
Оценка воспроизводимости результатов испытаний обмотки трансформатора при искусственных межвитковых коротких замыканиях

В.З. Ковалев, О.В. Архипова, Э.И. Хусаинов, Р.В. Сайфуллин, А.Ю. Миронов

Югорский государственный университет

Аннотация: Межвитковое короткое замыкание (КЗ) в обмотке силового трансформатора - первостепенная причина его отказа. Существующие методы идентификации межвиткового КЗ имеют недостатки при использовании в полевых условиях. Для решения данной проблемы разработан мобильный программно-аппаратный комплекс идентификации параметров электрооборудования (ПАК ИП-10), основанный на опыте затухания постоянного тока. Проверка результатов испытаний на воспроизводимость, по критерию Кохрена, показала, что разработанный ПАК ИП-10 может быть рекомендован для идентификации наличия/отсутствия виткового КЗ в обмотках трансформатора.

Ключевые слова: силовой трансформатор, межвитковое короткое замыкание, идентификация, опыт затухания постоянного тока, критерий Кохрена.

Силовые трансформаторы (СТ) являются важнейшей неотъемлемой частью систем электроснабжения. Соответственно, вопросы обеспечения их бесперебойной работы являются актуальными. Анализ причин отказов СТ позволил установить, что в 55% случаев отказ трансформатора вызван межвитковым коротким замыканием (КЗ) по причине нарушения целостности электрической изоляции [1, 2].

Существующие методы идентификации внутреннего состояния активной части СТ технически сложны для использования в полевых условиях и требуют высокой степени подготовки обслуживающего персонала. К ним относятся методы, основанные на анализе амплитудно-частотных характеристик [3-5], построении цифровых двойников СТ [6-8], анализе трансформаторного масла [9, 10].

Для решения данной проблемы разработан мобильный программно-аппаратный комплекс (ПАК) идентификации параметров

электрооборудования – ПАК-ИП10, в основе которого лежит «опыт затухания постоянного тока» (ОЗПТ) [11, 12] (рис.1).



Рис. 1. – Программно-аппаратный комплекс идентификации параметров электрооборудования ПАК-ИП10

В данной статье приведены данные испытаний трансформатора серии ТЗСИ-2.5 кВА 380(220) /36 В с помощью разработанного ПАК. Поставлено пять опытов, $N=5$ – один опыт без виткового КЗ (штатное состояние) и четыре опыта с моделированием 2, 4, 6 и 8 - виткового КЗ в обмотке трансформатора. Каждый опыт повторен четыре раза, $k=4$. Отметим, что в представленных в статье данных, место межвиткового КЗ инициировалось в верхней части обмотки трансформатора. Обобщенная схема регистрации переходной характеристики ОЗПТ в обмотке при проведении испытаний трансформатора приведена на рисунке 2.

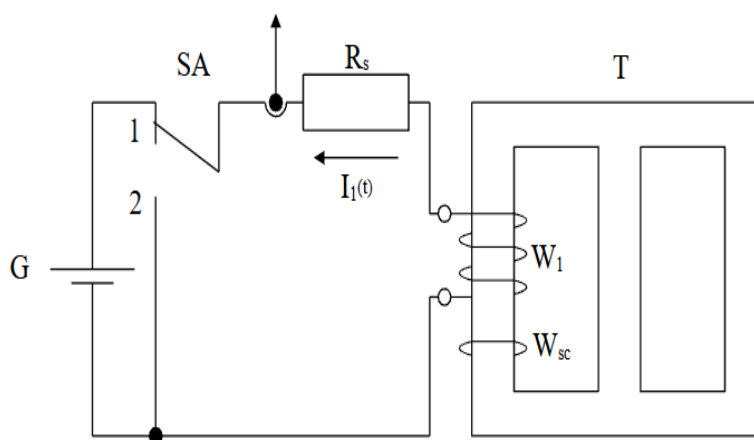


Рис. 2. – Обобщенная схема регистрации переходной характеристики затухания тока обмотки трансформатора

На схеме (рис.2) представлены следующие компоненты: G – аккумуляторная батарея (АКБ), SA – двухпозиционный переключатель, R_s – измерительный шунт, измерительный блок, W_1 – обмотка трансформатора, T – магнитопровод трансформатора. Отдельное внимание стоит уделить физической модели виткового КЗ – W_{sc} , которая позволяет физически моделировать различное количество витков в КЗ. При этом, место КЗ можно изменять вдоль оси обмотки трансформатора. При установке переключателя SA в положение 1 активная часть трансформатора накапливает энергию от АКБ до установившегося значения тока I_0 . Далее происходит переключение SA в положение 2 и измерительный блок регистрирует процесс затухания тока $I_1(t)$ в одной из обмоток исследуемого трансформатора.

Кривая затухания постоянного тока $I_1(t)$ с достаточной для практики точностью [13] аппроксимируется суммой трех экспонент:

$$I_1(t) = Im_1 e^{\lambda_1 t} + Im_2 e^{\lambda_2 t} + Im_3 e^{\lambda_3 t}. \quad (1)$$

где, Im_1, Im_2, Im_3 – постоянные интегрирования; $\lambda_1=1/T_1, \lambda_2=1/T_2, \lambda_3=1/T_3$ – коэффициенты затухания, где T_1, T_2, T_3 – соответствующие постоянные времени [13].

По полученным характеристикам экспонент оцениваются значения параметров схемы замещения трансформатора и определяется признак наличия или отсутствия виткового КЗ [14].

Достоверность оценки параметров схемы замещения, соответственно и достоверность идентификации межвиткового КЗ, напрямую зависит от воспроизводимости ОЗПТ [15] разработанным ПАК. В этом случае принято проводить проверку однородности выборочных дисперсий S^2 в каждом опыте [15].

В таблице 1 представлены характеристики экспонент (1) полученные из испытания обмотки трансформатора ТЗСИ-2.5 с помощью ПАК при описанных выше условиях.

Таблица № 1

Характеристики экспонент

№ повтора, k	Im_1 , А	Im_2 , А	Im_3 , А	λ_1 , мс ⁻¹	λ_2 , мс ⁻¹	λ_3 , мс ⁻¹	I_0 , А
2-ух витковое короткое замыкание							
1	1,989	1,918	0,1723	0,00331	0,00065	0,00013	4,292
2	1,958	1,926	0,2019	0,00338	0,00067	0,00015	4,294
3	1,969	1,928	0,1954	0,00338	0,00067	0,00015	4,305
4	1,971	1,931	0,2008	0,00340	0,00067	0,00015	4,324
\bar{Y} *	1,972	1,926	0,1926	0,00336	0,00066	0,00014	4,304
S^{2**}	$1,60 \cdot 10^{-4}$	$2,92 \cdot 10^{-5}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-10}$	$1,00 \cdot 10^{-10}$	
4-ех витковое короткое замыкание							
1	1,882	1,876	0,2146	0,00347	0,00068	0,00015	4,288
2	1,897	1,874	0,2016	0,00345	0,00067	0,00015	4,289
3	1,891	1,877	0,2101	0,00347	0,00067	0,00015	4,298
4	1,934	1,868	0,1710	0,00337	0,00065	0,00013	4,301
\bar{Y}	1,901	1,873	0,1993	0,00344	0,00066	0,00014	4,294
S^2	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$3,86 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-9}$	$1,58 \cdot 10^{-10}$	$1,00 \cdot 10^{-10}$	
6-ти витковое короткое замыкание							
1	1,799	1,797	0,2038	0,00336	0,00065	0,00015	4,252
2	1,812	1,794	0,2210	0,00364	0,00068	0,00016	4,281
3	1,826	1,801	0,1850	0,00334	0,00064	0,00013	4,284
4	1,832	1,796	0,2099	0,00363	0,00068	0,00015	4,298
\bar{Y}	1,818	1,797	0,2068	0,00349	0,00066	0,00014	4,279
S^2	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$6,77 \cdot 10^{-6}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$2,72 \cdot 10^{-8}$	$4,25 \cdot 10^{-10}$	$1,58 \cdot 10^{-10}$	
8-ми витковое короткое замыкание							
1	1,729	1,756	0,2590	0,00371	0,00070	0,00017	4,292
2	1,723	1,759	0,2662	0,00372	0,00070	0,00017	4,303
3	1,739	1,769	0,2493	0,00367	0,00069	0,00016	4,303
4	1,776	1,756	0,2137	0,00359	0,00067	0,00014	4,313
\bar{Y}	1,742	1,760	0,2470	0,00367	0,00069	0,00016	4,303
S^2	$5,56 \cdot 10^{-4}$	$3,65 \cdot 10^{-5}$	$5,42 \cdot 10^{-4}$	$3,49 \cdot 10^{-9}$	$2,00 \cdot 10^{-10}$	$2,00 \cdot 10^{-10}$	
Штатное состояние							
1	2,121	1,982	0,1711	0,00290	0,00063	0,00013	4,371
2	2,087	1,994	0,1902	0,00305	0,00065	0,00015	4,375
3	2,071	1,999	0,2064	0,00308	0,00066	0,00015	4,377
4	2,119	1,992	0,1721	0,00295	0,00063	0,00013	4,379
\bar{Y}	2,099	1,992	0,1849	0,00299	0,00064	0,00014	4,376
S^2	$6,02 \cdot 10^{-4}$	$4,91 \cdot 10^{-5}$	$2,82 \cdot 10^{-4}$	$7,10 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-10}$	

Примечание (*) – здесь и далее \bar{Y} – среднее по наблюдаемым величинам.

Примечание (**) – здесь и далее S^2 – выборочная дисперсия.

Проверка однородности дисперсий нескольких опытов в которых произведено одинаковое количество повторений проводится с использованием критерия Кохрена [15]. «Расчётное значение критерия Кохрена равно отношению максимальной выборочной дисперсии к сумме дисперсий всех опытов» [15]:

$$G = \frac{S^2(max)}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (3)$$

где N – количество опытов, $S^2(max)$ – максимальная выборочная дисперсия.

Выборочная дисперсия определяется по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2}{k-1}, \quad (4)$$

где Y_i – наблюдаемая величина, k – количество повторений в опытах.

«Табличное (критическое) значение критерия Кохрена – $G_{табл}$ определяется в зависимости от принятой доверительной вероятности и числа степеней свободы» [15]:

$$\nu_1 = k - 1; \nu_2 = N.$$

Рассмотрим воспроизводимость опытов при доверительных вероятностях – p , равных 0,95 и 0,99 (табл.2).

Таблица № 2

Проверка воспроизводимости опытов

	Im_1	Im_2	Im_3		λ_1	λ_2	λ_3
$\sum S_u^2, A^2$	$2,05 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$\sum S_u^2, (мс^{-1})^2$	$4,16 \cdot 10^{-8}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$	$6,92 \cdot 10^{-10}$
$S^2(max), A^2$	$6,02 \cdot 10^{-4}$	$4,91 \cdot 10^{-5}$	$5,42 \cdot 10^{-4}$	$S^2(max), (мс^{-1})^2$	$2,72 \cdot 10^{-8}$	$4,25 \cdot 10^{-10}$	$2,00 \cdot 10^{-10}$
G	0,29	0,36	0,33	G	0,65	0,38	0,29
$G_{табл.0.95}^*$	0,6	0,6	0,6	$G_{табл.0.95}$	0,6	0,6	0,6
$G_{табл.0.99}^*$	0,7	0,7	0,7	$G_{табл.0.99}$	0,7	0,7	0,7

Примечание (*) – здесь и далее под $G_{табл.0.95}$ и $G_{табл.0.99}$ понимаются табличные значения критерия Кохрена при доверительных вероятностях 0,95 и 0,99.

Если расчётное значение критерия (3), при заданной доверительной вероятности, меньше критического, то можно принять гипотезу об однородности дисперсий (4). В ином случае, в опытах присутствует значительная ошибка [15].

Результаты анализа таблицы 2 позволяют сделать выводы что дисперсии постоянных интегрирования Im_1 , Im_2 , Im_3 и коэффициентов затухания экспонент λ_2 , λ_3 однородны при $p=0,95$. Дисперсии коэффициента затухания λ_1 однородны при $p=0,99$, что позволяет считать результаты опытов воспроизводимыми.

Выводы:

1. Проверка результатов эксперимента показала, что в соответствии с критерием Кохрена, в опытах отсутствуют систематические ошибки при проведении ОЗПТ.

2. Разработанный программно-аппаратный комплекс может быть рекомендован для идентификации параметров схемы замещения СТ и определения наличия/отсутствия виткового КЗ в обмотках трансформатора.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

Литература

1. Архипова О.В., Ковалев В.З., Сайфуллин Р.В. Анализ существующих подходов к мониторингу и диагностике состояния активной части силовых трансформаторов // Вестник Югорского государственного университета. 2024. Т. 20. № 1. С. 96-101. DOI: 10.18822/byusu20240196-101. EDN: RKAYZN.

2. Иванова З.Г., Рыбаков Л.М. Стратегия обслуживания на основе результатов диагностирования состояния активной части силовых трансформаторов с учетом смещения резонансных частот в зависимости от увлажнения и наличия витковых замыканий в обмотках // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 103. С. 545-566.

3. Liu Y., Ji S., Yang F., Cui Y., Zhu L., Rao Z., Ke C., Yang X. A study of the sweep frequency impedance method and its application in the detection of internal winding short circuit faults in power transformers // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. V. 22. No. 4. 2015. pp. 2046-2056.

4. Бакланов А.Н., Чередниченко В.С., Мусин М.В., Ткалич А.П., Рудик Е.А., Бондарев О.Д. Применение современных компьютерных технологий для решения задач оценки функционального состояния силовых масляных трансформаторов // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7105/.

5. Исаев Ю.Н. Елгина Г.А. Метод диагностики обмоток трансформатора на наличие дефектов в виде короткозамкнутых витков // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 28.

6. Дарьян Л.А., Конторович Л.Н. Цифровые двойники электроэнергетического оборудования. Образы и экспертизы. Часть 2 // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 2(65). С. 32-39.

7. Хальясмаа А.И., Ревенков И.С., Сидорова А.В. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3(55). С. 99-113.

8. Тихонов А.И., Стулов А.В., Еремин И.В., Снитько И.С., Подобный А.В., Каржевин А.А., Плаксин А.В. Разработка технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов на основе цепных моделей и

2D-моделей магнитного поля // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 1(29). С. 76-82.

9. Ogirimah A.A., Onimisi M., Ali H., Owolabi A. Analysis of thermal ageing effects on transformer oil dielectric properties // Science World Journal. 2025.V. 20. No. 2. pp. 774-783. DOI: 10.4314/swj.v20i2.44.

10. Белякова А.Ю., Беляков Ю.Д. Разработка программного продукта для анализа и прогнозирования концентрации газов в трансформаторном масле силовых трансформаторов // Инженерный вестник Дона. 2021. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6940/.

11. Ковалев В.З., Щербаков А.Г., Архипов А.В., Ковалев А.Ю., Аникин В.В. Идентификация параметров схемы замещения погружных асинхронных двигателей // Промышленная энергетика. 2012. № 1. С. 38-41. EDN: PGPUTT.

12. Глазырин А.С., Аникин В.В., Буньков Д.С., Антяскин Д.И., Старцева Ю.Н., Ковалев В.З., Кладиев С.Н., Филипас А.А., Хамитов Р.Н. Нелинейное алгебраическое оценивание индуктивности вибрационного электромагнитного активатора по кривой затухания тока // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 1. С. 148-157. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2456. EDN: EVKDMW.

13. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. / 3-е издание, переработанное и дополненное. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 536 с.

14. Аникин В.В., Сайфуллин Р.В., Бединов В.В. Идентификация виткового короткого замыкания в обмотке трансформатора // Динамика систем, механизмов и машин. 2024. Т. 12, № 1. С. 3-11. DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-1-3-11.

15. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975. 185 с.

References

1. Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Sayfullin R.V. Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. 2024. T. 20. № 1. pp. 96-101. DOI: 10.18822/byusu20240196-101.
2. Ivanova Z.G., Rybakov L.M. Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. № 103. pp. 545-566.
3. Liu Y., Ji S., Yang F., Cui Y., Zhu L., Rao Z., Ke C., Yang X. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. V. 22. No. 4. 2015. pp. 2046-2056.
4. Baklanov A.N., Cherednichenko V.S., Musin M.V., Tklich A.P., Rudik E.A., Bondarev O.D. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7105/.
5. Isayev YU.N. Yelgina G.A. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 2. pp. 28.
6. Daryan L.A., Kontorovich L.N. Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2021. № 2(65). pp. 32-39.
7. Khalyasmaa A.I., Revenkov I.S., Sidorova A.V. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2022. T. 14. № 3(55). pp. 99-113.
8. Tikhonov A.I., Stulov A.V., Yeremin I.V., Snitko I.S., Podobnyy A.V., Karzhevin A.A., Plaksin A.V. Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. 2020. № 1(29). pp. 76-82.
9. Ogirimah A.A., Onimisi M., Ali H., Owolabi A. Science World Journal. 2025. V. 20, No. 2. pp. 774-783. DOI: 10.4314/swj.v20i2.44.
10. Belyakova A.YU., Belyakov YU.D. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6940/.

11. Kovalev V.Z., Shcherbakov A.G., Arkhipov A.V., Kovalev A.YU., Anikin V.V. Promyshlennaya energetika. 2012. № 1. pp. 38-41. EDN: PGPUTT.

12. Glazyrin A.S., Anikin V.V., Bunkov D.S., Antyaskin D.I., Startseva YU.N., Kovalev V.Z., Kladiyev S.N., Filipas A.A., Khamitov R.N. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2020. V. 331. № 1. pp. 148-157. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2456. EDN: EVKDMW.

13. Neyman L.R., Demirchyan K.S. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: V 2-kh t. Uchebnik dlya vuzov. Tom 1. 3-e izdaniye, pererabotannoye i dopolnennoye [Theoretical foundations of electrical engineering: In 2 volumes. Textbook for universities. Volume 1. 3rd edition, revised and supplemented]. L.: Energoizdat. Leningr. otd-niye, 1981. 536 p.

14. Anikin V.V., Sayfullin R.V., Bedinov V.V. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. 2024. V. 12, № 1. pp. 3-11. DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-1-3-11.

15. Ivobotenko B.A., Ilinskiy N.F., Kopylov I.P. Planirovaniye eksperimenta v elektromekhanike [Design of experiment in electromechanics]. M.: Energiya, 1975. 185 p.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 10.11.2025

Дата публикации: 16.12.2025