

УДК 111 222 333 444.555

ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕТЕРМИНАЦИИ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ОСЦИЛЛОГРАММ ОТКЛИКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТОДОМ НАНОСЕКУНДНЫХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Ковригин Борис Леонидович¹,
kovriginb@mail.ru

Лавринович Алексей Валериевич²,
rembon@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ОАО «ТОМСКИНИПНЕФТЬ»,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью контроля механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Нарушение геометрии катушек влечёт за собой изменение изоляционных расстояний, вследствие чего уменьшается срок службы изоляции, могут произойти повреждения вплоть до появления межвитковых замыканий. Обнаружить такие дефекты в обмотках на стадии их зарождения является важной и сложной задачей, которая до настоящего времени не решена. Известен метод наносекундных низковольтных импульсов, который считается наиболее чувствительным и перспективным методом обнаружения таких дефектов, но при сравнении полученных этим методом осциллограмм не всегда понятно, отличаются ли они достаточно, чтобы сделать вывод о возможной неисправности испытуемого силового трансформатора.

Цель исследования: разработать методику обработки осциллограмм по результатам диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов методом наносекундных низковольтных импульсов.

Объекты: осциллограммы по результатам диагностики механического состояния обмоток силового трансформатора ТМ-160/10-У1 методом наносекундных низковольтных импульсов.

Методы: метод наносекундных низковольтных импульсов для получения осциллограмм отклика силового трансформатора; анализ и сравнение полученных данных посредством расчета коэффициента детерминации; применение коэффициента детерминации для количественной оценки отличий сравниваемых осциллограмм.

Результаты. Применяя коэффициент детерминации, обработаны экспериментальные осциллограммы откликов на наносекундный зондирующий импульс низкого напряжения, полученных при диагностике трансформатора ТМ-160/10-У1 (длительность импульса 500 нс, длительность фронта 10–20 нс). Использование коэффициента детерминации позволило произвести количественную оценку при сравнении осциллограмм. Сформирован метод, позволяющий без специальной подготовки обслуживающего персонала более точно определять отличия откликов исправного трансформатора от откликов для трансформатора, имеющего дефекты обмоток.

Ключевые слова:

Энергоэффективное преобразование электроэнергии, силовой трансформатор, диагностика, метод низковольтных наносекундных импульсов, коэффициент детерминации, отклик, осциллограмма, дефектограмма, нормограмма.

Введение

Одним из критериев обеспечения энергоэффективного преобразования электроэнергии на местах добычи полезных ископаемых является бесперебойная работа электрической сети. Силовые трансформаторы – это ключевой элемент любой энергосистемы, наличие неисправностей которого необходимо регулярно проверять. При аварийных режимах работы трансформатора его обмотки подвергаются сильным электродинамическим воздействиям, во время которых механические напряжения зачастую превышают предел упругости материала обмоток, вследствие чего геометрия катушек нарушается. Изменяются изоляционные расстояния, вследствие чего в межвитковой изоляции могут значительно измениться средние значения напряженности электрического поля, заложенные при разработке и производстве трансформатора. Повышение средней напряженности электрического поля в некоторых точках изоляции приводит

к уменьшению её срока службы вплоть до появления межвиткового замыкания и выходу трансформатора из строя. Поэтому крайне важно фиксировать такие изменения на раннем этапе их развития [1–4]. Обнаружение таких дефектов в обмотках на стадии их зарождения является сложной задачей, которая до настоящего времени не решена. Известен метод наносекундных низковольтных импульсов (ННВИ), который считается наиболее чувствительным и перспективным методом обнаружения таких дефектов [5, 6]. Причина высокой чувствительности к малым изменениям геометрии или к слаборазвитым межвитковым замыканиям заключается в том, что даже при сравнительно небольших изменениях межвитковых и других емкостей меняется форма отклика сигнала по сравнению с формой отклика, полученной для трансформатора без дефектов [7–10]. Также известно, что чувствительность повышается при уменьшении фронта зондирующего импульса [11].

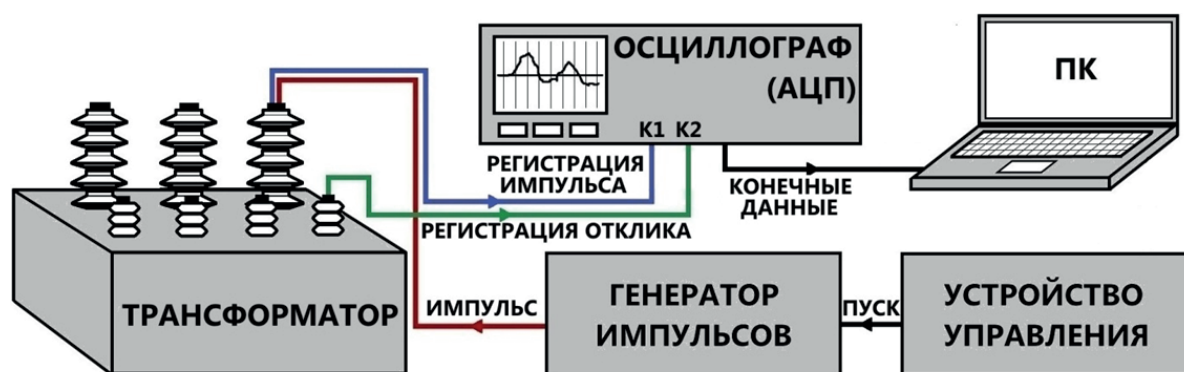


Рис. 1. Практическая реализация метода ННВИ

Fig. 1. Implementation of the Nanosecond Low Voltage Impulse (NLVI) testing

Практическая реализация метода ННВИ описывается на рис. 1. Производится запуск генератора зондирующих импульсов через устройство управления, подключенное к входу генератора «Пуск». С выхода генератора «Импульс» прямоугольный наносекундный зондирующий импульс поступает на обмотку трансформатора. С этого же ввода сигнал через измерительный кабель и делитель K1 поступает на 1-й осциллограф. Отклик обмоток на воздействие зондирующего импульса поступает через измерительный кабель и делитель K2 на второй осциллограф. Конечные данные передаются с осциллографов на ПК. Осциллограммы отклика, полученные на заведомо исправном трансформаторе, принято называть «нормограммами». Осциллограммы, полученные при диагностике состояния трансформатора после получения «нормограмм», принято называть «дефектограммами». Сравнение дефектограммы с нормограммой позволяет оценить текущее состояние испытуемого объекта [12].

В работе [13] предпринята попытка предложить обработку результатов ННВИ сравнением осциллограмм, полученных с исправного трансформатора и с этого же трансформатора, но по истечении некоторого срока эксплуатации. Разница между нормограммой и дефектограммой, приведенная в указанной работе, незначительна и лежит в пределах погрешности измерений. Метод, описанный в работе [13], не получил дальнейшего развития, т. к. обработка результатов испытаний силового трансформатора методом ННВИ указанным способом выполняется сложными графическими вычислениями с применением визуального анализа осциллограмм отклика (визуальное выявление локальных минимумов и максимумов на осциллограмме отклика, нахождение и сопоставление времени начала переходных процессов, визуальное нахождение отличий, субъективная оценка степени отличия). Результаты анализа указанным в работе [13] способом не дают однозначного ответа о наличии изменений в геометрии обмоток, сравнение осциллограмм отклика может занимать достаточно много времени. Сравнивая полученные осциллограммы, не всегда понятно, отличаются ли они достаточно, чтобы сделать вывод о возможной

неисправности испытуемого силового трансформатора [14]. Для служб диагностики и эксплуатации высоковольтных силовых трансформаторов необходим метод, который позволял бы, обработав результаты диагностики трансформатора по методике ННВИ, получить численный показатель, определяющий дальнейшую пригодность эксплуатации трансформатора по результатам диагностики этим методом ННВИ.

По мнению авторов, одним из таких численных показателей может быть коэффициент детерминации, который позволяет произвести количественный анализ данных, полученных в различных сериях экспериментов [15, 16]. Метод коэффициента детерминации основан на сравнении двух осциллограмм посредством применения квадрата коэффициента корреляции Пирсона R^2 , суть которого заключается в корреляционно-регрессионном анализе, отражающем влияние вариации результативного признака Д (дефектограмма) на факторный признак Н (нормограмма). Расчет коэффициента корреляции Пирсона производится по формуле:

$$R = \frac{\sum (H_i - H_{\text{средн.}}) \times (D_i - D_{\text{средн.}})}{\sqrt{\sum (H_i - H_{\text{средн.}})^2 \times \sum (D_i - D_{\text{средн.}})^2}}, \quad (1)$$

где H_i – Значение i -й точки построения осциллограммы отклика исправного трансформатора (нормограммы); $H_{\text{средн.}}$ – среднее значение всех точек построения осциллограммы отклика исправного трансформатора (нормограммы); D_i – значение i -й точки построения осциллограммы отклика дефектного трансформатора (дефектограммы); $D_{\text{средн.}}$ – среднее значение всех точек построения осциллограммы отклика дефектного трансформатора (дефектограммы).

Таблица 1. Данные для расчета коэффициента детерминации
Table 1. Data for calculation of determination coefficient

i	Исправный трансформатор Not damaged power transformer	Дефектный трансформатор Damaged power transformer
1	0,14	0,07
2	0,18	0,13
...	...	...

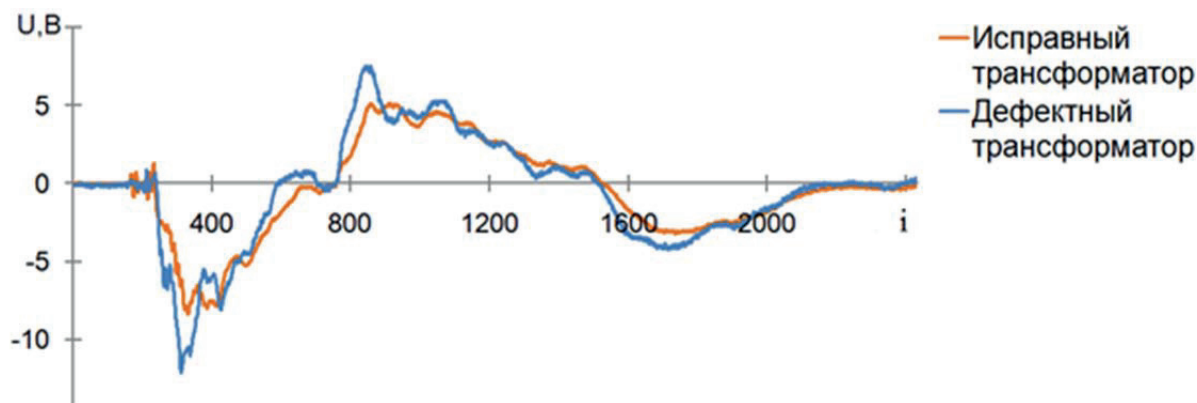


Рис. 2. Сравнение дефектограммы и нормограммы

Fig. 2. Comparison of damaged and not damaged power transformers

Данные для расчета коэффициента детерминации « R^2 » экспортируются из осциллографа, данные которого записываются как в виде изображения осциллограммы отклика (рис. 2), так и в виде массива точек, по которым построена осциллограмма отклика. В случае сравнения дефектограммы с нормограммой значения всех точек построения осциллограмм отклика исправного и дефектного трансформатора формируют в табл. 1. Среднее значение всех точек построения осциллограммы отклика вычисляется как отношение суммы значений всех точек к их количеству. Значения i -ых точек построения осциллограммы отклика берутся из табл. 1, затем производятся вычисления согласно формуле (1).

После формирования таблицы и выполнения расчета коэффициента детерминации для наглядности сравнения можно построить график, на котором в одной координатной плоскости будут представлены осциллограммы отклика исправного и дефектного трансформатора (рис. 2).

Итоговые результаты сравнения представлены на рис. 3.

Для ускорения процесса расчета рекомендуется использовать вычислительные программные комплексы. По мнению авторов, рекомендуемым программным комплексом можно считать Microsoft Excel, т. к.:

- 1) средствами MS Excel можно формировать и хранить таблицы и графики;
- 2) средствами MS Excel можно формировать и хранить базы данных с итоговыми результатами диагностики силовых трансформаторов в виде таблиц и графиков;
- 3) вычисления выполняются одной командой ($=\text{КВПИРСОН}$; $=\text{КОРРЕЛ}^2$);
- 4) Microsoft Excel входит в состав Microsoft Office и на сегодняшний день Excel является одним из наиболее популярных приложений в мире;
- 5) подходит практически на все операционные системы;
- 6) данные осциллографа, содержащие массив точек построения осциллограмм, совместимы с MS Excel;
- 7) данный программный комплекс прост в использовании.

i	ИСПРАВНЫЙ ТР-Р	ДЕФЕКТНЫЙ ТР-Р
1	-0.14	-0.07
2	-0.18	-0.13
3	-0.04	-0.20
4	-0.07	-0.20
5	-0.18	-0.13
6	-0.11	-0.13
7	-0.11	-0.13
8	-0.11	-0.20
9	-0.04	-0.13
10	-0.07	-0.20
11	0.04	-0.20
12	-0.04	-0.07
13	-0.07	-0.13
...	...	...

Рис. 3. Итоговые результаты сравнения

Fig. 3. Final comparison results



При сравнении осциллограмм отклика коэффициент детерминации « R^2 » характеризует величину, отражающую степень идентичности сравниваемых осциллограмм между собой. Коэффициент детерминации может варьировать в пределах от 0 (полное отсутствие идентичности) до +1 (полная идентичность) [17, 18]. Детерминация отличий между двумя осциллограммами по всем точкам их построения позволяет получить значение коэффициента детерминации, который можно использовать как численный результат сравнения [19]. При этом из алгоритма сравнения исключается визуальное выявление локальных минимумов и максимумов на осциллограммах отклика, визуальное нахождение отличий между осциллограммами отклика, субъективная оценка степени отличия осциллограмм отклика. Работа человека в данном случае заключается только в переносе данных из осциллографа в таблицу. Это позволяет выполнять более быстрое и корректное сравнение, не привязанное к человеческому фактору.

Цель исследования: на основе экспериментальных данных оценить целесообразность и возможность применения коэффициента детерминации для обработки результатов диагностики механического состояния обмоток силового трансформатора методом наносекундных низковольтных импульсов.

Применение коэффициента детерминации

Для сравнения взяты осциллограммы испытаний, которые были проведены в цеху по ремонту оборудования Ишимского ТПО ОАО «Тюменьэнерго», г. Ишим, Тюменской области. Трансформатор ТМ-160/10-У1 производства 1993 г., ОАО «Алтранс», г. Барнаул, введенный в эксплуатацию в 1993 г., был испытан методом ННВИ, импульсом длиной 500 нс и фронтом 10–20 нс. Схема подключения установки к трансформатору соответствует схеме, представленной на рис. 1.

В рамках первого эксперимента трансформатор ТМ-160/10-У1 был испытан в неповрежденном состоянии, в этом режиме работы были сняты осциллограммы ННВИ. Импульс подавался последовательно на каждый из его вводов и выводов. Чтобы проверить возможность сравнения одинаковых осциллограмм и исключить возможные погрешности и наводки, на каждый отдельный случай сни-

малось по три осциллограммы отклика. Затем изменяли длину зондирующего импульса и повторяли эксперимент. В рамках второго эксперимента специально были исполнены характерные повреждения трансформатора, такие как: замыкание трех витков, смещение витков в фазе «Авн» в нижней части обмотки, смещение витков в фазе «Авн» в верхней и нижней частях обмотки. Всего было снято около 100 различных осциллограмм отклика для каждого эксперимента. Зондирующий импульс, а также измерительное оборудование были неизменны.

Для рассмотрения возможности применения коэффициента детерминации были взяты первые три осциллограммы отклика, под номерами 0000, 0001 и 0002, соответствующие подаче зондирующего импульса на ввод высшего напряжения трансформатора фазы «Авн» и снятию отклика с ввода низшего напряжения трансформатора фазы «Авн». Осциллограммы отклика исправного трансформатора представлены на рис. 2.

Затем данные осциллограммы были обработаны в программном комплексе Microsoft Excel. Из точек построения осциллограмм был создан массив данных, по которому в одной координатной плоскости были построены все отклики исправного трансформатора. Значения коэффициентов детерминации для этих трёх осциллограмм варьировали в промежутке от 0,997 до 0,998, что говорит об их полной идентичности.

Для остальных экспериментов (межвитковое замыкание, смещение витков вниз обмотки, смещение витков вниз и вверх обмотки) были проделаны такие же действия, в каждом случае коэффициент детерминации находился в промежутке от 0,994 до 0,998. После проделанных вычислений отклики исправного трансформатора сравнивались с откликами поврежденного. Для более точного сравнения было решено использовать осциллограммы, построенные по средним (от трёх первичных осциллограмм) точкам [20]. Сравнение откликов исправного и дефектного трансформатора проходило в одной координатной плоскости. При сравнении осциллограмм друг относительно друга дополнительно отстраиваем таким образом, чтобы по оси времени начало отклика одной осциллограммы совпадало с откликом другой. Это необхо-

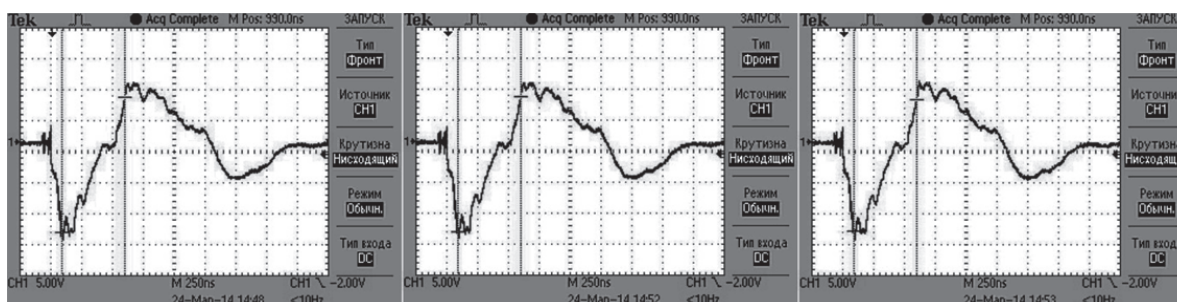


Рис. 4. Осциллограммы отклика исправного трансформатора ТМ-160/10-У1

Fig. 4. Response waveforms of the transformer TM-160/10-Y1 without faults

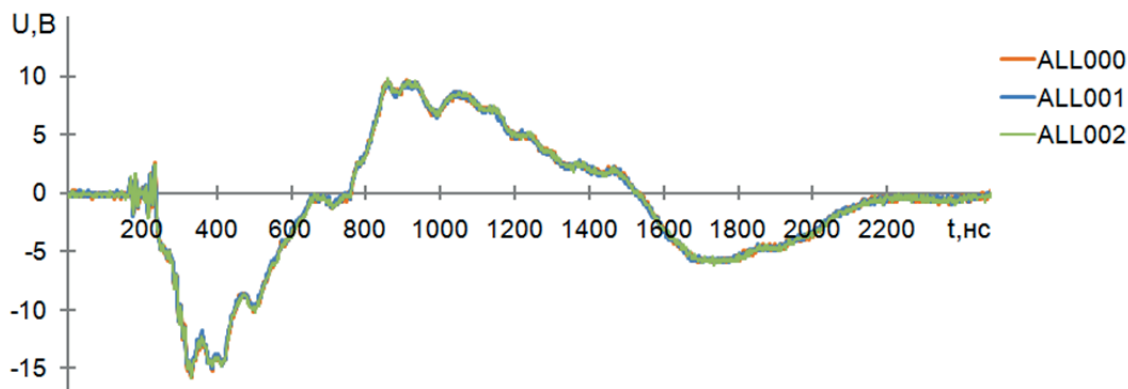


Рис. 5. Отклики исправного трансформатора

Fig. 5. Response waveforms of the not damaged power transformer

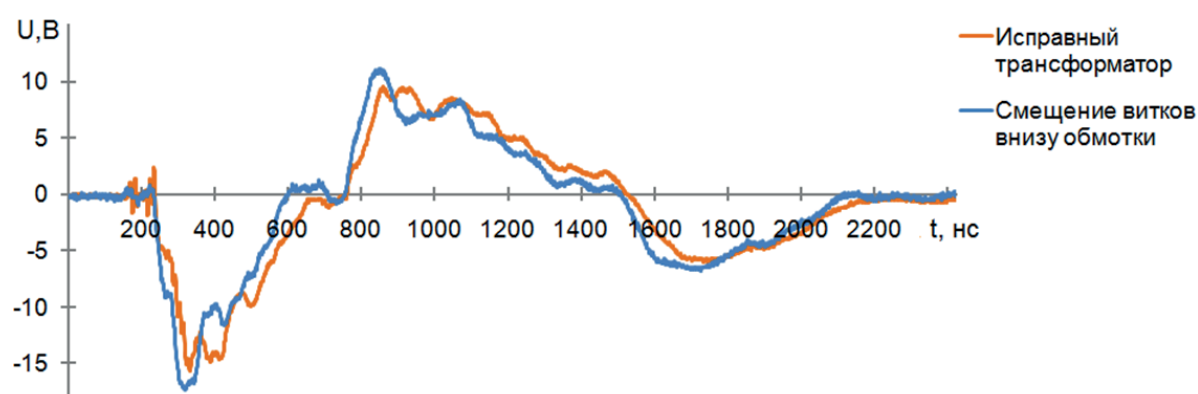


Рис. 6. Сравнение откликов исправного и дефектного трансформатора

Fig. 6. Comparison of response waveforms of damaged and not damaged power transformers

димое условие для применения коэффициента детерминации.

При сравнении откликов исправного трансформатора и трансформатора, имеющего смещение витков вниз обмотки, был вычислен коэффициент детерминации. Получили значение 0,914. Результаты всех экспериментов были занесены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнения исправного и неисправного трансформатора

Table 2. Results of comparison of response waveforms of damaged and not damaged power transformers

Вид повреждений трансформатора Type of transformer faults	Коэффициент детерминации R^2 Coefficient of determination
Смещение витков вниз обмотки Axial deformation of the bottom winding	0,914
Смещение витков вниз и вверх обмотки Axial deformation of the top and bottom windings	0,910
Межвитковое замыкание трех витков Inter turn fault of three turns	0,909
Отсутствие повреждений Not damaged power transformer	0,997

Заключение

Метод ННВИ является перспективным методом диагностики механического состояния обмоток трансформатора и позволяет на ранних стадиях прогнозировать отклонения в геометрии обмоток. Процедура выявления дефектов методом ННВИ заключается в сопоставлении «нормограммы» и «дефектограммы». Чем больше отклонение «дефектограммы» от «нормограммы», тем значительнее изменение геометрии обмотки трансформатора или реактора. Общепринятой методики численной оценки отличия осциллограмм отклика силовых трансформаторов до настоящего времени нет. Наиболее часто используется методика отличия площади «нормограммы» от площади «дефектограммы» за одинаковый промежуток времени. Такой подход требует большого диагностического опыта, занимает достаточно много времени и не дает универсального нормированного критерия идентичности или отличия «нормограмм» и «дефектограмм», получаемых для различных типов трансформаторов. Была поставлена цель разработать методику, позволяющую численно выражать отличие «нормограммы» от «дефектограммы» при обработке осциллограмм по результатам диагностики механического состояния обмоток силовых

трансформаторов методом ННВИ. В результате проведенного обзора существующих методов сравнения массивов экспериментальных данных для сравнения «нормограммы» и «дефектограммы» было предложено использовать коэффициент детерминации. Экспериментальными данными подтверждается, что применение коэффициента детерминации дает наглядное численное значение отличия «нормограммы» от «дефектограммы» при наличии механических дефектов обмотки. При смещении витков обмотки коэффициент детерминации равен 0,914–0,910, при межвитковом замыкании 0,909. При отсутствии дефектов коэффициент детерминации 0,997. Таким образом, нахождение коэффициента детерминации позволяет получить объективную оценку степени отличия «нормограммы» и «дефектограммы», что очень важно для служб эксплуатации и диагностики электро-технического оборудования.

Приведенные примеры обработки осциллограмм диагностики состояния обмоток трансфор-

матора методом ННВИ для разных видов дефектов обмоток трансформатора позволяют утверждать, что предлагаемый подход применения коэффициента детерминации дает численное значение различия осциллограмм, полученных при испытании импульсным методом. Само сравнение происходит алгоритмически проще, быстрее и практически лишено человеческого фактора. Благодаря этому обработка и сравнение осциллограмм отклика не требует большого опыта у выполняющего эту работу человека. Методика позволяет на основе итоговых результатов формировать диагностическую базу данных, это даёт возможность при необходимости достаточно быстро найти необходимые результаты диагностики и всецело с ними ознакомиться. Развитие данной методики позволит улучшить импульсный метод диагностики и сделает его более точным и объективным.

Авторы благодарят В.А. Лавриновича за помощь при подготовке материала статьи и обсуждении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система Стратегического планирования ремонтов. Методика экспертной оценки технического состояния оборудования // ОАО «ФСК ЕЭС». Версия 0.3. – М., 2006.
2. Давиденко И.В., Овчинников К.В. Алгоритм анализа повреждаемости силовых трансформаторов и примеры его реализации // Журнал ЭЛЕКТРО – 2014. – № 4. – С. 13–17.
3. Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов при КЗ // Электричество. – 2006. – № 7. – С. 17–24.
4. Хренников А.Ю. Опыт обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов // Энергетик. – 2003. – № 7. – С. 21–24.
5. Tenbohlen S., Ryder S.A. Making frequency response analysis measurements, a comparison of the swept frequency and LV Impulse methods // 13th International Symposium on HV Engineering, 25–29 August, 2003. – Delft: Elsevier, 2003. – P. 441–449.
6. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems, 10th ed. – New Delhi: Pearson Education, Inc., 2005. – 1035 p.
7. Islam S. Detection of shorted turns and winding movements in large power transformers using frequency response analysis // IEEE PES winter meeting. – Singapore, 23–27 January 2000. – V. 3. – P. 2233–2238.
8. Короленко В.В., Конов Ю.С., Федорова В.П. Обнаружение повреждений трансформаторов при КЗ // Электрические станции. – 1980. – № 7. – С. 22–26.
9. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V., Li Hongda. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse // Resource-Efficient Technologies. – September 2016. – V. 2. – № 3. – P. 111–117.
10. Downhole generator based on a line pulse transformer for electro pulse drilling / D.A. Molchanov, V.A. Lavrinovich, I.V. Lavrinovich, V.F. Vazhov // IEEE Pulsed Power Conference (PPC 2017). – Brighton, Brighton and Hove, UK, 18–22 June 2017. – P. 7–16.
11. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of Pulsed Method for Diagnostics of Transformer Windings based on Short Probe Impulse // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – August 2015. – V. 22. – № 4. – P. 2041–2045.
12. Давиденко И.В., Комаров В.И. Вопросы надежности и диагностики силовых трансформаторов // Диагностика электрических установок: Доклады третьей научно-практической конференции. – Ангарск, 7–11 июля 2008. – С. 6–7.
13. Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов / С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // Журнал Электротехника. – 1990. – № 5. – С. 12–15.
14. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самараэнерго методом низковольтных импульсов // Электрические станции. – 2003. – № 11. – С. 16–18.
15. Орлов А.И. Прикладная статистика. – М.: Изд-во «Экзамен», 2004. – 326 с.
16. Jay L. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, 8th ed. – Boston: Pearson Education Inc., 2011. – P. 508–510.
17. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Изд-во «Юрайт», 2015. – 480 с.
18. Бахрушин В.Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // Системные технологии. – 2011. – № 2 (73). – С. 9–14.
19. Anderson-Sprecher R. Model Comparisons and R² // The American Statistician. – 1994. – V. 48. – Iss. 2. – P. 113–117.
20. Islam A. Detection of Mechanical Deformation in Old Aged Power Transformer Using Cross Correlation Coefficient Analysis Method // Energy and Power Engineering. – 2011. – № 3. – P. 585–591.

Поступила 22.11.2017 г.

Информация об авторах

Ковригин Б.Л., аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского томского политехнического университета.

Лавринович А.В., инженер первой категории отдела по оборудованию ОАО «ТОМСКНИПИНЕФТЬ».

UDC 111 222 333 444.555

COMPARISON OF POWER TRANSFORMER RESPONSE WAVEFORMS OBTAINED BY NANOSECOND LOW-VOLTAGE IMPULSE TESTING USING DETERMINATION COEFFICIENT

Boris L. Kovrigin¹,

kovriginb@mail.ru

Alexei V. Lavrinovich²,

rembon@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² TOMSKNIPINEFT (Open joint stock company),
72, Mira Avenue, Tomsk, 634027, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to predict the internal physical condition of power transformer windings. Windings displacement leads to a change in windings insulation distances. As a result, the service life of the winding insulation decreases and finally interturn fault occurs. Detection of minor faults in the transformer is essential and difficult task that has not been solved yet. The most sensitive and perspective method as known is nanosecond low-voltage impulse testing, but when response waveforms are obtained and compared, final conclusion (using by visual inspection) is not always clear to make a decision about failures in the transformer windings.

The main aim of the research is to develop a method for processing the response waveforms based on the results of diagnosing the internal physical condition of power transformer windings using nanosecond low-voltage impulses.

Objects: the response waveforms based on the results of diagnosing the internal physical condition of power transformer TM-160/10-Y1 by the nanosecond low-voltage impulse testing.

Methods: nanosecond low-voltage impulse testing for obtaining the response waveforms; analysis and comparison of the obtained pulse response waveforms by calculation of determination coefficient; coefficient of determination to quantify the differences between the response waveforms.

Results. The response waveforms of power transformer TM-160/10-Y1 were processed using the coefficient of determination, which allows quantifying the comparison of waveforms. The method that allows correctly quantifying prediction of the internal physical condition is developed.

Key words:

Energy conversion efficiency, power transformer, diagnosis, nanosecond low-voltage impulse testing, coefficient of determination, response, waveform, defectogram, normogram.

The authors appreciate professor V.A. Lavrinovich for detailed paper study and commentaries contributing to better comprehension and reasoning of conclusions.

REFERENCES

1. Sistema strategicheskogo planirovaniya remontov. Metodika ekspertnoy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [System of repair planning strategy. Methods of quantification of machines technical condition]. OAO «FSK EES». Ver. 0.3. Moscow, 2006.
2. Davidenko I.V., Ovchinnikov K.V. Analysis in failures of power transformers and its implementation. *ELECTRO*, 2014, no. 4, pp. 1–17. In Rus.
3. Khrennikov A.Yu. Main causes of the transformer windings faults occurred by short circuits. *Electricity*, 2006, no. 7, pp. 17–24. In Rus.
4. Khrennikov A.Yu. Experience in detection of the transformer windings displacement. *Energetic*, 2003, no. 7, pp. 21–24. In Rus.
5. Tenbohlen S., Ryder S.A. Making frequency response analysis measurements, a comparison of the swept frequency and LV Impulse methods. *13th International Symposium on HV Engineering*. Delft, 25–29 August, 2003. Delft, Elsevier, 2003. pp. 441–449.
6. Dorf R.C., Bishop R.H. *Modern Control Systems*, 10th ed. New Delhi, Pearson Education, Inc., 2005. 1035 p.
7. Islam S. Detection of shorted turns and winding movements in large power transformers using frequency response analysis. *IEEE PES winter meeting*. Singapore, 23–27 January 2000. Vol. 3, pp. 2233–2238.
8. Korolenko V.V., Konov Yu.S., Fedorova V.P. Obnaruzhenie povrezhdeniy transformatora pri KZ [Detection of transformer failures after short circuits]. *Electrical stations*, 1980, no. 7, pp. 22–26.
9. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V., Li Hongda. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse. *Resource-Efficient Technologies*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 111–117.
10. Molchanov D.A., Lavrinovich V.A., Lavrinovich I.V., Vazhov V.F. Downhole generator based on a line pulse transformer for electro pulse drilling. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC 2017)*. Brighton, Brighton and Hove, UK, 18–22 June 2017. pp. 7–16.
11. Lavrinovich V.A. and Mytnikov A.V. Development of Pulsed Method for Diagnostics of Transformer Windings based on Short Probe Impulse. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 2041–2045.
12. Davidenko I.V., Komarov V.I. Voprosy nadezhnosti i diagnostiki silovyykh transformatorov [Issues on reliability and diagnosing of power transformers]. *Diagnostika elektricheskikh ustanovok. Doklady tretey nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Diagnosing of electrical facilities. Proc. of the third science-practice conference]. Angarsk, 2008. pp. 6–7.
13. Alinkin S.V., Drobishevskiy A.A., Levitskaya E.I., Filatova M.A. Kolichestvennaya otsenka rezultatov impulsnogo defektografiro-

- vaniya obmotok silovykh transformatorov [Quantify of differences between the response waveforms of power transformer]. *Electrical Engineering Journal*, 1990, no. 5, pp. 12–15.
14. Khrennikov A.Yu., Kikov O.M. Diagnostika silovykh transformatorov v Samaraenergo metodom nizkovoltnykh impulsiv [Diagnosis of power transformers in Samaraenergo using low-voltage impulses testing]. *Electrical stations*, 2003, no. 11, pp. 4–54.
 15. Orlov A.I. *Prikladnaya statistika* [Applied Statistics]. Moscow, Ekzamen Publ., 2004. 326 p.
 16. Jay L. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 8th ed. Boston, Pearson Education Inc., 2011. pp. 508–510.
 17. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics.]. Moscow, Yurait Publ., 2015. 480 p.
 18. Bakhrushin V.E. Metody otsenivaniya nelineinykh statisticheskikh svyazei [Methods for estimating nonlinear statistical links]. *System technologies*, 2011, no. 2 (73), pp. 9–14. In Rus.
 19. Anderson-Sprecher R. Model Comparisons and R^2 . *The American Statistician*, 1994, vol. 48, Iss. 2, pp. 113–117.
 20. Islam A. Detection of Mechanical Deformation in Old Aged Power Transformer Using Cross Correlation Coefficient Analysis Method. *Energy and Power Engineering*, 2011, no. 3, pp. 585–591.

Received: 22 November 2017.

Information about the authors

Boris L. Kovrigin, post graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexei V. Lavrinovich, engineer, TOMSKNIPINEFT.