

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТКОВ ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ**В.К.Беляев¹**, канд. техн. наук, **В.Д.Ободовский¹**, **Е.Н.Паненко²**¹ – Научно-производственное Предприятие «ОСТ», ул. Воровского, 33-Д, Киев, 01054, Украина.² – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.e-mail: bel_vk@ua.fm

Описана методика определения характеристик качества линейных диагностических моделей контроля деформаций обмоток силового трансформатора, построенных на основе системы уравнений общей теории трансформаторов. Получены выражения для расчета коэффициентов чувствительности и погрешности моделей, используемых для оценки модуля сопротивления обмоток. Определены особенности влияния погрешностей измерения напряжений, токов, углов фаз на погрешность моделей при разных режимах работы трансформатора, близких к номинальному. Библ. 9, табл. 3.

Ключевые слова: диагностика, модель, погрешность, силовой трансформатор, сопротивление обмоток, чувствительность.

Одним из развивающихся методов функциональной диагностики силовых трансформаторов является метод контроля механического состояния обмоток трансформатора путем слежения под нагрузкой за изменением их сопротивления [1,8,9 и др.]. Основные достоинства такого подхода заключаются в оперативности и отказе от дорогостоящих и трудоемких операций вывода из работы в электрической сети и расшиновки трансформатора, сопутствующих традиционной процедуре периодического тестового контроля (определение сопротивления z_k в опыте короткого замыкания (КЗ) трансформатора [6]).

Деформации обмотки, происходящие в процессе эксплуатации трансформатора, приводят к изменению ее сопротивления и к изменению определяемого в опыте КЗ значения модуля сопротивления z_k . Диагностическим параметром является не собственно значение $|z_k|$, а его изменение по отношению к значению при вводе в эксплуатацию или паспортному значению. Определению подлежат весьма незначительные деформации, которые могут не сказываться на работе трансформатора в нормальных эксплуатационных условиях, но приводить к потере работоспособности в случае протекания больших аварийных токов. Предельным допустимым значением изменения $|z_k|$ при тестовом контроле считается 3% [6].

При контроле под нагрузкой определение сопротивления обмоток проводят после проведения опытов по измерению токов и напряжений на входах нормально работающего трансформатора (режимных параметров). Методика определения сопротивления зависит от характера измеряемых величин: по массиву зафиксированных мгновенных значений [9], по измеренным действующим значениям (модулям) [8] или по определенным модулям и углам фаз (комплексам) первых гармоник [1]. Во всех случаях для связи определенных в опытах величин (напряжений, токов, углов сдвига фаз) с характеристиками обмоток используют диагностическую математическую модель трансформатора, вид которой влияет на результаты контроля. При контроле трехфазных трансформаторов обычно используют модели, основанные на модели однофазного трансформатора с учетом особенностей схем соединения обмоток и конструкции.

Характеристики качества используемой диагностической модели (адекватность, точность, чувствительность) определяют достоверность получаемой оценки состояния обмотки. Оценка качества моделей в рассматриваемом случае необходима в связи со сложностью подтверждения адекватности полученного результата при контроле под нагрузкой (определяемые при этом величины сопротивлений отличаются от получаемых при тестовом контроле ввиду значительного отличия режимов трансформатора) и достаточно малыми значениями допустимых отклонений контролируемых величин.

Цель статьи показать эффективность использования теории чувствительности для оценки характеристик качества диагностических моделей, применяемых для контроля деформации обмоток трансформатора под нагрузкой.

Полные модели двухобмоточного трансформатора. В [1] в качестве диагностической предлагается классическая модель идеализированного однофазного двухобмоточного трансформатора в некотором режиме работы, представляющая трансформатор как четырехполюсник и связывающая первые гармоники напряжения и токи первичной (\dot{U}_1, \dot{I}_1) и вторичной (\dot{U}_2, \dot{I}_2) обмоток невырожденной системой уравнений в Z форме (или аналогичные системы уравнений четырехполюсников в Y-, A-, H-формах)

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (R_1 + k \cdot R_m + j\omega L_{11}) \cdot \dot{I}_1 + (R_m + j\omega M) \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= (R_m + j\omega M) \cdot \dot{I}_1 + (R_2 + R_m/k + j\omega L_{22}) \cdot \dot{I}_2 \end{aligned} \quad \text{или} \quad \begin{aligned} \dot{U}_1 &= z_{11} \cdot \dot{I}_1 + z_{12} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= z_{21} \cdot \dot{I}_1 + z_{22} \cdot \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь R_1, R_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток, L_{11}, L_{22} – полные собственные индуктивности обмоток, M – взаимная индуктивность обмоток, R_m – активная составляющая сопротивления взаимной индукции, k – отношение числа витков первичной и вторичной обмоток.

Все индуктивные элементы модели и R_m определяются основным потоком в магнитопроводе трансформатора и поэтому нелинейны (существенно зависят от интенсивности процессов). Полные индуктивности в (1) можно выразить через индуктивности рассеяния обмоток L_1 и L_2

$$L_{11} = L_1 + M \cdot k, \quad L_{22} = L_2 + M/k; \quad z_1 = (R_1 + j\omega L_1), \quad z_2 = (R_2 + j\omega L_2).$$

Индуктивности рассеяния считаются независимыми от магнитных свойств магнитопровода и режима работы трансформатора и определяются в основном конструкцией обмоток.

Для определения четырех неизвестных коэффициентов при токах $z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}$ необходимо провести измерения напряжений и токов в двух различных режимах нагрузки (два опыта), предполагая, что коэффициенты остаются неизменными в этих режимах. Учитывая влияние нелинейности характеристики намагничивания на искомые величины, режимы работы трансформатора в двух опытах должны отличаться незначительно. Получаемые при этом системы рассматриваются как системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Объединяя системы уравнений для двух опытов, запишем СЛАУ

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{U}. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{Z} = [z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}]^T$; $\mathbf{U} = [\dot{U}_{11}, \dot{U}_{12}, \dot{U}_{21}, \dot{U}_{22}]^T$. У напряжений первый индекс показывает номер обмотки, второй – номер опыта; \mathbf{I} – не полностью заполненная квадратная матрица размерности 4, содержащая токи обмоток в 1 и 2 опыте (индексация токов аналогична напряжениям). Решая систему (2), находят коэффициенты $z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}$, зная которые можно определить основные параметры трансформатора, характеризующие его техническое состояние, в частности, сопротивление КЗ.

Основные проблемы при использовании указанной диагностической модели (формула (2)) для определения характеристик обмоток связаны с плохой обусловленностью системы уравнений модели при реальных значениях входящих в уравнения величин (решения неустойчивы) [1].

В настоящей работе для повышения устойчивости решений был использован один из наиболее эффективных (в плане обеспечения точности и устойчивости) метод регуляризации Тихонова в модификации с заданием приближенного решения (\mathbf{Z}_0) [7]. В этом случае получаем новую модель, которая описывается регуляризованной системой уравнений вида

$$[\mathbf{I}^* \cdot \mathbf{I} + \alpha \cdot \mathbf{E}] \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{I}^* \cdot \mathbf{U} + \alpha \cdot \mathbf{Z}_0, \quad (3)$$

где α – коэффициент регуляризации, \mathbf{I}^* – эрмитово сопряженная матрица токов \mathbf{I} .

Контролируемые параметры. При деформации обмоток изменяются их потокосцепления и индуктивности рассеяния. Разделить потоки рассеяния пары обмоток реального трансформатора невозможно [3], поэтому использование при контроле индуктивности рассеяния отдельных обмоток нецелесообразно, несмотря на их отдельный учет в моделях. В то же время известно, что комбинация $L_1 + k^2 \cdot L_2$ непосредственно связана с геометрическими размерами, взаимным положением катушек и энергией суммарного поля рассеяния [4]. Учитывая сказанное, контролируемым параметром целесообразно выбирать либо указанную комбинацию, либо непосредственно связанную с ней.

Полное приведенное сопротивление рассеяния обмоток z_c определяется выражением

$$z_c = z_1 + k^2 z_2 = (R_1 + k^2 R_2) + j\omega(L_1 + k^2 \cdot L_2) = R_c + jX_c. \quad (4)$$

Под индуктивным сопротивлением КЗ иногда подразумевают величину $X_c = \omega(L_1 + k^2 \cdot L_2)$ [8], хотя выражение реактивной составляющей (X_k) сопротивления z_k , определяемого по формуле опыта КЗ, отличается от X_c

$$\begin{aligned} z_k &= z_1 + k^2 z_2 fm = (R_1 + k^2 R_2 fm) + j\omega(L_1 + k^2 L_2 fm) = R_k + jX_k, \\ fm &= (1 + k^2 z_2 / z_m)^{-1}, \quad z_m = k(R_m + j\omega M). \end{aligned} \quad (5)$$

Множитель fm определяет зависимость z_k от магнитных свойств магнитопровода, т.е. зависимость от режима работы трансформатора, при котором осуществлялся контроль. И хотя значение fm мало отличается от единицы, при оценках погрешности нужно учитывать наличие этой зависимости.

В настоящей работе рассматриваются случаи использования при контроле как величины z_k (определяется по выражению (5) для опыта КЗ), так и полного сопротивления рассеяния z_c (формула 4).

Ввиду малости активных составляющих z_k и z_c и близости к единице fm граничным допустимым

значением изменения возможных диагностических параметров (z_k, z_c, X_k, X_c) следует считать те же 3%, что и для тестовой диагностики. Отсюда, приемлемым результатом методики контроля можно считать ситуацию, когда погрешности приводят к изменению контролируемой величины не более, чем на 1%.

Упрощенная модель. Вследствие сложностей, возникающих при применении полной модели трансформатора, на практике при оценке состояния обмоток под нагрузкой часто применяются упрощенные модели. Наибольшее распространение получила модель, построенная на основе Г-образной схемы замещения трансформатора [1,8,9]. В модели вводится допущение о равенстве тока, протекающего по первичной обмотке, приведенному току вторичной (в терминах полных моделей $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 / k$). Данное приближение позволяет оценивать сопротивление z_c , используя результаты измерений тока только со стороны одной из обмоток и проводя измерения только в одном режиме (один опыт)

$$z_c = (\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2) / \dot{I}_1. \quad (6)$$

Характеристики точности и чувствительности моделей. Под общей погрешностью модели подразумевается ошибка аппроксимации моделью модуля сопротивления z (z_c или z_k), которая определялась как разница модулей расчетного и опорного ("истинного") значения z_u (соответственно z_{cu} или z_{ku}). Общая погрешность зависит от структуры и параметров используемой модели, от режима работы трансформатора, при котором определяется сопротивление, от погрешности определения входных переменных (напряжений, токов, углов фаз).

Общую погрешность модели ($D_{\Sigma z}$) представляем как сумму двух составляющих: составляющей D_z , обусловленной погрешностями определения (измерения) входных переменных, и составляющей D_{oz} , определяемой в отсутствие погрешности входных переменных,

$$D_{\Sigma z} = D_z + D_{oz}, \quad D_{\Sigma z} = (|z| - |z_u|) |z_u|^{-1}, \quad D_z = (|z| - |z_0|) |z_u|^{-1}, \quad D_{oz} = (|z_0| - |z_u|) |z_u|^{-1},$$

где $z = z_k, z_c$ – расчетные сопротивления, определенные с использованием диагностических моделей; $z_u = z_{ku}, z_{cu}$ – опорные значения z_k, z_c , которые в случае математического моделирования определяются по (4) или (5) при принятых параметрах трансформатора $R_1, R_2, L_1, L_2, z_m; z_o = z_{ko}, z_{co}$ – сопротивления, определенные с использованием диагностических моделей в отсутствие погрешности входных величин.

Погрешность D_{oz} характеризует адекватность модели, т.е. полноту представления данной моделью свойств объекта для целей исследования. Она показывает минимальную погрешность определения сопротивления в рассматриваемом режиме с использованием данной модели.

Другой показатель качества модели, использованный в работе, – чувствительность выходной величины к изменению входных величин модели (напряжения, токи, углы фаз) [2]. Чувствительность к изменению каждой i -й входной величины отдельно характеризуют безразмерными коэффициентами bz_i . Коэффициенты чувствительности связывают погрешность определения (измерения) входной величины (δ_i) с погрешностью расчета D_z , обусловленной погрешностями измерений,

$$D_z = \frac{|z| - |z_o|}{|z_u|} = \sum_i bz_i \cdot \delta_i, \quad bz_i = \frac{|z| - |z_o|}{p_i - p_{io}} \cdot \frac{p_{ib}}{|z_u|} = \frac{\Delta|z|}{|z_u|} \cdot \frac{p_{ib}}{\Delta p_i}, \quad \delta_i = \frac{p_i - p_{io}}{p_{ib}}.$$

Здесь p_i – значение i -й входной величины, при котором получаем оценку $|z|$; p_{io} – значение i -й величины, при котором получена оценка $|z_o|$; p_{ib} – опорное значение i -й входной величины для расчета коэффициентов и погрешности; δ_i – погрешность измерения i -й величины в относительных единицах.

При оценке чувствительности к погрешности модулей принимаем $p_{ib} = p_{io}$ и коэффициенты безразмерные, а в случае погрешности углов фаз, задаваемой в эл. градусах, принимаем $p_{ib} = 1$, при этом коэффициенты получаем с размерностью 1/градус. В случае малых погрешностей входных величин модели коэффициенты определяются так: $bz_i = (\partial|z| / \partial p_i) \cdot (p_{ib} / |z_u|)$.

При рассмотрении зависимости погрешности D_z от δ для моделей, требующих двух опытов, выделим ситуацию, когда погрешности в первом и втором опытах ($\delta_{i,1}$ и $\delta_{i,2}$) имеют одинаковую составляющую δs_i . Для n -го опыта ($n=1,2$) погрешность измерения представляется суммой одинаковой составляющей и разницы погрешностей двух опытов $\delta_{i,n} = \delta s_i + \text{sign}(\delta_{i,1}) \cdot |\Delta \delta_i| / 2 + (-1)^{n-1} \cdot \Delta \delta_i / 2$, $n=1,2$; где $\Delta \delta_i = \delta_{i,1} - \delta_{i,2}$ – разница погрешности измерений в двух опытах.

В этом случае погрешность определения $|z|$ может быть представлена через составляющую D_{zs} , зависящую только от совпадающей составляющей погрешности измерений, и составляющую $D_{z\Delta}$, зависящую только от разницы погрешностей измерений в двух опытах,

$$D_z = D_{zs} + D_{z\Delta} = \sum_i bzs_i \cdot \delta s_i + 0,5 \sum_i [bz_{i,1} (\Delta \delta_i + \text{sign}(\delta_{i,1}) \cdot |\Delta \delta_i|) - bz_{i,2} (\Delta \delta_i - \text{sign}(\delta_{i,1}) \cdot |\Delta \delta_i|)]; \quad (7)$$

$$bzs_i = (bz_{i,1} + bz_{i,2}) .$$

Таким образом, влияние на D_z одинаковой для двух опытов части погрешности измерений определяет только суммарные коэффициенты чувствительности 1-го и 2-го опытов – bzs_i . Влияние разницы погрешности опытов определяет один из коэффициентов индивидуально: $bz_{i,1}$, если $|\delta_{i,1}| > |\delta_{i,2}|$, или $bz_{i,2}$, если $|\delta_{i,1}| < |\delta_{i,2}|$.

Методика расчета погрешности и чувствительности. При расчете коэффициентов чувствительности следует учитывать размах возможных вариаций (обусловленных погрешностью) входных величин модели. В случае малых погрешностей входных величин коэффициенты находились через производные выходной величины, в случае больших погрешностей – определялись прямым расчетом через отношение приращений выходной и входной величин [2].

Оценка коэффициентов чувствительности сопротивления $z_k = f(\mathbf{Z})$ к малым погрешностям для полных моделей проводилась согласно методу присоединенной системы [2]. Для модели без регуляризации (формула (2)) – по следующим выражениям (аналогично для других величин, например, z_c):

$$bz_i = \frac{\partial |z_k|}{\partial p_i} \cdot \frac{p_{ib}}{|z_u|}, \quad \frac{\partial |z_k|}{\partial p_i} = |z_k| \cdot \text{Re} \left(\frac{1}{z_k} \cdot \frac{\partial z_k}{\partial p_i} \right), \quad \frac{\partial z_k}{\partial p_i} = -\frac{\partial f(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} \cdot \mathbf{I}^{-1} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial p_i} \cdot \mathbf{Z} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial p_i} \right). \quad (8)$$

Для определения коэффициентов модели с регуляризацией СЛАУ (3) получаем следующее выражение производной сопротивления:

$$\partial z_k / \partial p_i = -\partial f(\mathbf{Z}) / \partial \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}^{-1} \cdot \left(\left(\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial p_i} \right)^* \cdot \mathbf{I} + \mathbf{I}^* \cdot \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial p_i} \right) \cdot \mathbf{Z} - \partial \mathbf{U} / \partial p_i. \quad (9)$$

Согласно этому выражению для исследования регуляризованной СЛАУ не требуется формирования никаких дополнительных (относительно исследования первичной СЛАУ) матриц производных.

Для упрощенной модели (6) коэффициенты чувствительности могут быть записаны в явном виде (для модулей безразмерные, для углов фаз – 1/градус)

$$bz_{|U_1|} = \text{Re} \left[\dot{U}_1 (\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2)^{-1} \right], \quad bz_{|U_2|} = -\text{Re} \left[k \dot{U}_2 (\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2)^{-1} \right], \quad bz_{|\dot{I}_1|} = -1, \quad (10)$$

$$bz_{\varphi_{u1}} = \text{Re} \left[j \dot{U}_1 (\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2)^{-1} \right], \quad bz_{\varphi_{u2}} = -\text{Re} \left[j k \dot{U}_2 (\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2)^{-1} \right], \quad bz_{\varphi_{i1}} = 0; \quad j = \sqrt{-1}.$$

При расчете чувствительности и погрешностей необходимо использовать характерные для эксплуатации значения режимных параметров (напряжения, токи, углы фаз). Для получения этих значений использована математическая модель, позволяющая имитировать результаты измерения первых гармоник напряжения, тока, сдвига фаз на выходах обмоток трансформатора конкретного типа, работающего в задаваемом режиме, типичном для его нормальной эксплуатации [5]. Входные переменные модели: энергетические характеристики режима работы, предполагаемые значения которых в эксплуатационных режимах известны, мощность S и коэффициент мощности со стороны нагрузки $\cos \varphi$. Параметры модели: характеристики обмоток каждой фазы $R_1, R_2, L_1, L_2, R_m, M$, которые приближенно определяются по паспортным данным моделируемого трансформатора [4]. Для определения комплексов напряжения и тока обмоток совместно решаются уравнения (1) в А-форме четырехполюсника и уравнение внешней характеристики трансформатора (связь изменения напряжения на обмотке со стороны нагрузки с током нагрузки в режиме, близком к номинальному [4]). В полученные значения модулей и углов фаз могут вноситься искажения, имитирующие погрешности измерения. Полученные таким образом значения рассматривались как результаты опыта измерения режимных параметров трансформатора с характеристиками обмоток фазы $R_1, R_2, L_1, L_2, R_m, M$, работающего в режиме с нагрузкой $S, \cos \varphi$.

Результаты оценок и анализ. Оценки проводились для диагностических моделей двух существенно отличающихся по мощности и напряжению трансформаторов (ТРДЦ 63 МВА 110 кВ и ТДЦ 400 МВА 330 кВ). Модуль мощности нагрузки менялся в пределах 1–0,65 от номинальной и $\cos \varphi$ в пределах 0,95–0,6. Указанному диапазону изменений мощности и косинуса соответствовали следующие изменения режимных параметров (в соответствии с моделью имитации результатов измерений [5]): значения модуля U_1 отличались от номинального на 0,1–0,5%; U_2 – на 4–7%; токи I_1 и I_2 изменялись в пределах от 67% до 111% номинального значения. Наибольшие изменения сдвига фаз наблюдались между напряжениями U_1 и U_2 – в пределах 0,045–0,1 эл.град. Для диагностической модели с регуляризацией СЛАУ (3) коэффициент регуляризации α принимался равным 0,05. Значение определено способом подбора [7] с учетом общей закономерности: уменьшение α приводит к ухудшению устойчи-

ности решения, а увеличение – к ухудшению связи с искомым результатом и потере информативности. Результаты оценок погрешности и чувствительности приведены ниже.

Погрешность, характеризующая адекватность моделей. В отсутствие погрешности измерений ($\delta=0$) погрешность D_{oz} модели с уравнениями (2) в данном исследовании определяется только погрешностью вычислений и составляет не более 10^{-9} %, так как сопротивления фактически определяются уравнениями "истинной", соответствующей используемой математической модели объекта, диагностической модели. В случае модели с регуляризацией СЛАУ (3) эта составляющая погрешности также пренебрежимо мала ($<10^{-6}$ %).

Для упрощенной модели (6) погрешность D_{oz} значительно больше и при изменении нагрузки в вышеуказанных пределах изменялась от 0,14% до 0,375%. Большее значение погрешности соответствует меньшим значениям мощности и косинуса нагрузки (0,65 номинальной и 0,6 соответственно).

Отличия относительных значений погрешности адекватности D_{oz} для двух рассмотренных трансформаторов в одинаковых режимах незначительны.

Погрешность моделей, вызванная погрешностью измерений. При анализе погрешности D_z область возможных погрешностей входных величин диагностических моделей определялась, исходя из погрешности доступных в эксплуатации средств измерений (измерительные трансформаторы класса точности 0,5 и 1, угловая погрешность 0,3–0,5 эл. градуса). Отсюда интересующая область погрешности измерений для модулей сигналов – до 1%, для фазных углов – до 0,5 эл. градуса. Указанные максимальные значения погрешности при анализе чувствительности необходимо рассматривать как большие искажения, контролируя возможность применения коэффициентов определенных по производным.

Значения коэффициентов bz_i (малые погрешности) исследованных моделей, рассчитанные по (8)–(10) для характерного режима работы трансформаторов, приведены в табл. 1 (для двух опытов разница мощности нагрузки в опытах составляла $\approx 1\%$: 0,9 и 0,91 номинальной при одинаковых косинусах 0,8).

Таблица 1

Транс- модель	Мо- дель	Контр. вели- чина	коэффициенты для модуля (безразм.)								коэффициенты для угла фаз (1/градус)						
			U_1		U_2		I_1		I_2		$\varphi i1$		$\varphi i2$		$\varphi i1, \varphi i2$		
			1опыт	2опыт	1	2	1	2	1	2	1опыт	2опыт	1	2	1	2	
ТРДЦ 63МВА	2)	$-z_c$	-579	580	498	-497	40,8	-41,3	40,5	-41,0	-9,81	9,81	9,87	-9,87	-(0,02...0,035)		0,02...0,035
		$-z_k$	-537	538	458	-458	78,8	-79,8	0,0	0,0	-9,88	9,88	9,87	-9,87	$<5,6 \cdot 10^{-3}$		$5,6 \cdot 10^{-3}$
	3)	z_c	0,52	6,26	-0,42	-5,35	-0,05	-0,46	-0,05	-0,45	0,014	0,11	-0,013	-0,11	$-1,5 \cdot 10^{-4} \dots 0$		$<2,0 \cdot 10^{-4}$
		z_k	0,73	6,05	-0,62	-5,15	-0,11	-0,90	0,0	0,0	0,013	0,11	-0,013	-0,11	$<10^{-5}$		$<10^{-5}$
6)	z_c	6,84		-5,84		-1		0		0,125		-0,125		0			
ТДЦ 400МВА	2)	z_c	-545	545	464	-463	40,6	-41,1	40,4	-40,9	-9,44	9,44	9,50	-9,50	-(0,03...0,034)		0,03...0,034
		z_k	-502	503	424	-424	78,4	-79,4	0,0	0,0	-9,50	9,50	9,50	-9,50	$<3,4 \cdot 10^{-3}$		$-3,4 \cdot 10^{-3} \dots 0$
	3)	z_c	-2,22	8,55	1,91	-7,24	0,16	-0,65	0,15	-0,65	-0,033	0,15	0,034	-0,15	$-3,3 \cdot 10^{-4} \dots 0$		$<3,4 \cdot 10^{-4}$
		z_k	-1,80	8,14	1,52	-6,86	0,28	-1,28	-10^{-3}	-10^{-3}	-0,034	0,15	0,034	-0,15	$(-1 \dots 2,3) \cdot 10^{-5}$		$-4,5 \cdot 10^{-5} \dots 0$
6)	z_c	6,43		-5,43		-1		0		0,121		-0,121		0			

В соответствии с (7) при коэффициентах bz_i с разными знаками в опытах одинаковая составляющая погрешности δs_i приводит к возникновению меньшей погрешности определения $|z|$, чем такая же по величине δ , но действующая в одном опыте. Для модели (2) D_z возникает, в основном, в результате отличия погрешности в опытах, $D_z \approx D_{z\Delta}$. В табл. 2 приведены значения суммарных коэффициентов bzs_i (ТРДЦ 63 МВА 110 кВ, тот же режим работы, что и для табл. 1). Эти коэффициенты мало зависят от типа рассмотренных трансформаторов (отличия $<10\%$ для модулей напряжения).

Непосредственный расчет погрешности определения $|z|$ позволил выделить несколько характерных типов зависимостей D_z во всей интересующей области погрешности входных величин δ (большие погрешности: модулей сигналов – до 1%, фазных углов – до 0,5 эл. градуса): линейная с постоянной в области рассмотренных δ чувствительностью; сильно нелинейная с постоянным возрастанием и D_z и bz_i (соответствует неустойчивости решений); нелинейная с ограниченными значениями D_z (не превышают D_{oz} упрощенной модели) и ограниченными изменениями коэффициентов.

Для рассмотренных моделей характерны следующие закономерности зависимостей D_z и чувствительности от величины погрешности δ (типичная ситуация $\delta_{i,1} \neq \delta_{i,2}$): для всех моделей наибольшее влияние на D_z оказывают погрешности модуля и угла фаз напряжения; в случае $\delta_{i,1} = \delta_{i,2}$ и для упрощенной модели зависимости всегда линейные (для двух опытов коэффициенты чувствительности соответствуют табл. 2); сильная нелинейность характерна для модели с нерегуляризованной СЛАУ; модель с регуляризацией (3) характеризуется для напряжений линейной зависимостью D_z , а для токов – либо нелинейной зависимостью с ограниченным значением D_z (при расчетах для $|z_c|$), либо нелинейной с неограниченным ростом D_z (при расчетах для $|z_k|$).

При изменении параметров режима трансформатора в рассмотренном диапазоне размах изменения коэффициентов bz_i исследуемых моделей примерно одинаков: для модулей напряжений – 90...110% среднего значения, для модулей тока – 1...15%, для значимых по величине ($>10^{-4}$) коэффициентов углов фаз 100...150%. Коэффициенты bzs_i значительно изменяются только для модели с регуляризацией и только для модулей напряжения: 100...120%. Меньшие значения коэффициентов для модулей напряжений наблюдаются при большей мощности и большем косинусе, а для углов фаз – при большей мощности и меньшем косинусе.

Значительный интерес представляет зависимость D_z от различия характеристик режимов трансформатора в двух опытах. При увеличении отличия в характеристиках режимов коэффициенты bz_i модели (2) по модулю уменьшаются, сближаясь (не становясь меньше) со значениями для модели (3). Рост разницы модуля мощности нагрузки от 1% до 10% (примерно такая же разница модулей токов) приводит к уменьшению bz_i модели (2) примерно в 10 раз (1%, табл. 1), зависимость D_z от δ становится близка к линейной. Но и коэффициенты чувствительности, и погрешность D_z модели (2) остаются в несколько раз большими соответствующих значений других моделей. Аналогично поведение характеристик модели (2) при увеличении разницы в $\cos\varphi$ опытах.

Для модели (3) коэффициенты чувствительности bz_i увеличиваются в несколько раз с ростом отличия мощности нагрузки или $\cos\varphi$ от 1% до 10% (табл. 1), а при дальнейшем росте до 25% мало изменяются. При увеличении отличия параметров между опытами до 10% суммарные коэффициенты bzs_i для напряжения (модуля, угла) уменьшаются примерно на 30%. При уменьшении отличия режимов в опытах суммарные коэффициенты bzs_i по величине стремятся к коэффициентам bz_i упрощенной модели.

Сравнение и рекомендации касательно использования моделей. По полученным данным сделаны оценки (табл. 3) требуемой погрешности измерения режимных параметров (первые гармоники) для гарантированного получения погрешности расчета модуля сопротивления 1% (при типичных условиях проведения измерений, таких же, как для табл. 1).

Модель на основе СЛАУ без регуляризации (2) следует использовать только при равенстве погрешностей измерения режимных параметров в 1 и 2 опытах. Учитывая, что обеспечить полную идентичность погрешности δ в двух опытах на практике невозможно, а в других случаях модель имеет очень высокие значения bz_i и нелинейно растущую с ростом δ погрешность D_z , использовать эту модель нужно очень осторожно. Упрощенная модель (6) требует одного опыта при измерениях, но обладает незначительной аддитивной составляющей погрешности, зависящей от режима работы трансформатора (0,14...0,375%).

Модель с регуляризацией СЛАУ (3) может использоваться при условии контроля $|z_c|$, но не $|z_k|$. В последнем случае при возможных погрешностях δ наблюдаются высокие значения bz для тока и нелинейное возрастание погрешности D_z . Дополнительная возможность снижения погрешности для этой модели – использование зависимости коэффициентов bz для напряжения от разницы нагрузки в опытах.

При оценке требуемой погрешности измерений (табл. 3) не рассматривалась возможность одновременного влияния нескольких погрешностей, поэтому требования к точности могут оказаться несколько завышенными для случая составляющих суммарной погрешности разного знака. В то же время эти требования более оптимистичны, чем при оценке наихудшего случая.

Заключение. Анализ чувствительности диагностических моделей может выступать инструментом определения необходимой точности методик контроля состояния обмоток под нагрузкой и используемого при этом оборудования, позволяет определять параметры оптимального для контроля с применением той или иной модели режима работы трансформатора.

При использовании рассмотренных диагностических моделей и общедоступных в эксплуатации средств измерений (класс точности 0,5 или 1) уверенное обнаружение недопустимых деформаций обмоток (погрешность определения $|z_c|$ или $|z_k|$ должна быть не хуже 1%) при контроле под на-

Таблица 2

Мо- дель	контр. вели- чина	коэф. для модуля				коэф. для угла фаз (1/градус)			
		U_1	U_2	I_1	I_2	$\varphi i1$	$u2$	$i1$	$\varphi i2$
(2)	z_c	0,50	0,50	-0,50	-0,50	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$-6,5 \cdot 10^{-5}$	$-6,5 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$
	z_k	1	0,0	-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(3)	z_c	6,77	-5,77	-0,50	-0,50	0,124	-0,124	-10^{-4}	$6,7 \cdot 10^{-5}$
	z_k	6,78	-5,77	-1,00	0,0	0,124	-0,124	$-7,0 \cdot 10^{-5}$	0,0

Таблица 3

Мо- дель	контр. вели- чина	погрешность для модуля (%)		погрешность для угла фаз (градус)	
		U	I	φi	φi
(2)	z_c, z_k	<0,002	<0,025	<0,0005	<0,3
(3)	z_c	0,16	2	0,08	–
	z_k	0,165	<0,12	0,08	0,08
(6)	z_c	0,15	1	0,08	

грузкой практически невозможно без обеспечения специальных условий проведения контроля (например, при постоянстве погрешности измерений режимных параметров или при контроле в специально определенных оптимальных рабочих режимах трансформатора).

1. Бутырин П.А., Алтатов М.Е. Непрерывная диагностика трансформаторов // Электричество. – 1998. – №7. – С. 45–55.
2. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
3. Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Мороз Е.Ю., Тарчуткин А.Л. Моделирование переходных процессов в трансформаторе с учетом гистерезисных свойств магнитопровода // Техн. электродинамика. – 2010. – № 2. – С. 11–20.
4. Иванов–Смоленский А.В. Электрические машины. Т. 1. – М.: МЭИ, 2006. – 652 с.
5. Паненко Е.Н. Моделирование измерений для исследования моделей параметрической идентификации силового трансформатора // Сборник тезисов 15 Междунар. научн. конф. "Моделирование. Идентификация. Синтез систем управления". – Донецк: Изд. ИПММ НАН Украины, 2012. – С. 97 – 99.
6. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
7. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений. – С.-Пб.: СпецЛит., 1999. – 240 с.
8. Хоанг Ванг Ньу, Малиновский В.Н. Методы и средства контроля и диагностики состояния обмоток мощных силовых трансформаторов // Электротехника. – 2009.– №10. – С. 36–41.
9. Хренников Л.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях // Электричество. – 2006. – № 7. – С. 17–24.

УДК 621.314

АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ДІАГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

В.К.Беляев¹, канд. техн. наук, В.Д.Ободовський¹, Е.Н.Паненко²

¹ – Науково-виробниче Підприємство «ОСТ», вул. Воровського, 33–Д, Київ, 01054, Україна.

² – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

e-mail: bel_vk@ua.fm

Описано метод дослідження характеристик якості лінійних діагностичних моделей контролю деформації обмоток силового трансформатора, побудованих на основі рівнянь загальної теорії трансформаторів. Отримано вирази для визначення коефіцієнтів чутливості і похибок моделей, які використовують для оцінки модуля опору обмоток. Визначено особливості впливу похибок виміру напруг, струмів, кутів фаз на похибки моделей при режимах роботи трансформатора, близьких до номінального. Бібл. 9, табл. 3.

Ключові слова: діагностика, опір обмоток, модель, похибка, силовий трансформатор, чутливість.

THE ANALYSIS OF SENSITIVITY OF DIAGNOSTIC MODELS FOR THE MONITORING OF A TRANSFORMER WINDINGS CONDITION UNDER LOAD

V. Beliaev¹, V. Obodovskij¹, H. Panenko²

¹ – «Scientific Industrial Enterprise "OST"», str. Vorovskogo, 33–D, Kyiv, 01054, Ukraine.

² – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

e-mail: bel_vk@ua.fm

The technique of definition of characteristics of quality of linear diagnostic models which are used in on-line monitoring systems of condition of power transformer windings by windings resistance measurement is presented. Such diagnostic models are analyzed: model based on simple use of equations system of the general theory of transformers, model with regularization of equations system and the simplified model. Expressions for calculation of sensitivity factors and a lapse of the observed models are gained. Agency features of measuring errors of voltages, currents, angles of phases, on a lapse of the diagnostic models are defined at transformer operation modes which are close to the nominal. It is shown that, using the gained expressions of sensitivity factors and a lapse it is possible to gain necessary accuracy of techniques and the measurement equipment and also to define parameters of an optimum transformer operating mode, which are used at the monitoring of a windings condition with application of the observed models. References 9, table 3.

Keywords: diagnostic, the power transformer, windings resistance, mathematic model, sensitivity factor, a lapse.

1. Butyrin P. A., Alpatov M. E. Continuous diagnostics of transformers// Elektrichestvo. – 1998. – №7. – Pp. 45–55. (Rus)

2. Vlach J, Singkhal K. Computer methods for circuit analysis and design. – Moskva: Radio i sviaz, 1988. – 560 p. (Rus)

3. Zirka S.E., Moroz Yu.I., Moroz E.Yu., Tarchutkin O.L. The modeling of transformer transients taking into account hysteresis properties of core // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – № 2. – Pp. 11–20. (Rus)

4. Ivanov–Smolenskij A.V. Electric machines. Vol. 1. – Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo Energeticheskogo Instituta, 2006. – 652 p. (Rus)

5. Panenko E.N. Modeling of measurements for research of models of parametrical identification of the power transformer // 15–th Intern. scientific conf. "Modeling. Identification. Synthesis of control systems". – Donetsk: Izd. IPMM NAN Ukraine, 2012. – Pp. 97–99. (Rus)

6. Svi P.M. Methods and diagnostic aids of the equipment of a high voltage. – Moskva: Energoatomizdat, 1992. – 240 p. (Rus)

7. Sizikov V.S. Steady methods of processing of measurements results. – S.-Pb.: SpecLit., 1999. – 240 p. (Rus)

8. Khoang Vang Nu, Malinovsky V.N. Methods and devices of control and diagnostics of a windings condition of power transformers // Elektrotekhnik. – 2009. – №10.– Pp. 36–41. (Rus)

9. Khrennikov L.Yu. Principal cause of damage of power transformer windings at short circuits// Elektrichestvo. – 2006. –№ 7. – Pp. 17–24. (Rus)

Надійшла 01.11.12

Received 01.11.12