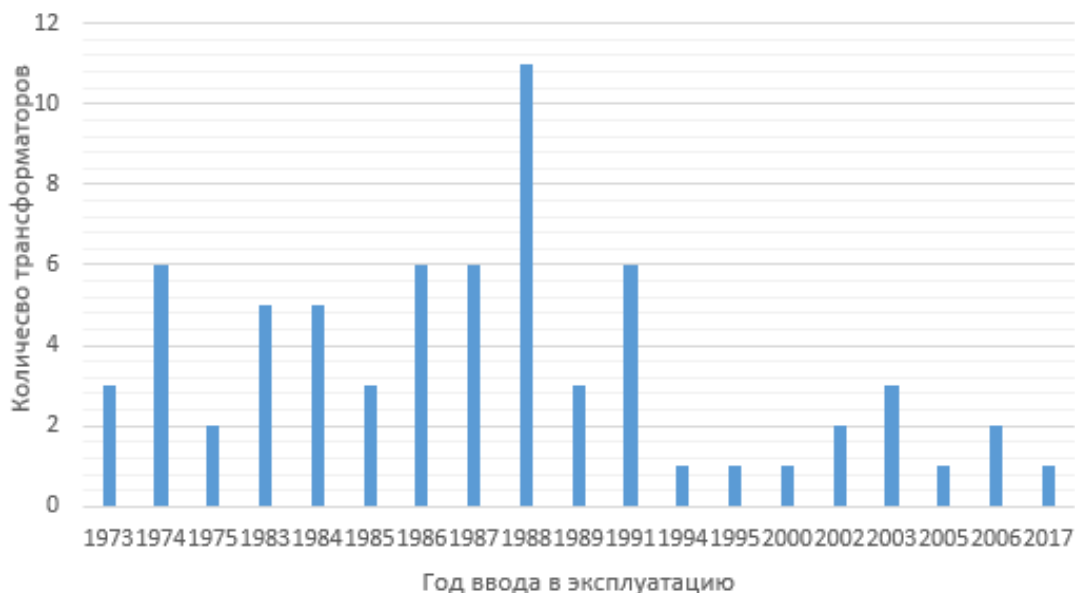


Рис. 1. Ретроспектива монтажа силовых трансформаторов в период электрификации и модернизации Забайкальской железной дороги

По проектной и нормативной документации, согласно [1] срок службы тягового трансформатора составляет 25 лет при соблюдении нормальных условий эксплуатации.

В связи с появлением новых электропоездов, повышением веса поезда и увеличением числа таких поездов повышается уровень высших гармоник, передающихся в тяговую сеть. Это приводит к дополнительному тепловому износу витковой изоляции трансформаторов и возможному преждевременному выходу их из строя. К примеру, в таблице 2 приведем некоторые причины повреждений силовых трансформаторов за последние 25 лет их эксплуатации (рисунок 2).

Таблица 2 - Перечень трансформаторов, прошедших капитальный ремонт в трансформаторном цехе ДКЭЛ ЗаБНТЭ в период 1996-2021 гг.

№ п/п	Дата поступления в ремонт	Заводской номер трансформатора	Тяговая подстанция	Характер повреждения
1	2	3	4	5
1	30.01.1996	14554	Сохондо	Витковое замыкание обмотки ВН фазы «С»
2	05.03.1996	17855	Аячи	Витковое замыкание обмотки ВН фазы «А»
3	25.09.1996	17841	Амазар	Смещение с посадочных мест активной части вследствие динамического удара
4	05.01.1997	18786	Зилово	Механические повреждения в процессе транспортировки, повреждение изоляции отводов обмоток
5	29.12.1997	13568	Белогорск	Нагрев магнитопровода вследствие замыкания пакетов стали активной части

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5
6	17.07.1998	17853	Белогорск	Витковое замыкание обмотки ВН фазы «А»
7	04.09.1998	15452	Чалганы	Смещение активной части вследствие динамического удара, излом распорных винтов магнитопровода
8	24.09.2011	45493	Ледяная	Повреждение ВН фазы «А»
9	23.11.2011	17854	Чичатка	Повреждение РПН повышенным напряжением
10	12.08.2012	17851	Аячи	Повреждение РПН
11	04.06.2013	17840	Ледяная	Короткое замыкание фазы «А» на корпус бака
12	15.08.2014	125157	Чалганы	Выгорание ламелей на РПН
13	22.12.2014	13255	Короли	Межвитковое замыкание ВН фазы «А»
14	14.07.2015	-	Карымская	Разрушение высоковольтного ввода фазы «А», «В»
15	19.11.2015	43568	Аячи	Прибыл без масла, в поддоне пробочина
16	14.12.2017	84-47863	Борзя	Межвитковое замыкание фазы «А»
17	09.01.2019	17855	Аячи	Короткое замыкание ВН фазы «С»
18	29.07.2019	17227	Бамовская	Короткое замыкание ВН фазы «А»
19	01.2021	17588	Аячи	Повреждение высоковольтного вывода фазы «С»

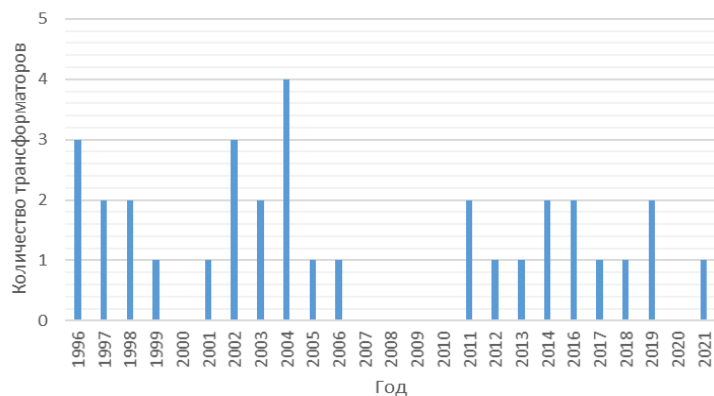


Рис. 2. Трансформаторы, прошедшие капитальный ремонт

Проанализируем число ремонтов однотипных неисправностей у тяговых (силовых) трансформаторов за период с 1996 по 2021 гг. (рисунок 3).

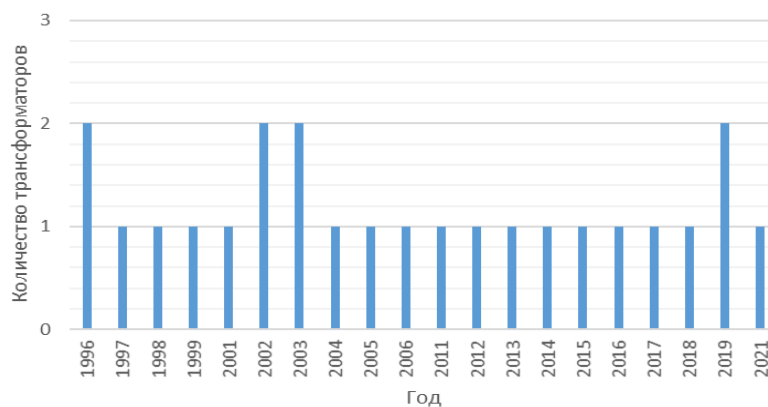


Рис. 3. Трансформаторы с однотипными неисправностями, прошедшие ремонт

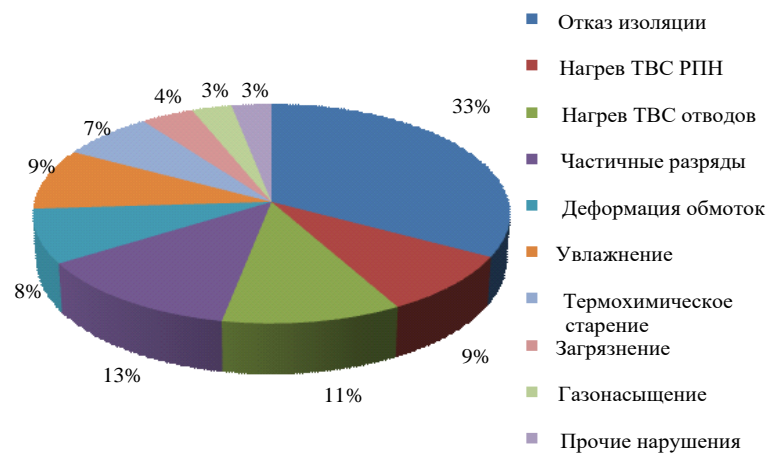


Рис. 4. Основные причины технической неисправности силовых трансформаторов

Анализируя диаграмму (рисунок 4), можно сделать вывод, что наибольший процент (33%) приходится на неисправности связанные с деформацией обмоток, 13% - на неисправности связанные с частичными разрядами, 11% - на неисправности связанные с нагревом токоведущих соединений отводов, 9% - на неисправности связанные с увлажнением масла и нагревом токоведущих РПН, 7% - на неисправности связанные с термохимическим старением изоляции, 4% - на неисправности связанные с загрязнением изолирующей среды, 3% - на неисправности связанные с газонасыщением масла и прочими причинами.

Таким образом, для своевременного диагностирования текущего состояния (остаточного ресурса) силовых трансформаторов и выявления этих дефектов на ранних стадиях зарождения, необходимо использовать все имеющиеся на данный момент приборные (аппаратные) и имитационные (программные) средства [2, 3].

Современные методы и способы диагностики тяговых трансформаторов

Рассмотрим более подробно современные методы мониторинга, средства и обработки результатов диагностики силовых трансформаторов.

1. Метод частичных разрядов.

В настоящее время всё большее внимание уделяется неразрушающим методам диагностики. Характеристики разрядных явлений, главным образом, динамика (их цикличность, зависимость от температуры окружающей среды) при анализе всего потока импульсов на рабочем напряжении за длительный период времени (6-10 месяцев) позволяет оценивать техническое состояние изоляции. Определение формы разрядного явления, обнаруженного при проведении измерений на рабочем напряжении, проводится по структуре импульса от разряда.

После установки датчиков производятся замеры:

- разрядной активности по контрольным точкам по распределениям $n(Q)$;
- выполняется локация зон разрядов по анализу осциллограмм.

Результатом данного метода является следующая информация:

- местонахождение дефекта, расстояние до места повреждения, мощность частичного разряда [4].

2. Тепловизионный контроль силовых трансформаторов.

При тепловизионном контроле электрооборудования должны применяться тепловизоры третьего поколения с разрешающей способностью не хуже $0,1^{\circ}\text{C}$, предпочтительно со спектральным диапазоном 8-12 нм (область относительной спектральной прозрачности атмосферы) [5].

Метод анализа термографических информационных функций позволяет на рабочем напряжении выявлять в активной части трансформаторов скрытые дефекты следующих видов:

- появление магнитных полей рассеяния за счет нарушения изоляции отдельных элементов магнитопровода, возникновение контуров тока по баку (ярмовые балки, дистанцирующие домкраты, консоли, шпильки и др.);

- нарушения в работе охлаждающих систем (маслонасосы, фильтры, двигатели вентиляторов, теплообменники);

- изменения в циркуляции масла в баке (образование застойных областей) в результате конструктивных недоработок, появления шлама, разбухания или смещения изоляции обмоток (актуально для трансформаторов со значительным сроком службы);

- нагревы внутренних контактных соединений обмоток с выводами;

- витковые замыкания встроенных трансформаторов тока;

- дефекты контактной системы РПН, ПБВ;

- повышенные диэлектрические потери в изоляции вводов, разгерметизацию высоковольтных вводов.

3. Хроматографический анализ растворенных в масле газов.

В последнее десятилетие для диагностики состояния трансформатора получил широкое распространение и показал удовлетворительные результаты хроматографический анализ растворенных в масле газов [6, 7].

Во всех случаях главное требование при отборе и доставке пробы масла в лабораторию - обеспечить герметичность и не допустить загрязнения или увлажнения масла. Время хранения пробы до проведения анализа должно быть минимальным (не более суток). Проведя анализ, лаборатория выдает результаты и, как правило, указывает на отклонение от нормы содержания тех или иных растворенных газов.

В настоящее время с помощью хроматографического анализа можно определить две группы повреждений силовых трансформаторов:

а) дефекты твердой изоляции (перегревы и ускоренное старение твердой электрической изоляции, частичные разряды в бумажно-масляной изоляции),

б) перегревы металла и частичные разряды в масле (дефекты токоведущих частей, особенно контактных соединений, магнитопровода и конструкционных частей, в том числе с образованием короткозамкнутых контуров и др.).

4. Виброконтроль силовых трансформаторов.

Рекомендуется использовать виброконтроль для оценки снижения усилий прессовки обмоток и магнитопровода активной части трансформатора, и изменения вибрационных характеристик элементов системы охлаждения.

Виброконтроль следует проводить по РД ЭО 0410-02 [8] в части измерения вибрации трансформатора. Измерение вибрационных характеристик производят на поверхности бака вдоль периметра по его высоте: на уровнях краев и середины обмоток. Точки измерений выбирают с использованием следующих принципов:

- точки должны располагаться между ребрами жесткости трансформатора;

- расстояние между точками не должно превышать 1 м;

- точки должны быть расположены по малым осям трансформатора напротив обмоток вблизи от мест расположения активной части.

Измерения на дне бака проводят по большой оси трансформатора, по осям кареток со стороны ВН и НН, между ребрами жесткости под стержнями магнитопровода.

Характеристики, определяемые для каждой точки:

- среднеквадратичное значение виброускорения;

- среднеквадратичное значение виброскорости;

- среднеквадратичное значение размаха виброперемещения;

- спектр виброускорений;

- спектр виброскоростей.

Состояние каждого трансформатора оценивают индивидуально с учетом состояния его фундамента, способа установки на фундамент, особенностей эксплуатации.

5. Метод акустической диагностики трансформаторов.

Акустическим испытаниям следует подвергать трансформаторы, проходящие приемочные и типовые испытания. Уровни звукового давления и уровни звука измеряют при помощи шумомеров первого и второго классов с полосовыми электрическими фильтрами или измерительными трактами с характеристиками, соответствующими указанным стандартам. Пригодность испытательного помещения определяют при помощи образцового источника шума [9].

Режим холостого хода при акустических испытаниях (по ГОСТ 3484) контролируют при помощи средств измерений. Перед проведением акустических испытаний следует проверить пригодность испытательного помещения путем определения постоянной K . При измерениях уровня звука постоянную K определяют для октавной полосы со среднегеометрической частотой 500 Гц.

6. Метод оценки влажности твердой изоляции.

Производится у трансформаторов напряжением 110 кВ и выше мощностью 40 МВ·А и более. Допустимое значение влагосодержания твердой изоляции вновь вводимых трансформаторов и трансформаторов, прошедших капитальный ремонт - не выше 2%, а эксплуатируемых трансформаторов - не выше 4% по массе (образец твердой изоляции толщиной 3 мм). Влагосодержание твердой изоляции в процессе эксплуатации допускается не определять, если влагосодержание масла не превышает 10 г/т. Периодичность контроля в процессе эксплуатации: первый раз - через 10-12 лет после включения и в дальнейшем - 1 раз в 4-6 лет [10].

7. Контроль магнитного поля разъема бака трансформатора.

Контроль магнитного поля вдоль разъема бака трансформатора производят прибором индикаторного типа ИНМП (измеритель напряженности магнитного поля) при холостом ходе и под нагрузкой. Измерение производят установкой блока датчика вдоль разъема бака в 30-и точках. С помощью приборов ИНМП выполняют измерение модуля вектора напряженности переменного магнитного поля на энергообъектах в целях охраны труда и повышения электробезопасности работ. Отсутствие точек, в которых показания прибора различаются на порядок и более от остальных, свидетельствует об отсутствии аномальных явлений в исследуемой зоне бака [11].

8. Радиоволновый метод

Радиоволновый метод неразрушающего контроля основан на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с объектом контроля. Обычно используются волны сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона с длиной от 1 мм до 100 мм. При использовании этого вида контроля наличие дефектов в исследуемых изделиях приводит к появлению дополнительных отражений электромагнитного поля, которые изменяют интерференционную картину и вызывают дополнительные потери энергии. Недостатком СВЧ метода является сравнительно низкая разрешающая способность устройств, реализующих этот метод, обусловленная малой глубиной проникновения радиоволн в металлы [12].

9. Радиационный метод.

Радиационный метод основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с объектом контроля. В зависимости от природы ионизирующего излучения вид контроля подразделяют на подвиды: рентгеновский, гамма-, бета- (поток электронов), нейтронный. Наиболее широко используют для контроля рентгеновское и гамма излучения. Их можно использовать для контроля объектов из самых различных материалов, подбирая благоприятный частотный диапазон. Эти методы в основном применяются в дефектоскопии, измерении геометрических и структурных особенностей материалов [13].

10. Оптический метод.

Оптический метод основан на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с объектом контроля. Это взаимодействие связано с поглощением, отражением, рассеиванием, дисперсией, поляризацией и др. оптическими эффектами. Данный метод применяют для измерения геометрических параметров изделий, контроля

состояния поверхности и обнаружения поверхностных дефектов. В них обнаруживают макро- и микродефекты, структурные неоднородности, внутренние напряжения. Недостатками оптических методов являются узкий диапазон контролируемых параметров, жесткие требования к состоянию окружающей среды и чистоте поверхности изделия [14].

11. Методы имитационного моделирования.

Одним из методов прогнозирования рисков отказов силового оборудования и его остаточного ресурса является имитационное моделирование. Для реализации поставленных задач можно использовать широкий спектр имеющихся программных оболочек и прикладных пакетов. В настоящее время в качестве косвенной оценки параметров могут быть использованы, в том числе, ПК «КОРТЭС» [15], ПК «02STR.EXE» (разработан на кафедре «ЭЖТ» ИРГУПС») и ПК «ОСРЕСТРА» (разработан на кафедре «ЭлС» ЗаБИЖТ»).

Таким образом, в настоящее время всё большее внимание уделяется неразрушающим методам диагностики, мониторингу и контролю остаточного ресурса силового оборудования.

Несмотря на наличие большого числа методов диагностики тяговых трансформаторов, ни один из них не является совершенным. Каждый из рассмотренных методов решает лишь узкий круг задач. Для получения наиболее полного представления о состоянии трансформатора следует использовать все перечисленные методы в комплексе.

В качестве технического решения, при наличии высших гармоник следует использовать трансформаторы, специально сконструированные для эксплуатации в этих условиях. Эти трансформаторы должны обладать следующими особенностями:

- 1) иметь пониженную расчетную плотность тока;
- 2) иметь электромагнитный экран между первичной и вторичной обмотками на каждом сердечнике;
- 3) сечение нейтрального провода должно быть в два раза больше сечения фазных проводников с учётом увеличенных токов в нейтрале из-за гармоник, кратным трём;
- 4) обмотки трансформаторов конструируют в виде параллельно соединённых проводников меньшего сечения для уменьшения скин-эффекта от высокочастотных гармоник;
- 5) поскольку гармоники приводят к заметным дополнительным потерям, то в конструкции трансформаторов предусматривают специальные виды изолирования и транспозиции проводников.

Подобные трансформаторы, предназначенные для работы в условиях протекания токов гармоник, за рубежом принято ранжировать по так называемому k-фактору [16]. Это фактор может выступать в качестве целесообразного критерия для описания дополнительного нагрева трансформатора, питающего нелинейную нагрузку:

$$K = \sum_{h=1} \left(h \frac{I_h}{I_1} \right)^2, \quad (1)$$

где h – номер гармоники; I_1 – действующее значение тока первой гармоники.

Нормализованный k-фактор определяется по формуле:

$$K = \frac{\sum_{h=1} (hI_h)^2}{\sum_{h=1} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1} (hI_h)^2}{I_{СК}^2}, \quad (2)$$

$$= \frac{\sum_{h=1} (hI_h / I_1)^2}{(I_{СК} / I_1)^2} = \frac{\sum_{h=1} (hI_h / I_1)^2}{1 + THD_1^2}$$

где $I_{СК}$ – среднеквадратичное значение тока.

Коэффициент гармонических искажений:

$$\text{THD}_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}$$

$$\% \text{THD}_I = \sqrt{\sum_{h=2} \left(\frac{\% I_h}{I_1} \right)^2}, \quad (3)$$

Среднеквадратичный поток:

$$\frac{I_{\text{СК}}}{I_{1\text{СК}}} = \sqrt{1 + \text{THD}_I^2} \quad (4)$$

За рубежом трансформаторы, сконструированные для питания нелинейных нагрузок, имеют маркировку, указывающую на величину допустимого к-фактора. Стандартом предусмотрены следующие его значения: 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50. Если, к примеру, при питании нелинейной нагрузки к-фактор превышает 4, возникает необходимость использования трансформатора с соответствующим к-фактором или снижать нагрузку трансформатора.

Понижающий коэффициент, называемый D-рейтингом, вычисляется следующим образом:

$$D = \frac{1.15}{1 + 0.15K}. \quad (5)$$

Таким образом, если, например, $K=4$, то $D=0,718$. При этом можно использовать стандартный трансформатор с максимальной нагрузкой не более 71,8 % или применять трансформатор, сконструированный под к-фактор, равный 4.

Дополнительный нагрев от протекания токов гармоник можно оценить по величине D. Ток величиной $0,718I_{\text{ном}}$ приводит к такому же нагреву и, соответственно, износу, что и номинальный ток без гармоник. Следовательно, действующее значение тока, по которому должен оцениваться износ трансформатора, следует пересчитывать по формуле:

$$I_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{ном}}}{D_{\text{расч}}}. \quad (6)$$

Расчётные значения D можно отслеживать посредством замера тока гармоник, протекающих через обмотки трансформатора. Если гармонический состав тока фидеров тяговой нагрузки стабилен, величину D следует вычислить заранее, а контроль гармоник тока фидеров тяги не проводить.

Очевидно, что в границах электрических железных дорог имеются регионы, характеризующиеся различными значениями к-фактора, что обусловлено, помимо источников гармоник от преобразователей электроподвижного состава, наличием мощных нелинейных нагрузок, например, алюминиевых заводов.

Заключение

В данной работе предлагается проект комплексной технической диагностики и оценки остаточного ресурса трансформаторов тяговых подстанций с целью прогнозирования рисков в условиях пропуска поездов повышенного веса, включающий в себя аппаратные и программные средства, а также предложено техническое решение по использованию специализированных трансформаторов, работающих в условиях протекания высших гармонических составляющих тока и напряжения. Анализ текущего состояния тяговых трансформаторов выявил, что большая их половина уже отработала свой паспортный срок службы, а оставшиеся потенциально приближаются к зоне риска. Имеющаяся на данный момент диагностическая аппаратура не в полной мере позволяет оценить реальную картину общего состояния,

поэтому предлагается совместное использование всех приборных и аппаратных комплексов, что в свою очередь позволит оперативно оценить остаточный ресурс и спрогнозировать вероятность развития возможных дефектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 51559-2000. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ МАСЛЯНЫЕ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ 110 И 220 кВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЕМ 27,5 кВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Общие технические условия. General-purpose oil-immersed power transformers of 110 and 220 kV and autotransformers of 27,5 kV for electric a.c. railways. General specifications. Дата введения 01.01.2001 г.

2. «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования – Санкт-Петербург.: ПЭИПК. 2004 г. 202 с.

3. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2020. 184 с.

4. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ. ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ. High voltage test techniques. Partial discharge measurements. Дата введения 01.01.2014 г.

5. РД 153-34.0-20.363-99. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ИНФРАКРАСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ВЛ. Дата введения 01.06.2000 г.

6. РД 153-34.0-46.302-00. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ДИАГНОСТИКЕ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГАЗОВ, РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ. Дата введения 01.01.2011 г.

7. РД 34.46.303-98. Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. Дата введения 01.09.2013 г.

8. РД ЭО 0410-02. Методические указания по оценке состояния и продлению срока службы силовых трансформаторов. Дата введения 23.12.2002 г.

9. Черемисин В.Т., Кузнецов А.А. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ИМИТАТОРА ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. Инновационные транспортные системы и технологии. М.: 2020 г., с. 105 – 108.

10. ГОСТ Р 57659-2017. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В ЦЕЛЯХ ПРОДЛЕНИЯ НАЗНАЧЕННОГО СРОКА СЛУЖБЫ. Часть 1. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения железной дороги. Дата введения 14.09.2017 г.

11. СТО 70238424.27.140.039-2009. ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ. ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НОРМЫ И ТРЕБОВАНИЯ. Дата введения 31.12.2009 г.

12. ГОСТ 25313-82. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. КОНТРОЛЬ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ РАДИОВОЛНОВОЙ. Термины и определения. Radiowave non-destructive testing. Terms and definitions. Дата введения 01.07.1983 г.

13. ГОСТ Р 55776-2013. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. КОНТРОЛЬ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ РАДИАЦИОННЫЙ. Термины и определения. Radiation non-destructive inspection. Terms and definitions. Дата введения 01.07.2015 г.

14. ГОСТ Р 58399-2019. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. КОНТРОЛЬ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ. Методы оптические. Общие требования. Дата введения 17.04.2019 г.

15. Комплекс расчётов тягового электроснабжения. Общее руководство пользователя. – М.: ВНИИЖТ, 2003. – 12 с.

16. «Автоматизированный контроль и управление режимами работы трансформаторов тяговых подстанций»./ Материалы диссертации к.т.н. Сузгаева М. В. - ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), г. Хабаровск, 2008 г.

REFERENCES

1. GOST R 51559-2000. THE STATE STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION. Oil POWER TRANSFORMERS OF VOLTAGE classes 110 and 220 kV and autotransformers WITH voltage OF 27.5 kV FOR AC ELECTRIC RAILWAYS. General technical conditions. General-purpose oil-immersed power transformers of 110 and 220 kV and autotransformers of 27,5 kV for electric a.c. railways. General specifications. Date of introduction 01.01.2001

2. "Methods and means of assessing the condition of power equipment – St. Petersburg.: PEIPK. 2004 202 p .

3. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii [Monitoring systems for power transformers of traction substations]. Irkutsk, 2020. 184 p

4. GOST R 55191-2012 (IEC 60270:2000). NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION. HIGH VOLTAGE TEST METHODS. MEASUREMENTS OF PARTIAL DISCHARGES. High voltage test techniques. Partial discharge measurements. Date of introduction 01.01.2014

5. RD 153-34.0-20.363-99. THE MAIN PROVISIONS OF THE TECHNIQUE OF INFRARED DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND OVERHEAD LINES. Date of introduction 01.06.2000

6. RD 153-34.0-46.302-00. GUIDELINES FOR THE DIAGNOSIS OF DEVELOPING DEFECTS IN TRANSFORMER EQUIPMENT BASED ON THE RESULTS OF CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS OF GASES DISSOLVED IN OIL. Date of introduction 01.01.2011

7. RD 34.46.303-98. Guidelines for the preparation and conduct of chromatographic analysis of gases dissolved in oil of power transformers. Date of introduction 01.09.2013

8. RD EO 0410-02. Methodological guidelines for assessing the condition and extending the service life of power transformers. Date of introduction 23.12.2002

9. Cheremisin V.T., Kuznetsov A.A. MEASUREMENT OF PARAMETERS OF ACOUSTIC SIGNALS OF THE SIMULATOR OF DEFECTS OF POWER TRANSFORMERS. Innovative transport systems and technologies. Moscow: 2020, pp. 105 – 108.

10. GOST R 57659-2017. NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION. METHODS OF TESTING RAILWAY TRANSPORT FACILITIES IN ORDER TO EXTEND THE ASSIGNED SERVICE LIFE. Part 1. Power transformers and autotransformers of traction substations, transformer substations and linear traction power supply devices of the railway. Date of introduction 14.09.2017

11. SRT 70238424.27.140.039-2009. HYDROELECTRIC POWER PLANTS. EXTENSION OF THE SERVICE LIFE OF THE MAIN EQUIPMENT DURING OPERATION NORMS AND REQUIREMENTS. Date of introduction 31.12.2009

12. GOST 25313-82. INTERSTATE STANDARD. NON-DESTRUCTIVE RADIO WAVE CONTROL. Terms and definitions. Radiowave non-destructive testing. Terms and definitions. Date of introduction 01.07.1983

13. GOST R 55776-2013. NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION. NON-DESTRUCTIVE RADIATION CONTROL. Terms and definitions. Radiation non-destructive inspection. Terms and definitions. Date of introduction 01.07.2015

14. GOST R 58399-2019. NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION. NON-DESTRUCTIVE TESTING. Optical methods. General requirements. Date of introduction 17.04.2019

15. Complex of calculations of traction power supply. General user manual. – M.: VNIIZhT, 2003. – 12 p.

16. "Automated monitoring and control of operation modes of transformers of traction substations"./ Materials of the dissertation of Candidate of Technical Sciences M. V. Suzgaev - State Educational Institution of Higher Education "Far Eastern State University of Railways" (DVGUPS), Khabarovsk, 2008.

Информация об авторах

Раздобреева Анастасия Андреевна – студентка группы СОД.1-18-1, факультет очного обучения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: nastya.razdobreeva.00@gmail.com

Востриков Максим Викторович – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: vostrikov_m@zab.megalink.ru

Тихомиров Владимир Александрович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tikhomirov_va@irgups.ru

Information about the authors

Razdobreeva Anastasia Andreevna – student of the group SOD. 1-18-1, Faculty of Full-time Education, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: nastya.razdobreeva.00@gmail.com

Vostrikov Maxim Viktorovich – Senior Lecturer of the Department of Power Supply, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, e-mail: vostrikov_m@zab.megalink.ru

Tikhomirov Vladimir Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of "Electric Power Engineering of Transport", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tikhomirov_va@irgups.ru