

А. Б. Саржанова

Алматинский университет энергетики и связи,
г. Алматы, Казахстан

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

В процессе работы на трансформаторные обмотки действуют продольные (осевые) и радиальные силы, вызываемые протеканием тока в обмотках. В данной статье представлен метод моделирования обмоток трансформаторов с помощью пространственного подхода. Показано, что частотный анализ основных электрических цепей может быть применен для исследования механической целостности трансформатора после короткого замыкания, транспортировки и т.д.

Ключевые слова: емкость в витках катушки, шунтирующая емкость, частотный анализ, осевые смещения, радиальная деформация, моделирование.



Жұмыс процесінде трансформатор орамына келіп ағатын токпен ұзына бойы (ось бойымен) және радиалды күш әсер етеді. Осы мақалада кеңістіктің тәсілдемесі көмегімен трансформатор орамын үлгілеу әдісі келтірілген. Тасымалдау, трансформатордың қысқа тұйықталудан кейінгі механикалық бүтіндігін т.б зерттеу үшін электр тізбектік негізінің жиіліктік талдауының қолданылуы көрсетілген.

Түйінді сөздер: ораушы орам сыйымдылығы, шунтталатын сыйымдылық, жиілікті талдау, осьтік жылжу, радиалды деформация, моделдеу.



In operation, on the transformer windings act the longitudinal (axial) and the radial forces caused by current flow in the windings . This article presents a method of modeling of transformer windings with using spatial approach. It is shown that the frequency analysis of the basic electrical circuits may be employed to study the mechanical integrity of the transformer after the short circuit, transportation etc.

Key words: capacitance of the coil windings , shunt capacitance, frequency analysis, the axial displacement, radial deformation simulation.

Введение. Силовые трансформаторы – один из самых дорогостоящих элементов в энергосистеме и их сбой является очень дорогостоящим событием [1]. Силовые трансформаторы в основном участвуют в передаче и распределении энергии [2]. Надежная эксплуатация трансформатора дает преждевременное выявление катастрофических проблем на ранней стадии. Задачи корректного диагностического обслуживания, а также профилактического поддержания силового трансформатора имеют большое значение в связи с необходимостью обеспечения его высокой надежности.

Методы исследования. Хорошо известные методы, такие, как контроль перегрева, анализ масла, измерение частичных разрядов, измерение емкости, анализ частотной развертки и т.д., применяются для конкретного типа проблемы трансформатора [1-4]. В технике частотного анализа низкий усилитель развертки частотного сигнала применяется в конце одной из обмоток трансформатора и отклик измеряют на другом конце обмотки по одной фазе за время. Метод основан на том, что каждая обмотка трансформатора имеет уникальную функцию передачи, которая чувствительна к изменениям в параметрах обмотки, а именно изменениям сопротивления, индуктивности и емкости. Суть метода в измерении сопротивления обмотки трансформатора в широком диапазоне частоты и сравнении результатов этих измерений с эталоном наборов, принятых либо во время установки, либо в любой другой начальный момент времени. Разница в сигнатуре ответов может указывать на проблему в трансформаторе, который может быть предметом дальнейшего исследования с помощью других методов или с помощью внутреннего осмотра. Особенностью данного исследования является применение информационных технологий для численного решения метода диагностики деформации обмоток трансформатора.

Схема замещения цепи обмотки трансформатора, представленная на рис. 1, состоит из емкости в витках катушки C_s , емкости шунтирования C_g , индуктивности самоиндукции L_s , сопротивления r и индуктивности взаимной индукции M_{i-j} , адекватно описывает поведение обмотки трансформатора. Для симмет-

ричной цепи все самоиндуктивности ($l_{s1}, l_{s2}, l_{s3}, \dots$) воспринимаются, как L_s , все серии емкостей в витках катушки ($C_{s1}, C_{s2}, C_{s3}, \dots$) рассматриваются, как C_s , и все емкости шунтирования ($C_{g2}, C_{g3}, C_{g4}, \dots$) принимаются равными C_g (за исключением первой и последней секции емкости шунтирования, которые принимаются, как $C_g/2$). В таком представлении значение любого элемента может изменяться. Кроме того, такое представление позволяет произвести аналитическое исследование, вычисление времени и частот с помощью программного обеспечения для имитационного моделирования цепи (MATLAB). Значения индуктивности, самоиндукции и взаимоиנדукции (табл. 1) были использованы в исследованиях по моделированию [4].

Таблица 1

Индуктивности самоиндукции и взаимоиנדукции L_s, M_{i-j} , мГн

L_s	M_{1-2}	M_{1-3}	M_{1-4}	M_{1-5}	M_{1-6}
0.4310	0.2392	0.1435	0.0947	0.0612	0.0496

Математическая модель обмоток силового трансформатора

Подходящий выбор независимых переменных в случае описания цепи обмоток трансформатора приводит к набору линейно-независимых дифференциальных уравнений первого порядка. Эти переменные и уравнения известны как переменные состояния и уравнения состояния соответственно.

Наиболее общий вид уравнения состояния для линейной, неизменяемый во времени системы, выглядит следующим образом:

$$\dot{x} = [A] x + [B]u \quad (1)$$

$$y = [C] x + [D]u, \quad (2)$$

где x – переменные состояния;

\dot{x} – производные времени переменных состояния;

u – возбуждение или входной вектор;
 y – вектор отклика или выход;
 $\{[A]; [B]; [C]; [D]\}$ – числовые матрицы.

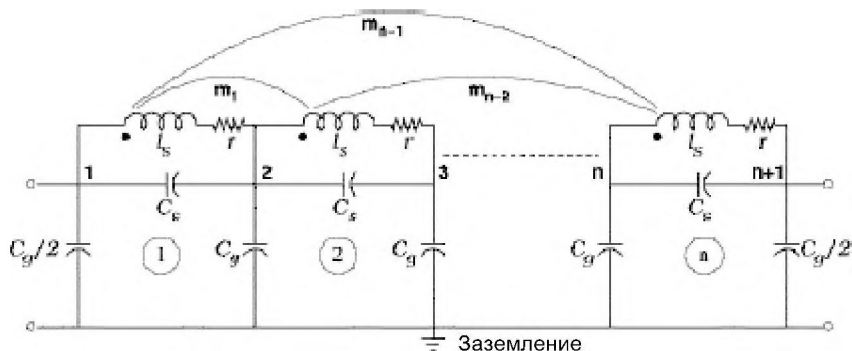


Рис. 1. Схема замещения цепи обмотки трансформатора

Токи через катушки индуктивности и напряжения на шунтах конденсатора (т.е. узловые напряжения) выбраны в качестве желательного набора переменных состояния. Для схемы электрической цепи (рис.1) с заземлением переменными состояниями выбраны токи индуктивности

(i_1, i_2, \dots, i_n) и узловые напряжения (e_2, e_3, \dots, e_n) .

Производные времени узловых напряжений

Определим производные времени узловых напряжений, используя 1-й закон Кирхгофа. Применение 1-го закона Кирхгофа к схеме на рис. 1 (сумма токов, расходящихся от узлов через катушки индуктивности и конденсаторы равна нулю), приводит к следующему выражению:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 - i_1 \\ \vdots \\ i_n - i_{n-1} \end{bmatrix} + [K] \begin{bmatrix} de_1/dt \\ de_2/dt \\ \vdots \\ de_n/dt \end{bmatrix} = 0, \quad (3)$$

где $[K]$ представляет собой матрицу емкостей в витках катушки. Уравнение (3) можно записать в виде:

$$[T] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} + [K] \begin{bmatrix} d\epsilon_1/dt \\ d\epsilon_2/dt \\ \vdots \\ d\epsilon_n/dt \end{bmatrix} = 0, \quad (4)$$

где матрица $[T]$ имеет следующий вид:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Принимая $[E_i] = -[K]^{-1}[T]$, производные времени узловых напряжений могут быть выражены, как

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_1/dt \\ d\epsilon_2/dt \\ \vdots \\ d\epsilon_n/dt \end{bmatrix} = [E_i] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Производные времени токов индуктивности

Для данной схемы (рис. 1) производные времени токов индуктивности (i_1, \dots, i_n) могут быть связаны с напряжением катушки индуктивности (v_1, \dots, v_n), как

$$\begin{bmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \\ \vdots \\ di_n/dt \end{bmatrix} = [L]^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $[L]$ представляет собой матрицу само- и взаимоиндуктивностей цепи.

Выражая напряжения катушки индуктивности через узловые

напряжения и падения напряжения на сопротивлениях, приведенное выше уравнение может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \\ \vdots \\ di_n/dt \end{bmatrix} &= [L]^{-1} \begin{bmatrix} e_1 - e_2 \\ e_2 - e_3 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} + [L]^{-1} \begin{bmatrix} -i_1 r \\ -i_2 r \\ \vdots \\ -i_n r \end{bmatrix} \\ &= [L]^{-1} [T]^t \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} - [L]^{-1} [R] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $[R]$ - диагональная матрица с элементами, равными значению сопротивления r в секции, а $[T]^t$ – транспонированная матрица $[T]$. Присваивая $[L_e] = - [L]^{-1} [T]^t$ и $[L_i] = - [L]^{-1} [R]$, уравнение становится

$$\begin{bmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \\ \vdots \\ di_n/dt \end{bmatrix} = [L_e] \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} + [L_i] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Уравнение состояния

Путем объединения уравнений (6) и (9) уравнение состояния имеет вид:

$$\begin{bmatrix} de_1/dt \\ \vdots \\ de_n/dt \\ di_1/dt \\ \vdots \\ di_n/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & E_i \\ I_e & I_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \\ i_1 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Приведенное выше уравнение может быть также выражено в упрощенном виде, как

$$\dot{x} = [A] x \quad (11)$$

Метод диагностики деформации обмоток трансформатора с помощью частотного анализа

Различные структуры трансформатора имеют разные C_s и C_g , обычно определяющиеся пространственным (емкостным) фактором:

$$\alpha = \sqrt{C_g/C_s}$$

Если существует изменение пространственного фактора, то изменяется емкостный компонент обмотки, поэтому частотная характеристика обмотки указывает на деформацию обмотки [5]. Частотные характеристики обмотки даны (рис.2) для трех различных случаев, где $\alpha = 3$, $\alpha = 7$, $\alpha = 12$. На рис. 2 и рис. 3 представлена имитация частотного анализа единой обмотки трансформатора. Имеется сдвиг в частотной характеристике обмотки, когда шунтирующая емкость постоянна. ($C_g = \text{const}$) при осевом смещении. Кроме того, показано (рис. 2), что увеличение α резонансной частоты обмотки приводит к увеличению ширины полосы резонансной частоты, что свидетельствует об увеличении резонансной частоты при повышении осевого смещения.

Аналогично рис. 3, построенный для 3-х значений $\alpha = 3, 7, 12$, показывает сдвиг в частотной характеристике обмотки, когда межвитковая емкость C_s постоянна при радиальной деформации ($C_s = \text{const}$). При этом резонансная частота смещается влево, а на рис. 2 – вправо. На рис. 2, соответствующему случаю осевой деформации, при увеличении α увеличивается ширина полосы резонансной частоты. Аналогично на рис.3 в случае радиальной деформации, с ростом α ширина полосы резонансной частоты уменьшается.

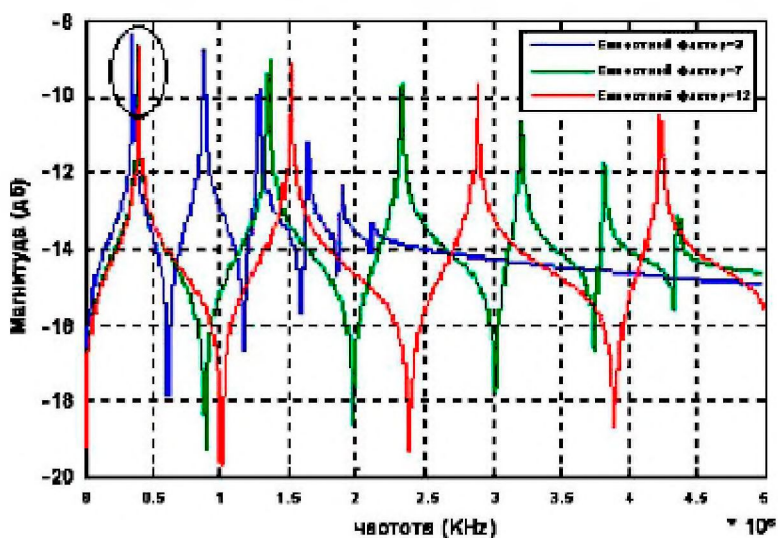


Рис. 2. Результаты моделирования обмотки трансформатора для осевого смещения

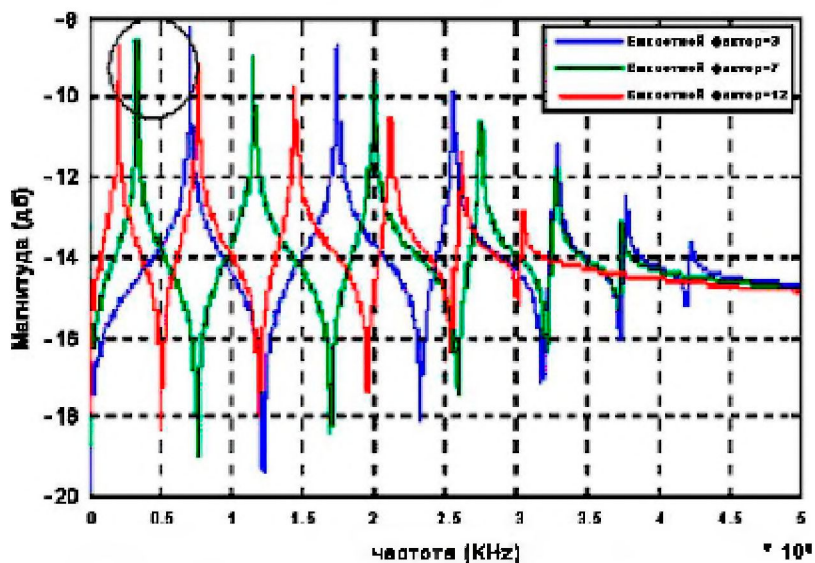


Рис. 3. Результаты моделирования обмотки трансформатора для радиальной деформации

Выводы

В соответствии с полученными данными силовых трансформаторов (автотрансформаторов) установлено, что применение частотного анализа на основе пространственного фактора эффективно для выявления каких-либо дефектов, связанных с механическим повреждением обмотки. Следовательно, можно констатировать, что метод частотного анализа является практическим инструментом для диагностики состояния силового трансформатора и надежным способом для обнаружения короткого замыкания в обмотке. Предложенные выводы базируются на анализе более 20 работ по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, в частности:

- способа диагностики силовых трехобмоточных трансформаторов;
- устройств для проверки технического состояния трансформаторов;
- способа дистанционного определения мест повреждения и контроля за состоянием силовых трансформаторов.

Продление срока службы силовых трансформаторов является актуальной задачей современной электротехнической отрасли, поскольку позволяет значительно экономить средства на проведение глобальных ремонтных работ и замену трансформаторов, частично отработавших свой срок на производстве или в быту.

Литература

- 1 *Васильев А. А.* Электрическая часть станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 575 с.
- 2 *Филиппишин В. Я., Туткевич А. С.* Монтаж силовых трансформаторов. – М.: Энергия, 1981. – 432 с.
- 3 *Ragavan K., Satish L.* Localization of changes in a model winding based on terminal measurements: Experimental study // IEEE Trans. Power Del. – 2007. – Vol. 22, № 3. – P. 1557-1565.

4 *Ragavan K., Satish L.* An Efficient Method to Compute Transfer Function of a Transformer from Its Equivalent Circuit // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, № 2. – P. 780-788.

5 *Sofian D.M., Wang and Z.D., Jarman P.* Interpretation of Transformer FRA Measurement Results using Winding Equivalent Circuit Modelling Technique, in Proc. Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2005), Nashville, TN, Oct. 16-19, 2005. – P. 41-49, 1986