

УДК 621.3

В.В. Кирюха¹, Ю.М. Горбенко², В.С. Яблокова²

¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

²Дальневосточный федеральный университет,
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

Рассматриваются вопросы диагностики трансформаторов при работе под нагрузкой с целью выявления дефектов и возможных отказов. Основными задачами диагностики трансформаторного оборудования являются: выявление дефектов и повреждений; оценка функциональной исправности оборудования; определение возможности продления эксплуатации без проведения ремонтных работ; выработка рекомендаций по определению срока службы. В качестве диагностических параметров предлагается использовать электромагнитные параметры, т.е. параметры их схемы замещения. Цель работы – исследование однофазных трансформаторов с позиции организации диагностики трансформатора под нагрузкой при наличии измерений с учетом погрешностей. Предлагается методика диагностирования.

Ключевые слова: силовой трансформатор, диагностика, мониторинг, электромагнитные параметры, метод наименьших квадратов.

**V.V. Kiryuha, Yu.M. Gorbenko, V.S. Yablokova
DIAGNOSIS OF TRANSFORMERS LOAD**

The article deals with questions of diagnostics of transformers under load in order to detect possible defects and failures. The main objectives of diagnosis transformer equipment are: detection of defects and damage; Functional assessment of serviceability of the equipment; the possibility of extending the definition of operation without repairs; development of recommendations on the definition of life. As diagnostic parameters proposed to use electron-magnitnye parameters, ie, the parameters of the equivalent circuit. Objective – research, of the single-phase transformers with the position of the transformer diagnostic organization under stress in the presence of measurement error into account. The technique di agnostirovaniya.

Key words: a power transformer, diagnostics, monitoring of electromagnetic parameters, the method of least squares.

Введение

В последние годы обострилась задача обеспечения надежной эксплуатации силовых трансформаторов. Это связано с ростом количества трансформаторов, выработавших свой нормативный срок эксплуатации, и снижением объема финансирования ремонтных и испытательных работ.

Наиболее актуальной задачей электроэнергетики становится обеспечение продолжения надежной эксплуатации старого парка. Но это важно и для трансформаторного оборудования, не выработавшего свой ресурс, так как имеет место несоответствие предписанных режимов эксплуатации реальным, что может и привести к ускорению расходования ресурса. Эта проблема может быть решена с помощью диагностического контроля.

Анализ дефектов, возникающих в силовых трансформаторах, показывает, что их можно разделить на три группы по времени развития:

- медленно развивающиеся дефекты со временем развития более года;

- быстро развивающиеся дефекты со временем развития менее года;
- внезапные отказы со временем развития от долей секунд до нескольких часов.

Вероятность внезапных отказов увеличивается по мере длительной эксплуатации трансформаторов. Увеличение количества быстро развивающихся и внезапных отказов приводит к необходимости уменьшения интервалов между проводимыми обследованиями, а следовательно, требуется осуществлять непрерывный контроль в рабочем режиме. В этой связи разработка методов непрерывной диагностики является очень важной задачей электроэнергетики.

Наибольшее количество отказов происходит именно в период нормальной эксплуатации, и основное количество трансформаторов не дотягивает до сроков капитального ремонта. Причиной высокой аварийности трансформаторов в период нормальной эксплуатации является большая периодичность капитальных ремонтов (на 12-м и 24-м году эксплуатации). Именно поэтому столь остро для силовых трансформаторов встала проблема перехода от режимов по сроку эксплуатации к ремонту по состоянию. В связи с этим актуальны работы по созданию систем мониторинга трансформаторов, т.е. определение их состояния в рабочем режиме.

Основными задачами диагностики трансформаторного оборудования являются выявление дефектов и повреждений, оценка функциональной исправности оборудования, определение возможности продления срока эксплуатации без проведения ремонтных работ, определение объема ремонта, при его необходимости оценка остаточного срока службы, а также выработка рекомендаций по определению срока службы. Кроме того, применение диагностических методов дает возможность оценить состояние целых трансформаторных парков, позволяя тем самым производить ранжирование трансформаторов по состоянию, что, в свою очередь, позволяет снижать затраты на эксплуатацию и ремонт.

Именно мониторинг силовых трансформаторов является наиболее эффективным решением проблемы эксплуатации трансформаторов, выработавших свой нормативный срок или находящихся в длительной эксплуатации. Сегодня мониторингу уделяется большое внимание: разрабатываются такие методы обследования трансформаторов, как анализ масла, измерение частичных разрядов, виброакустический анализ, измерение температуры, регистрация электромагнитного излучения. Все эти методы желательно использовать совместно при комплексном обследовании трансформаторов. В этом плане все более широкое распространение в электроэнергетике приобретает создание оперативно-измерительных комплексов.

Цель исследования – разработка алгоритма диагностики однофазного трансформатора под нагрузкой при наличии погрешностей в измерительной информации.

В качестве диагностических параметров при организации мониторинга трансформаторов можно использовать электромагнитные параметры, т.е. параметры их схемы замещения. По изменению активного сопротивления обмоток можно судить о целостности электрических цепей и состоянии контактных соединений. Изменение индуктивного сопротивления рассеяния обмоток указывает на наличие деформаций и повреждений в обмотках.

Кроме параметров схемы замещения, в качестве диагностических параметров представляют интерес потери в магнитопроводе трансформатора и его намагничивающая мощность, которая позволяет оценить состояние магнитной системы трансформатора.

Электромагнитные диагностические параметры имеют то неоспоримое преимущество, что отражают процессы, происходящие в трансформаторе практически мгновенно. Из этого следует, что методы, основанные на их контроле, могут служить защитой при внезапных отказах и быстроразвивающихся дефектах.

В таблице приведена взаимосвязь между дефектами и электромагнитными параметрами трансформатора применительно к T-образной схеме замещения (рис. 1).

Связь между дефектами трансформатора и его параметрами The connection between the transformer and its defect parameters

Дефект	Изменение параметра
Межвитковое замыкание	Уменьшение R_1, X_1, R_2 и X_2
Деформация обмотки после короткого замыкания	Увеличение L_1, L_2
Ухудшение контактных соединений	Увеличение R_1, R_2
Замкнутый контур в магнитопроводе	Увеличение P_0, Q_0
Изменение свойств ферромагнитного материала	Изменение R_0, X_0
Процессы нагрева, выделения газов, разрушение изоляции и т.п.	Увеличение P_0, P_1, P_2

В схеме замещения трансформатора приняты следующие обозначения:

R_1 – активное сопротивление провода первичной обмотки;

X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки;

X_0 – индуктивное сопротивление намагничивания;

R_0 – сопротивление, учитывающее магнитные потери;

$R'_2 = K^2 R_2$ – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки;

$X'_2 = K^2 X_2$ – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки;

$K = w_2 / w_1$ – коэффициент трансформации.

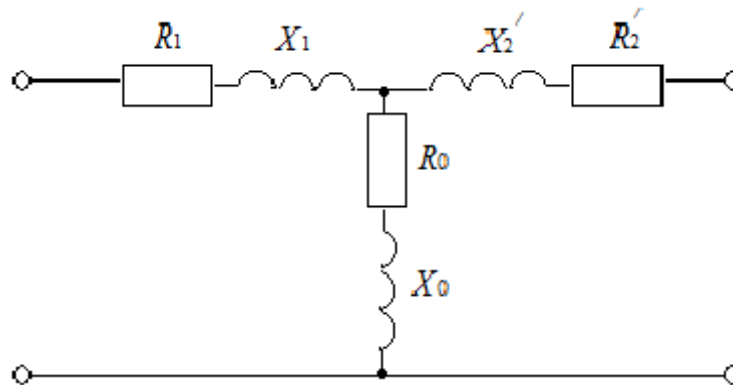


Рис. 1. Т-образная схема замещения однофазного трансформатора
Fig. 1. T-equivalent circuit of single-phase transformer

Рассмотрим алгоритм диагностики однофазного трансформатора под нагрузкой применительно к Г-образной схеме замещения (рис. 2). Несмотря на то, что количество однофазных трансформаторов, используемых в электроэнергетических системах, весьма мало, алгоритм определения электромагнитных параметров целесообразно рассмотреть именно на них. Эти исследования можно рассматривать как предварительный этап, применив их в дальнейшем и для оценки состояния трехфазных трансформаторов, находящихся в рабочем режиме.

Цель рассматриваемой работы – исследовать однофазные трансформаторы с позиции возможности организации диагностики трансформатора под нагрузкой (мониторинг состояния) при наличии измерений с учетом погрешностей.

Уравнения состояния трансформатора, как любого четырехполюсника, можно выразить через Z -, Y - или A -параметры, из которых затем определяются диагностические электромагнитные параметры [1]. Для конкретности остановимся на A -параметрах.

Целью задачи диагностики трансформатора является определение A -параметров.

Уравнения системы трансформатора нелинейны, так как содержат произведения неизвестных $A\dot{U}_2$, $B\dot{I}_2$, $C\dot{U}_2$, $D\dot{I}_2$. В связи с неточностью измерений величины \dot{U}_1 , \dot{I}_1 , \dot{U}_2 , \dot{I}_2 тоже являются неизвестными. С целью использования разработанных алгоритмов на основе метода наименьших квадратов [2] для решения поставленной задачи необходимо произвести их линеаризацию.

Линеаризация может быть реализована путем исключения переменных \dot{U}_1 , \dot{I}_1 , \dot{U}_2 , \dot{I}_2 .

Неточность измерительной информации предлагается учитывать детерминированным образом, т.е. в результате диагностического эксперимента получены интервальные значения измеренных величин: $U_{1\alpha} \leq U_1 \leq U_{1\beta}$, $\psi_{U1\alpha} \leq \psi_{U1} \leq \psi_{U1\beta}$, $I_{1\alpha} \leq I_1 \leq I_{1\beta}$, $\psi_{I1\alpha} \leq \psi_{I1} \leq \psi_{I1\beta}$, $U_{2\alpha} \leq U_2 \leq U_{2\beta}$, $\psi_{U2\alpha} \leq \psi_{U2} \leq \psi_{U2\beta}$, $I_{2\alpha} \leq I_2 \leq I_{2\beta}$, $\psi_{I2\alpha} \leq \psi_{I2} \leq \psi_{I2\beta}$. Здесь индексы α и β определяют нижнюю и верхнюю границу интервалов измерений действующих значений напряжений и токов и их начальных фаз. Для каждой из переменных для линеаризации будем использовать несовместные уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 = \dot{U}_{1\alpha} = U_{1\alpha} \angle \psi_{U1\alpha}, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_{1\beta} = U_{1\alpha} \angle \psi_{U1\beta}, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_{1\gamma} = U_{1\beta} \angle \psi_{U1\alpha}, \\ \dot{U}_1 = \dot{U}_{1\theta} = U_{1\beta} \angle \psi_{U1\beta}, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\alpha} = U_{2\alpha} \angle \psi_{U2\alpha}, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\beta} = U_{2\alpha} \angle \psi_{U2\beta}, \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\gamma} = U_{2\beta} \angle \psi_{U2\alpha}, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\theta} = U_{2\beta} \angle \psi_{U2\beta}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\alpha} = I_{1\alpha} \angle \psi_{I1\alpha}, \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\beta} = I_{1\alpha} \angle \psi_{I1\beta}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\gamma} = I_{1\alpha} \angle \psi_{I1\alpha}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\theta} = I_{1\beta} \angle \psi_{I1\beta}, \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\alpha} = I_{2\alpha} \angle \psi_{I2\alpha}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\beta} = I_{2\alpha} \angle \psi_{I2\beta}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\gamma} = I_{2\beta} \angle \psi_{I2\alpha}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\theta} = I_{2\beta} \angle \psi_{I2\beta}. \end{aligned} \quad (1)$$

Количество линеаризованных уравнений системы при этом получается равным 128, а несовместное ядро переопределенной системы составит 144 уравнения с количеством неизвестных, равным 4. Точные уравнения в этом случае отсутствуют.

Использование разработанной методики применения метода наименьших квадратов к диагностике электрических цепей предполагает наличие компонентных уравнений [2]. В данном случае формирование компонентных уравнений требует введения дополнительных переменных $\dot{V}_1 = A\dot{U}_2$, $\dot{V}_2 = B\dot{I}_2$, $\dot{V}_3 = C\dot{U}_2$, $\dot{V}_4 = D\dot{I}_2$. Тогда система уравнений преобразуется к виду

$$\dot{U}_1 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2, \quad \dot{I}_1 = \dot{V}_3 + \dot{V}_4, \quad \dot{V}_1 = A\dot{U}_2, \quad \dot{V}_2 = B\dot{I}_2, \quad \dot{V}_3 = C\dot{U}_2, \quad \dot{V}_4 = D\dot{I}_2. \quad (2)$$

В этом случае переопределенная система состоит из двух точных уравнений и несовместного ядра из 32 уравнений.

Формирование несовместной системы уравнений может быть произведено и по законам Кирхгофа. Применительно к Г-образной схеме замещения (рис. 2) составляются точные уравнения

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_k + \dot{U}_2, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2, \quad (3)$$

а затем несовместные

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 = \dot{U}_{1\alpha}, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_{1\beta}, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_{1\gamma}, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_{1\theta}, \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\alpha}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\beta}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\gamma}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\theta}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\alpha}, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\beta}, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\gamma}, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\theta}, \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\alpha}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\beta}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\gamma}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\theta}. \end{aligned} \quad (4)$$

Запишем эти уравнения в матричной форме и разобьем на блоки (разбиение на блоки отмечено утолщенными линиями):

1		-1		-1	
	1		-1		-1
1					
1					
1					
1					
	1				
	1				
	1				
	1				
		1			
		1			
		1			
		1			
			1		
			1		
			1		
			1		

×

\dot{U}_1
\dot{I}_1
\dot{U}_2
\dot{I}_2
\dot{U}_κ
\dot{I}_0

=

$\dot{U}_{1\alpha}$
$\dot{U}_{1\beta}$
$\dot{U}_{1\gamma}$
$\dot{U}_{1\theta}$
$\dot{I}_{1\alpha}$
$\dot{I}_{1\beta}$
$\dot{I}_{1\gamma}$
$\dot{I}_{1\theta}$
$\dot{U}_{2\alpha}$
$\dot{U}_{2\beta}$
$\dot{U}_{2\gamma}$
$\dot{U}_{2\theta}$
$\dot{I}_{2\alpha}$
$\dot{I}_{2\beta}$
$\dot{I}_{2\gamma}$
$\dot{I}_{2\theta}$

Приведем компактную блочную форму записи:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix}.$$

Связи, обусловленные уравнением, запишем в виде двух уравнений:

$$X_2 = -A_{12}^{-1} \cdot A_{11} \cdot X_1, \quad (5)$$

$$A \cdot X_1 = F, \quad (6)$$

где $A = A_{21} - A_{22} \cdot A_{12}^{-1} \cdot A_{11}$.

Единственное решение по методу наименьших квадратов определяем выражением

$$X_1 = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot F. \quad (7)$$

Оценив вектор

$$X_1 = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 & \dot{I}_1 & \dot{U}_2 & \dot{I}_2 \end{bmatrix}^T, \text{ а затем } X_2 = \begin{bmatrix} \dot{U}_K & \dot{I}_0 \end{bmatrix}^T,$$

определяют диагностические параметры схемы замещения (R_0, X_0, R_K, X_K).

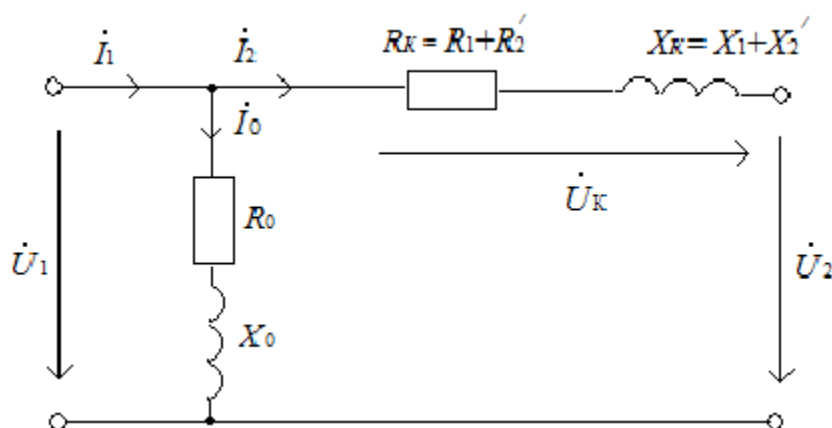


Рис. 2. Г-образная схема замещения однофазного трансформатора
Fig. 2. Г-shaped equivalent circuit of single-phase transformer

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что предложенный алгоритм диагностирования трансформатора под нагрузкой позволяет при решении задачи учитывать погрешности измерений детерминированным образом. Диагностирование осуществляется по электромагнитным параметрам, наиболее достоверно отражающим появление дефектов, а также динамику их развития.

Список литературы

1. Бутырин, П.А. Диагностика силовых трансформаторов под нагрузкой / П.А. Бутырин, М.Е. Алпатов // Изв. РАН. Энергетика, 1996. – № 1. – С. 74 – 81.
2. Горбенко, Ю. Корректировка решения задачи диагностики электрических цепей (формирование несовместной переопределенной системы уравнений) / Ю. Горбенко, В. Яблокова, В. Кирюха / LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 63 с.

Сведения об авторах: Кирюха Владимир Витальевич, доцент;
Горбенко Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент;
Яблокова Виктория Сергеевна, кандидат технических наук, доцент.