

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sakis Meliopoulos A.P. and oth. Smart Grid Technologies for Autonomous Operation and Control. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, No. 1, 2011.-p. 1-10.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. - М.: Гардарики, 2002. - 638 с.
3. Johns A.T., Salman. S.K. Digital protection for power systems. // Peter Pergrinus Ltd., on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1995.- 203 p.
4. Лачугин В.Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов: Диссертация, д.т.н., Москва, 2015. - 437 с.
5. Оппенгейм А., Шафер. Р. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./ под ред. Ненашева А.С.- М.: Техно-сфера, 2006. - 856 с.
6. Микуцкий Г.В., Скитальцев В.С. Высокочастотная связь по линиям электропередачи: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. - 448 с.
7. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения / А.Л. Куликов, В.Ф. Лачугин, В.В. Ананьев, В.Ю. Вуколов, П.С. Платонов // Электрические станции. - 2015. - №7. - С.45-53.

Научный руководитель: А.Л. Куликов, д.т.н., профессор кафедры ЭССЭ ИНЭЛ НГТУ.

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

Б.Л. Ковригин¹, А.В. Лавринович²
Томский политехнический университет¹
ЭНИН, ЭЭС
ТОМСКНИПИНЕФТЬ²

Введение

Для того чтобы своевременно принять необходимые меры по предотвращению межвитковых замыканий и неконтролируемому выводу трансформатора из строя, крайне важно фиксировать изменения положения витков на раннем этапе. До настоящего времени не решена задача обнаружения таких изменений в обмотках трансформатора на стадии их зарождения. Известен метод наносекундных низковольтных импульсов (ННВИ), который считается наиболее чувствительным и перспективным методом обнаружения механического смещения витков [1–3]. Схема диагностики по методу ННВИ приведена на рисунке 1. Ос-

цилограммы отклика, полученные на заведомо исправном трансформаторе, принято называть «нормограммами». Осциллограммы, полученные при последующих диагностиках, принято называть «дефектограммами». Сравнение дефектограммы с нормограммой позволяет оценить текущее состояние испытуемого объекта [4, 5].



Рис. 1. Схема диагностики по методу ННВИ

Для служб диагностики и эксплуатации высоковольтных силовых трансформаторов необходим метод, который позволял бы, обработав результаты диагностики трансформатора по методике ННВИ, получить некий численный показатель, который позволял бы определять дальнейшую пригодность эксплуатации трансформатора по результатам диагностики методом ННВИ. По нашему мнению, одним из таких методов может быть применение коэффициента детерминации, который позволяет произвести количественный анализ данных, полученных в различных сериях экспериментов. Данный метод основан на сравнении двух осциллограмм посредством применения квадрата коэффициента корреляции Пирсона, суть которого заключается в корреляционно-регрессионном анализе, отражающем влияние вариации результативного признака Y (дефектограмма) на факторный признак X (нормограмма). Расчет коэффициента корреляции Пирсона производится по формуле:

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

Где:

N_i – Значение i -ой точки построения нормограммы,

D_i – Значение i -ой точки построения дефектограммы,

$N_{\text{средн.}}$ – Среднее значение точек построения нормограммы,

$D_{\text{средн.}}$ – Среднее значение точек построения дефектограммы.

Коэффициент детерминации « R^2 » в нашем случае характеризует величину, отражающую степень идентичности двух осциллограмм между собой. Он может изменяться в пределах от 0 (полное отсутствие идентичности) до +1 (полная идентичность) [6]. Детерминация отличий между двумя осциллограммами по всем точкам их построения позволяет получить значение коэффициента детерминации, который можно использовать как численный результат сравнения.

Применение коэффициента парной корреляции

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 «Алттранс», г. Барнаул, введенный в эксплуатацию в 1993 г., был испытан методом ННВИ, импульсом длиной 100 и 500 нс и фронтом 10...20 нс. Схема подключения установки к трансформатору соответствует схеме, представленной на рисунке 1. В рамках данного эксперимента, трансформатор ТМ160 был сначала испытан в полностью рабочем состоянии, со «здорового трансформатора» были сняты осциллограммы ННВИ. Далее, были исполнены характерные повреждения трансформатора такие как: замыкание 3х витков, смещение витков на фазе «Авн» в нижней части обмотки, смещение витков на фазе «Авн» в верхней и нижней частях обмотки. Всего было проведено порядка 100 различных измерений для каждого эксперимента. На каждый отдельный случай снималось по 3 осциллограммы отклика. Зондирующий импульс, а также измерительное оборудование были неизменны.

Для рассмотрения возможности применения коэффициента детерминации, мы взяли эксперименты, соответствующие подаче зондирующего импульса на ввод высшего напряжения трансформатора «Авн» и снятию отклика с ввода низшего напряжения трансформатора «Анн». Осциллограммы «здорового» трансформатора представлены на рисунке 2.

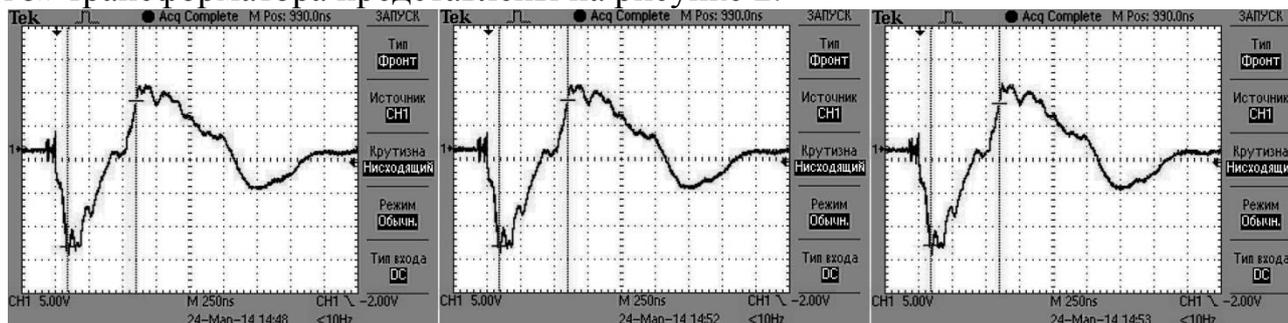


Рис. 2. Осциллограммы отклика «здорового» трансформатора ТМ-160/10-У1

Затем, данные осциллограммы были обработаны в программном комплексе Microsoft Excel. В одной координатной плоскости были построены все отклики «здорового» трансформатора. Значения коэффициентов детерминации для этих трёх осциллограмм изменяются в промежутке от 0,997 до 0,998. Для остальных экспериментов (межвитковое замыкание, смещение витков внизу обмотки, смещение витков внизу и вверху обмотки) были проделаны такие же действия, в каждом случае коэффициент детерминации находился в промежутке от 0,994 до 0,998. После проделанных вычислений, мы перешли к сравнению отклика «здорового» трансформатора с откликами повреждённого. Для более точного сравнения было решено использовать осциллограммы, построенные по средним (от трёх первичных осциллограмм) точкам. Сравнение откликов «здорового» и дефектного трансформатора проходило в одной координатной плоскости (рис. 3).

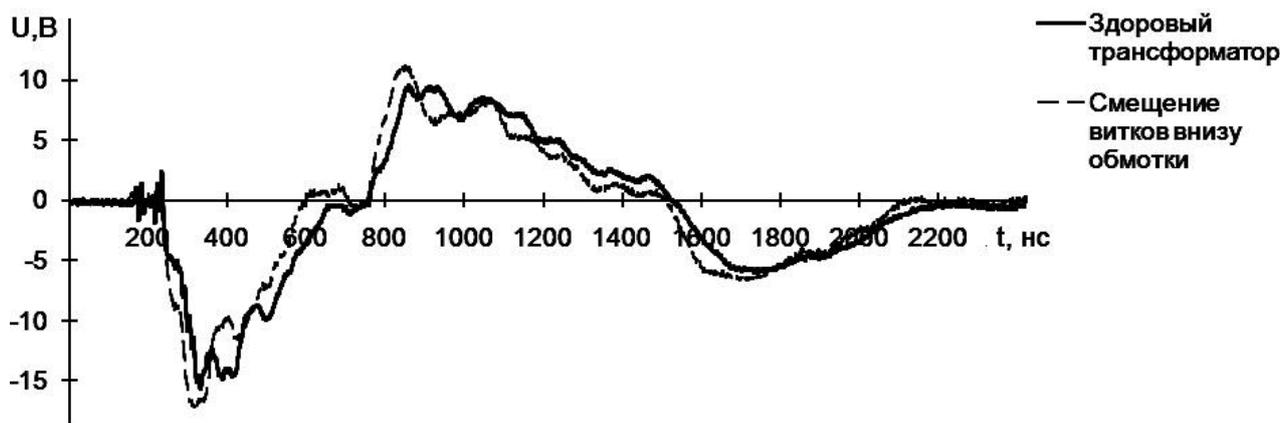


Рис. 3. Сравнение откликов «здорового» и дефектного трансформатора.

При сравнении, осциллограммы друг относительно друга дополнительно отстраиваем таким образом, чтобы по оси времени начало отклика одной осциллограммы, совпадало с откликом другой. Это необходимое условие для применения коэффициента детерминации. При сравнении откликов «здорового» и дефектного трансформатора был вычислен коэффициент детерминации. Получили значение 0,914. Результаты всех экспериментов были занесены в таблицу 1.

Табл. 1. Результаты сравнения «здорового» и неисправного трансформатора

Вид повреждений трансформатора	Коэффициент детерминации R^2
Смещение витков вниз обмотки	0,914
Смещение витков вниз и вверх обмотки	0,910
Межвитковое замыкание 3-х витков	0,909
Отсутствие повреждений	0,997

Заключение

Приведенные примеры обработки осциллограмм диагностики состояния обмоток трансформатора 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. Развитие данной методики является достаточно перспективной возможностью сделать импульсный метод диагностики более точным и понятным.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хренников А.Ю. Опыт обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов // Энергетик. - N 7.- 2003.
2. 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, Vol. 22, No. 4, August 2015, pp. 2041-2045.
3. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V., Li Hongda. Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse // Resource-Efficient Technologies, Vol. 2, No. 3, September 2016, pp. 111-117.

4. Islam. A. Detection of Mechanical Deformation in Old Aged Power Transformer Using Cross Correlation Co-Efficient Analysis Method. – May 2012.
5. Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов // С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // Электротехника. 1990. № 5.
6. Jay L. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences (8th ed.). *Cengage Learning*, Boston, 2011, pp. 508–510.

Научный руководитель: В.А. Лавринович, д.т.н., профессор каф. ЭЭС ЭНИН ТПУ.