

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА НА НАЛИЧИЕ ДЕФЕКТОВ В ВИДЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ

Исаев Ю.Н., Елгина Г.А.

ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ» («Национальный исследовательский Томский политехнический университет»), Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: isaev_yusup@mail.ru

В работе рассматривается схема замещения обмотки трансформатора с дефектом типа короткозамкнутый виток. На основе предположения наличия магнитной связи между неповрежденной обмоткой и короткозамкнутым витком строится модель диагностики обмотки трансформатора. Показывается, что при зондировании сканирующим импульсом обмотки трансформатора с дефектом типа короткозамкнутый виток возникают скачки напряжения в неповрежденной части обмотки. По касательным логарифма напряжения неповрежденной обмотки извлекается информация о параметрах короткозамкнутого витка. Приводится пример расчета графической зависимости, демонстрирующей характерный излом производной тока неповрежденной обмотки при наличии дефекта типа короткозамкнутый виток. Приводятся графики, демонстрирующие зависимость излома производной тока от коэффициента рассеяния. В работе показано, что излом производной усиливается при совпадении параметров неповрежденного и короткозамкнутого витков.

Ключевые слова: схема замещения обмотки трансформатора, дефект типа короткозамкнутый виток, коэффициент рассеяния.

THE METHOD OF DIAGNOSIS OF TRANSFORMER WINDINGS FOR DETECTING CLOSE LOOP LIKE DEFECTS

Isaev Y.N., Elgina G.A.

National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin prospect, 30), e-mail: isaev_yusup@mail.ru

In this paper the equivalent circuit of the transformer winding with closed loop like defect have been considered. Based on the assumption of having the magnetic coupling between the intact coil and the closed loop coil the model of diagnosis of the transformer winding have been proposed. It have been shown that when the scanning by probing pulse of transformer winding with closed loop type defect the voltage jumps has occur in the intact part of the winding. By tangents to the logarithm of voltage of intact winding the information about the parameters of a closed loop has extracted. An example of calculating the dependence plot which shows the fracture of current derivative of the intact winding when closed loop type defect is occur has been presented. The graphs of dependence of break of the current derivative for the scattering coefficient has been presented. It is shown that the break of the current derivative increases when the coincidence of parameters of intact and close loop windings take place.

Keywords: equivalent circuit of the transformer winding, the closed loop type defect, the scattering coefficient.

Введение

Одним из возможных дефектов обмотки трансформатора является наличие короткозамкнутых витков. Электротехническую схему обмотки трансформатора с короткозамкнутым витком можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 1.

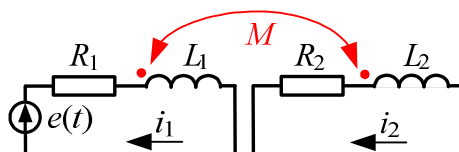


Рис.1. Схема обмотки трансформатора с короткозамкнутым витком

В приведенной схеме первичная обмотка – неповрежденная часть обмотки, вторая часть – короткозамкнутая поврежденная часть обмотки. Информация о параметрах поврежденной части обмотки отсутствует и ее можно восстановить с помощью косвенных методов.

Авторами предлагается метод, позволяющий определить наличие дефекта в виде короткозамкнутого контура. Метод основан на наличии взаимной магнитной связи между неповрежденной и поврежденной частями обмотки трансформатора. Далее приведено подробное описание предлагаемого метода.

Постановка задачи и основные соотношения

Схема, состоящая из первичного и вторичного контура, приведена на рисунке 1, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + M \frac{di_2}{dt} = e(t); \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Систему уравнений (1) для численного расчета переходных процессов [1, 5] особенно при произвольной форме внешнего воздействия $e(t)$ удобнее представить в виде уравнений состояния:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_1 L_1}{L_2 L_1 - M^2} & \frac{R_2 M}{L_2 L_1 - M^2} \\ \frac{R_1 M}{L_2 L_1 - M^2} & -\frac{R_2 L_2}{L_2 L_1 - M^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{e(t) L_2}{L_2 L_1 - M^2} \\ -\frac{e(t) M}{L_2 L_1 - M^2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

или в краткой форме:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \mathbf{B}, \quad (3)$$

где \mathbf{A} – матрица состояния, \mathbf{B} – вектор правых частей.

Характеристические корни дифференциального уравнения являются собственными числами матрицы состояния \mathbf{A} , а постоянные времени являются собственными числами отрицательной инверсной матрицы состояния $\mathbf{A}_{inv} = -\mathbf{A}^{-1}$. Запишем явный вид характеристического уравнения, решением которого являются две величины: переходная – T' и сверхпереходная – T'' постоянные времени:

$$T^2 - rt(\mathbf{A}_{inv})T + |\mathbf{A}_{inv}| = 0 \rightarrow T^2 - (T_{10} + T_{20})T + T_{10}T_{20}\sigma = 0, \quad (4)$$

где $rt(\mathbf{A}_{inv})$ – след матрицы \mathbf{A}_{inv} , $|\mathbf{A}_{inv}|$ – определитель матрицы \mathbf{A}_{inv} , $\sigma = 1 - M^2 / L_1 L_2$ – коэффициент рассеяния, $T_{10} = R_1 / L_1$, $T_{20} = R_2 / L_2$ – постоянные времени первичного и вторичного контуров без учета влияния их друг на друга соответственно.

Из характеристического уравнения (4) следует важное соотношение, которое мы будем использовать в дальнейшем [3,4]:

$$T_{10} + T_{20} = T' + T'' \quad (5)$$

Численное решение системы дифференциальных уравнений (2) по методу Рунге – Кутты четвертого порядка представлено в виде графика на рисунке 2. При расчетах были использованы следующие параметры схемы $L_1 = 0,1$ Гн, $L_2 = 0,1$ Гн, $\dot{I} = 0,09$ Гн, $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $e(t) = 1$ В.

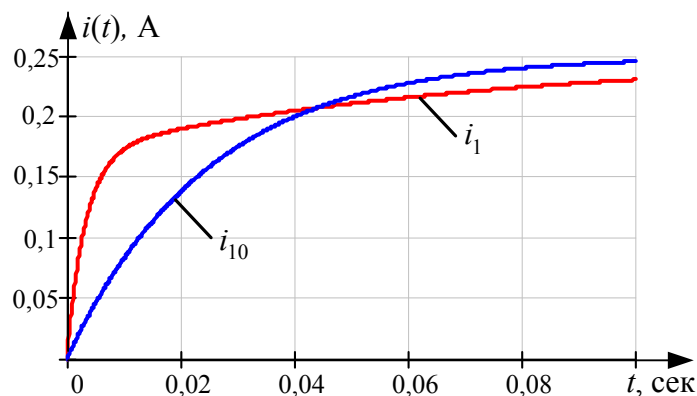


Рис. 2. Ток первичной обмотки $i_1(t)$ при наличии короткозамкнутого витка вторичной обмотки, ток первичной обмотки $i_{10}(t)$ при разомкнутом контуре вторичной обмотки

На рисунке 2 приведены графики изменения тока первичной обмотки при разомкнутом $i_{10}(t)$ и замкнутом $i_1(t)$ контурах вторичной обмотки, где отчетливо виден характерный излом при наличии повреждения. Ток первичной обмотки $i_1(t)$ при разомкнутом контуре вторичной обмотки состоит из двух аperiodических составляющих и константы:

$$i_1(t) = B_1 \cdot e^{(-t/T_1)} + B_2 \cdot e^{(-t/T_2)} + E / R_1 \quad (6)$$

Напряжение на индуктивности первичного контура определяется по выражению:

$$u_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} = A_1 \cdot e^{\left(\frac{-t}{T'}\right)} + A_2 \cdot e^{\left(\frac{-t}{T''}\right)} \quad (7)$$

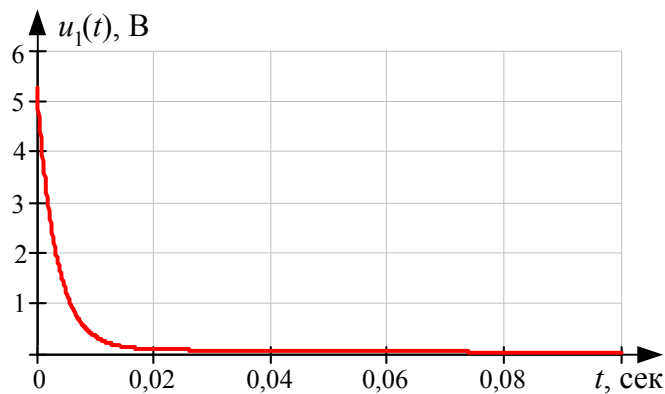


Рис 3. Напряжение на индуктивности первичного контура

В начальной стадии переходного процесса относительный вклад второго слагаемого, в которое входит сверхпереходная постоянная времени T'' , больше первого слагаемого, поэтому напряжение и его логарифм можно записать в виде:

$$t \rightarrow 0, u_1(t) \approx A_2 \cdot e^{\left(\frac{-t}{T''}\right)} \rightarrow \ln(u_1(t)) = \ln(A_2) - \frac{t}{T''}. \quad (8)$$

При стремлении переходного процесса к установившемуся режиму относительный вклад первого слагаемого, в которое входит переходная постоянная времени T' , больше второго слагаемого, следовательно, напряжение и его логарифм можно записать в виде:

$$t \rightarrow \infty, u_1(t) \approx A_1 \cdot e^{\left(\frac{-t}{T'}\right)} \rightarrow \ln(u_1(t)) = \ln(A_1) - \frac{t}{T'}. \quad (9)$$

Вышесказанные соображения заметно проявляются на графике, приведенном на рисунке 4. Таким образом, касательные прямые к функции $\ln(u_1(t))$ в начальный и в конечный момент времени имеют наклоны, пропорциональные корням характеристического уравнения или обратно пропорциональные постоянным времени сверхпереходной T'' и переходной T' соответственно.

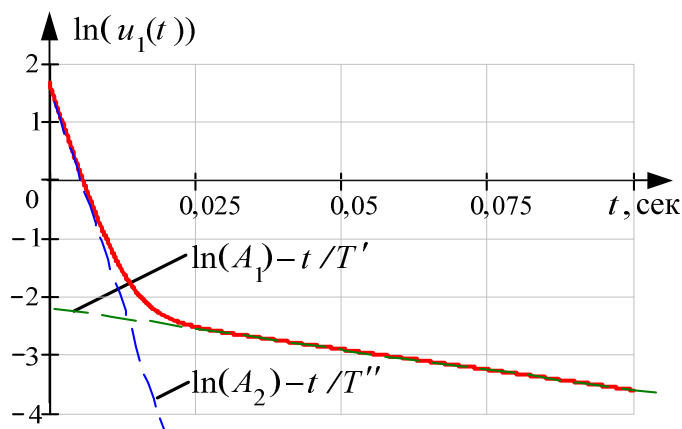


Рис. 4. Логарифм напряжения на индуктивности первичного контура

Определяя из графика (рисунок 4) постоянные времени T'' и T' , можно рассчитать параметры короткозамкнутого витка, используя соотношение (5):

$$T_{20} = T' + T'' - T_{10}. \quad (10)$$

Последнее соотношение содержит в себе сопротивление и индуктивность короткозамкнутого контура. Если предположить, что сопротивление провода короткозамкнутого витка такое же, как у неповрежденного витка, то можно определить индуктивность короткозамкнутого витка, и возможна оценка количества короткозамкнутых витков.

Если во вторичной обмотке имеется короткозамкнутый виток, то при подаче напряжения на первичную обмотку возникнет характерный излом тока первичной обмотки.

Исследования показывают, что излом особенно четко проявляется при одинаковых параметрах первичной и вторичной обмотки, при этом сильно проявляется влияние коэффициента рассеяния. В качестве демонстрации на рисунке 5 приведен график переходной постоянной времени T' в зависимости от коэффициента рассеяния σ . Очевидно, что разность между единицей и полученными графиками есть зависимость сверхпереходной постоянной времени T'' от коэффициента рассеяния. На рисунке 5 она показана для кривой 1.

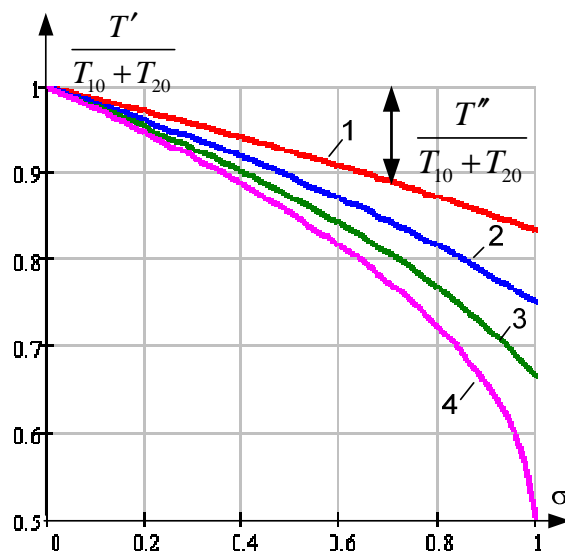


Рис. 5. Зависимость переходной T' и сверхпереходной T'' постоянных времени от коэффициента рассеяния σ : 1 – при $T'' = T'$, 2 – при $T' = 2T''$, 3 – при $T' = 3T''$, 4 – при $T' = 5T''$

По графику видно, что при приближении значений параметров контуров друг к другу сильнее проявляется действие коэффициента рассеяния σ .

В соответствии с предлагаемым подходом, если в обмотке присутствует дефект в виде короткозамкнутого витка при воздействии сканирующего импульса на неповрежденную

обмотку, должны проявляться скачки напряжения. Продемонстрируем это на модели, решив систему дифференциальных уравнений (2) при воздействии импульсного напряжения.

$$e(t) = \begin{cases} e^{-(t-0,01)^{10} \alpha} & \text{при } t \leq 0,05 \\ 0 & \text{при } t > 0,05 \end{cases}, \quad \alpha = 10^{20}$$

Результаты расчетов приведены на рисунке 6. Из графиков следует, что при воздействии импульсного напряжения на неповрежденную часть обмотки, при наличии дефекта в виде короткозамкнутого контура появляются резкие скачки напряжения (рис. 6,б).

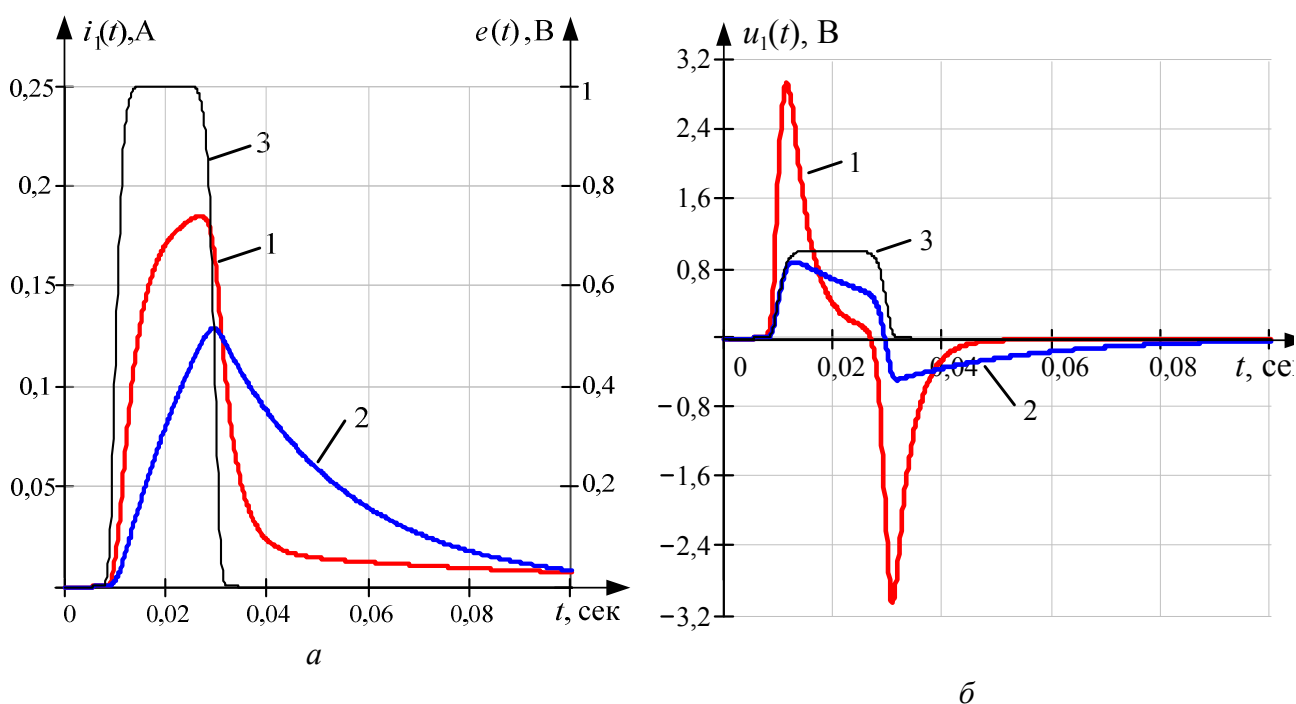


Рис. 6. Зависимость тока (а) и напряжения (б) первичной обмотки при воздействии импульсного напряжения $e(t)$, 1 – при разомкнутом вторичном витке, 2 – при замкнутом вторичном витке, 3 – воздействующий импульс (шкала с правой стороны)

Выводы

1. При наличии дефекта в обмотке трансформатора в виде короткозамкнутого витка, в токе первичной обмотки появляется излом производной тока или, что то же самое, скачок напряжения в витках первичной обмотки.
2. Представление логарифма напряжения первичной обмотки от времени имеет два наклона. Величины наклонов обратно пропорциональны переходной и сверхпереходной постоянным времени. Используя дополнительное соотношение (5), можно определить параметры короткозамкнутого витка.
3. Скачок напряжения в первичном витке проявляется сильнее, когда параметры первичного и вторичного витков близки по значению, также при этом сильнее проявляется влияние коэффициента рассеяния.

4. При воздействии импульсного напряжения на неповрежденную часть обмотки, при наличии дефекта в виде короткозамкнутого витка, на первичной обмотке проявляются скачки напряжения. Скачки проявляются сильнее, когда параметры витков близки друг другу по значениям.

5. Предложенный метод может позволить усовершенствовать средства диагностики повреждений обмоток трансформатора.

Список литературы

1. Исаев Ю.Н., Купцов А.М. Практика использования системы MathCAD в расчетах электрических и магнитных цепей. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. – 180 с.
2. Пивняк. Г.Г., Винославский В.Н., Рыбалко А.Я., Несен Л.И. Переходные процессы в системах электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 540 с.
3. Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусев Ю.П., Пиратов М.В. Переходные процессы в энергетических системах. – М.: Издательский Дом МЭИ, 2008. – 414 с.
4. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: АРИС. 2010. – 518 с.
5. Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. – М.: Мир, 1990. – 512 с.

Рецензенты:

Усов Ю.П., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Сивков А.А., д.т.н., профессор кафедры ЭПП ЭНИН ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.