

К СОСТАВЛЕНИЮ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ МНОГООБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ АВАРИЙНЫХ И РАБОЧИХ РЕЖИМОВ

И.Н. Смирнов, А.Н. Алюнов, В.А. Бабарушкин

Вологодский государственный технический университет
160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15

Рассматривается вопрос определения параметров схем замещения многообмоточных трансформаторов по данным регистрации различных режимов при использовании приведенной и неприведенной схем замещения многообмоточного трансформатора.

Ключевые слова: трансформатор, схема замещения, параметры схемы замещения.

Современная электроэнергетика ставит все новые и новые задачи по усовершенствованию электрических расчетов, одной из которых является уточнение схем замещения и определение параметров схем замещения элементов энергосистем, в частности трансформаторов, без перерыва в работе.

Широкое распространение в энергосистеме регистраторов аварийных процессов позволяет измерять параметры нормальных и аварийных режимов. Основное применение регистраторов – запись аварийных режимов для последующего анализа. К регистрируемым параметрам режимов относятся: фазные токи и напряжения; их симметричные составляющие. Новые технические средства, внедряемые в электроэнергетическую систему, позволяют решать задачу определения параметров элементов схемы замещения трансформатора (структура объекта принимается известной) непосредственно из измерений параметров электрического режима в темпе формирования необходимых для этого данных. Необходимая точность расчетов определяется степенью достоверности исходных данных и назначением расчетов. Результаты определения параметров схемы замещения трансформатора могут использоваться при расчетах коротких замыканий (допустимая погрешность 10%, активные сопротивления можно не учитывать), а также (при условии минимальных погрешностей при регистрации и расчетах) для диагностики трансформаторов.

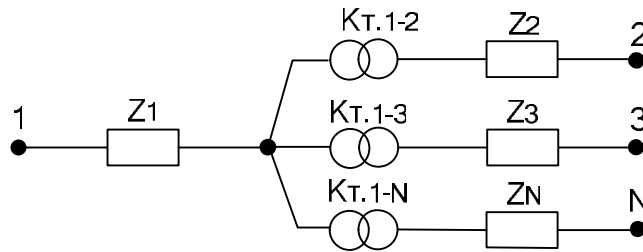
Для реализации вышеизложенного схемы замещения могут формироваться: без трансформаторных связей (приведенные) – используются средние коэффициенты трансформации, оставшаяся часть системы представляется в виде эквивалентной схемы; с сохранением трансформаторных связей – обмотки учитываются в виде последовательно включенного идеального трансформатора, имеющего коэффициент трансформации K_T , и сопротивления (рис. 1).

При этом для обоих случаев необходимо учитывать группу соединения обмоток трансформатора, в связи с чем зарегистрированные токи и напряжения на низших обмотках трансформатора поворачивать на угол $30^\circ \times N$ (N – группа соединения) против часовой стрелки. Для конкретного режима работы токи и напряжения полагаем представленными в комплексной форме записи.

Игорь Николаевич Смирнов – аспирант.

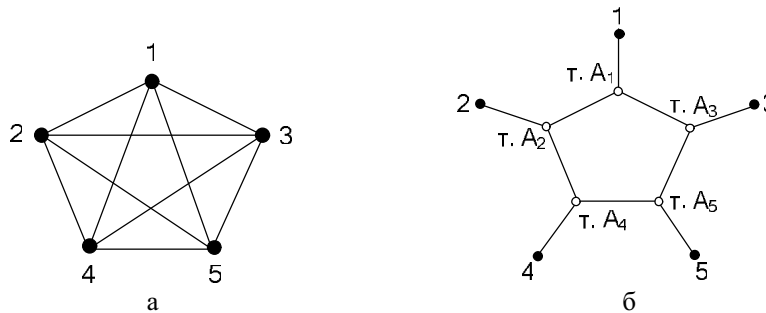
Александр Николаевич Алюнов – к.т.н., доцент.

Валентин Александрович Бабарушкин – к.т.н., доцент.



Р и с. 1. Схема замещения многообмоточного трансформатора с сохранением трансформаторных связей ($K_{T.1-2}$, $K_{T.1-3}$, $K_{T.1-N}$ – коэффициенты трансформации идеальных трансформаторов)

В [1] рассмотрены способы составления схем многообмоточных трансформаторов, а именно схемы замещения для n -обмоточных трансформаторов в виде полных n -угольников, содержащих n сторон и $0,5n \cdot (n-3)$ диагоналей (по общепринятой теории графов в данном случае сторона – узел сети, диагональ – ребро графа), например для 5-обмоточного трансформатора (рис. 2, а).



Р и с. 2. Схема замещения в виде полного 5-угольника (а) и схема замещения с меньшим числом замкнутых контуров (б) для 5-обмоточного трансформатора (цифрами 1, 2, 3, 4, 5 обозначены стороны трансформатора, т. е., например, 1 – высшее напряжение, 2 – среднее и т. д.)

Также в [1] указывается, что более удобны схемы, содержащие меньше замкнутых контуров, имеющие n лучей-ветвей и n -угольник с $0,5n \cdot (n-5)$ диагоналями, например для 5-обмоточного трансформатора (рис. 2, б).

Однако следует отметить, что схема на рис. 2 имеет приоритет при определении ее параметров с помощью регистрации аварийного или рабочего режима, так как она не имеет точек $A_1 - A_5$, значения параметров режима в которых не представляется возможным получить. Следовательно, в дальнейшем используем схему замещения n -обмоточного трансформатора в виде полного n -угольника, содержащую n сторон и $0,5n \cdot (n-3)$ диагоналей (рис. 2, а).

Количество ветвей, отходящих от одной стороны, для такой схемы замещения будет

$$m = n - 1 + n_1, \quad (1)$$

где n_1 – количество дополнительно учитываемых ветвей.

В то же время по [2] минимальное число ветвей схемы замещения n -обмоточного трансформатора

$$t = \frac{n^2 - n}{2}. \quad (2)$$

Количество уравнений для одной (каждой) стороны, необходимое для расчета для приведенной схемы замещения,

$$N_Y = m. \quad (3)$$

Для неприведенной схемы замещения

$$N_Y = 2n - 1. \quad (4)$$

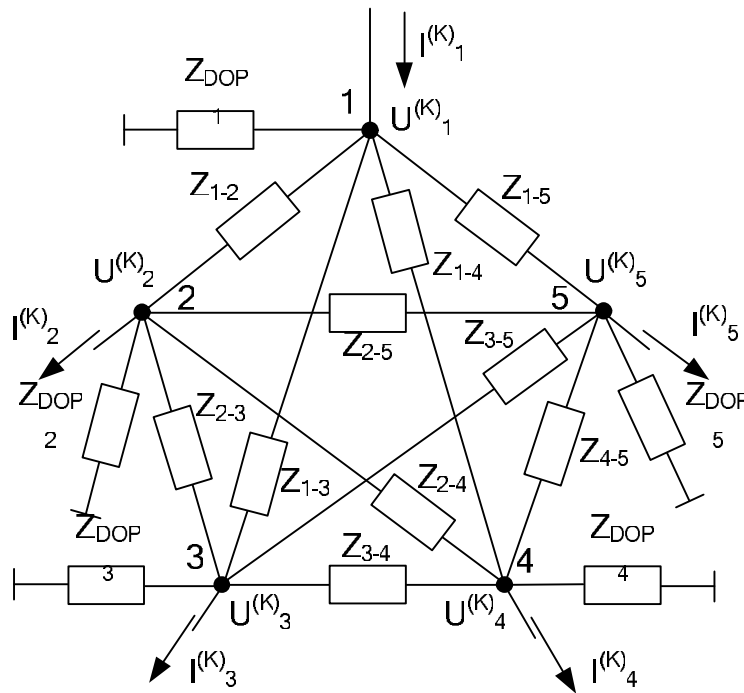
Система уравнений составляется для одной (каждой) стороны, количество систем уравнений равно количеству сторон:

$$N_{C.Y.} = n. \quad (5)$$

Сопротивления, соединяющие стороны (или ветви, отходящие от каждой стороны), обозначаются следующим образом: Z_{i-j} (i – обозначение стороны, от которой отходит ветвь с сопротивлением, j – сторона, в которую входит ветвь с сопротивлением). Например для рис. 1: Z_{1-5} , т. е. ветвь, отходящая от стороны 1, входящая в сторону 5.

Тогда для трансформатора, например, с пятью обмотками (показан на рис. 2) по формулам (1) – (5) имеем для приведенной схемы замещения (пусть для каждой стороны учитывается одна дополнительная ветвь): $m = 5$, $t = 10$, $N_Y = 5$, $N_{C.Y.} = 5$.

Схема замещения (приведенная) для пятиобмоточного трансформатора (для наглядности показан 5-обмоточный, а не n -обмоточный трансформатор) будет выглядеть так (рис. 3).



Р и с. 3. Схема замещения пятиобмоточного трансформатора
 $(I^{(K)}_1, I^{(K)}_2, I^{(K)}_3, I^{(K)}_4, I^{(K)}_5)$ – токи сторон 1, 2...5 в K -том измерении;
 $U^{(K)}_1, U^{(K)}_2 \dots U^{(K)}_5$ – напряжения сторон 1, 2...5 в K -м измерении, $K=1, 2..5$)

Первая система уравнений для стороны 1 (n -обмоточного трансформатора) будет

$$\dot{I}_1^{(1)} = \dot{U}_1^{(1)} \cdot \left(\frac{1}{Z_{1-2}} + \dots + \frac{1}{Z_{1-n}} + \frac{1}{Z_{DOP1}} \right) + \dot{U}_2^{(1)} \cdot \frac{-1}{Z_{1-2}} + \dots + \dot{U}_n^{(1)} \cdot \frac{-1}{Z_{1-n}}; \quad (6)$$

...

$$\dot{I}_1^{(n)} = \dot{U}_1^{(n)} \cdot \left(\frac{1}{Z_{1-2}} + \dots + \frac{1}{Z_{1-n}} + \frac{1}{Z_{DOP1}} \right) + \dot{U}_2^{(n)} \cdot \frac{-1}{Z_{1-2}} + \dots + \dot{U}_n^{(n)} \cdot \frac{-1}{Z_{1-n}}. \quad (7)$$

N -я система уравнений для n -й стороны будет

$$\dot{I}_n^{(1)} = \dot{U}_1^{(1)} \cdot \frac{-1}{Z_{1-n}} + \dot{U}_2^{(1)} \cdot \frac{-1}{Z_{2-n}} + \dots + \dot{U}_n^{(1)} \cdot \left(\frac{1}{Z_{1-n}} + \dots + \frac{1}{Z_{4-n}} + \frac{1}{Z_{DOPn}} \right); \quad (8)$$

...

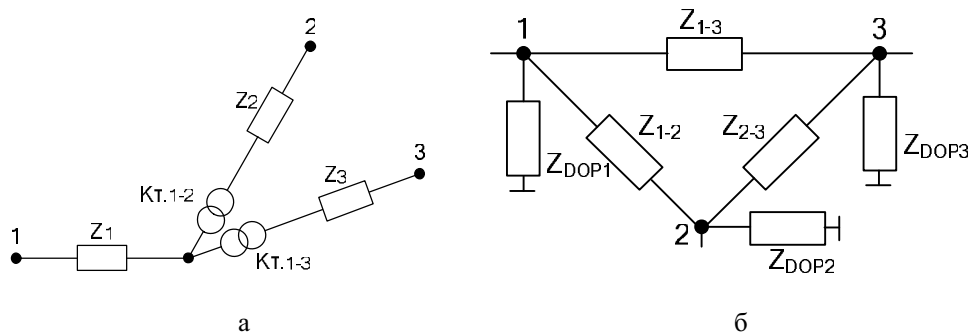
$$\dot{I}_n^{(n)} = \dot{U}_1^{(n)} \cdot \frac{-1}{Z_{1-n}} + \dot{U}_2^{(n)} \cdot \frac{-1}{Z_{2-n}} + \dots + \dot{U}_n^{(n)} \cdot \left(\frac{1}{Z_{1-n}} + \dots + \frac{1}{Z_{4-n}} + \frac{1}{Z_{DOPn}} \right). \quad (9)$$

Всего – совокупность из n систем уравнений. В каждой – n уравнений. Для не приведенной схемы использовали бы совокупность из n систем уравнений с $2n-1$ уравнениями в каждой.

Таким образом, расчет можно вести, используя приведенную схему замещения, для чего привести параметры режима, зарегистрированные с помощью регистратора, к одной ступени напряжения с помощью средних коэффициентов трансформации (при этом учесть группу соединения трансформатора); далее, решив систему (6) – (9), найти приведенные сопротивления; далее через средние коэффициенты трансформации определить изначальные сопротивления обмоток.

Подробнее рассмотрим случай с использованием неприведенной схемы замещения (рис. 1). Так как вывод формул для сопротивлений такой схемы замещения весьма громоздок (тем более n -обмоточного трансформатора), ограничимся известным вариантом для трехобмоточного трансформатора, предложенным в [3]; при этом необходимо учитывать группу соединения обмоток трансформатора.

Согласно [3] для трехобмоточного трансформатора (схема с учетом трансформаторных связей показана на рис. 4, а) справедлива схема замещения рис. 4, б).



Р и с. 4. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Для схемы на рис. 4, б справедливы соотношения:

$$Z_{1-2} = \frac{D}{K_{T,1-2} \cdot K_{T,1-3}^2 \cdot Z_3}; \quad (10)$$

$$Z_{1-3} = \frac{D}{K_{T,1-3} \cdot K_{T,1-2}^2 \cdot Z_2}; \quad (11)$$

$$Z_{2-3} = \frac{D}{K_{T,1-2} \cdot K_{T,1-3} \cdot Z_1}; \quad (12)$$

$$Z_{DOP1} = \frac{D}{K_{T,1-3}^2 \cdot Z_3 + K_{T,1-2}^2 \cdot (Z_2 - Z_2 \cdot K_{T,1-3}) - K_{T,1-3}^2 \cdot K_{T,1-2} \cdot Z_3}; \quad (13)$$

$$Z_{DOP2} = \frac{D}{K_{T,1-3}^2 \cdot Z_3 + K_{T,1-2}^2 \cdot Z_1 - K_{T,1-3} \cdot K_{T,1-2} \cdot Z_1 - K_{T,1-3}^2 \cdot K_{T,1-2} \cdot Z_3}; \quad (14)$$

$$Z_{DOP3} = \frac{D}{(K_{T,1-3}^2 \cdot K_{T,1-2}^2 - K_{T,1-3} \cdot K_{T,1-2}^2) \cdot Z_2 + (K_{T,1-3}^2 - K_{T,1-3} \cdot K_{T,1-2}) \cdot Z_1}, \quad (15)$$

где $D = K_{T,1-3}^2 \cdot Z_1 \cdot Z_3 + K_{T,1-3}^2 \cdot K_{T,1-2}^2 \cdot Z_2 \cdot Z_3 + K_{T,1-2}^2 \cdot Z_1 \cdot Z_2$.

В данном случае сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 есть сопротивления схемы замещения (неприведенной) с учетом трансформаторных связей, которые определяются из сопротивлений $Z_{1-2}, Z_{1-3}, Z_{2-3}, Z_{DOP1}, Z_{DOP2}, Z_{DOP3}$, которые, в свою очередь, находятся из совокупности (6) – (9), но для решения совокупности требуется, в отличие от неприведенной схемы замещения, как минимум 5 различных режимов (соответственно 5 уравнений в каждой системе).

Для иллюстрации вышеизложенного рассмотрим пример. В качестве объекта для анализа возьмем двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения ОАО «Вологодские магистральные сети» со следующими данными: 80 МВ·А, 230/11/11 кВ, Y/Д-11/Д-11; величины сопротивлений прямой последовательности, приведенные к высшему напряжению, используемые при расчетах в ОАО «Вологодские магистральные сети»: $R_B=1,32$ Ом; $X_B=37,8$ Ом; $R_{H1}=2,64$ Ом; $X_{H1}=117,5$ Ом; $R_{H2}=2,64$ Ом; $X_{H2}=117,5$ Ом (в данном случае стороны 1, 2, 3 есть высшее – В, первое низшее – Н1, второе низшее – Н2 соответственно). Данные регистрации режимов взяты из массивов ОАО «Вологодские магистральные сети»:

– первый режим – $\dot{U}_B^{(1)}=127,36e^{j5,03}$ кВ, $\dot{U}_{H1}^{(1)}=5,84e^{j29,62}$ кВ, $\dot{U}_{H2}^{(1)}=5,84e^{j29,68}$ кВ, $\dot{I}_B^{(1)}=132,83e^{j(-20,2)}$ А, $\dot{I}_{H1}^{(1)}=1400e^{j9,94}$ А, $\dot{I}_{H2}^{(1)}=1378e^{j9,6}$ А;

– второй режим – $\dot{U}_B^{(2)}=123,16e^{j6}$ кВ, $\dot{U}_{H1}^{(2)}=5,66e^{j30,3}$ кВ, $\dot{U}_{H2}^{(2)}=5,67e^{j30,3}$ кВ, $\dot{I}_B^{(2)}=133,57e^{j(-16,67)}$ А, $\dot{I}_{H1}^{(2)}=1402e^{j12,61}$ А, $\dot{I}_{H2}^{(2)}=1390e^{j(14,06)}$ А;

– третий режим – $\dot{U}_B^{(3)}=94,15e^{j(5,61)}$ кВ, $\dot{U}_{H1}^{(3)}=4,45e^{j29,15}$ кВ, $\dot{U}_{H2}^{(3)}=4,45e^{j29,1}$ кВ, $\dot{I}_B^{(3)}=110e^{j(-1,8)}$ А, $\dot{I}_{H1}^{(3)}=1144e^{j28}$ А, $\dot{I}_{H2}^{(3)}=1159e^{j(28)}$ А.

Расчет ведем для приведенной схемы замещения, для этого данные трех режимов приводим к ступени высшего напряжения с помощью коэффициента трансформации 230/11, а также учитываем группу соединения обмоток $N=11$, то есть в совокупность подставим следующие данные: $\dot{U}_B^{(1)}=127,36e^{j5,03}$, $\dot{U}_{H1}^{(1)}=122,109e^{j(-0,38)}$, $\dot{U}_{H2}^{(1)}=122,109e^{j(-0,32)}$, $\dot{I}_B^{(1)}=132,83e^{j(-20,2)}$, $\dot{I}_{H1}^{(1)}=66,92e^{j159,94}$, $\dot{I}_{H2}^{(1)}=65,91e^{j159,6}$, $\dot{U}_B^{(2)}=123,16e^{j6}$, $\dot{U}_{H1}^{(2)}=118,345e^{j0,3}$, $\dot{U}_{H2}^{(2)}=118,555e^{j0,3}$, $\dot{I}_B^{(2)}=133,57e^{j(-16,67)}$, $\dot{I}_{H1}^{(2)}=67,07e^{j162,61}$, $\dot{I}_{H2}^{(2)}=66,51e^{j(164,06)}$, $\dot{U}_B^{(3)}=94,15e^{j(5,61)}$, $\dot{U}_{H1}^{(3)}=93,045e^{j(-0,85)}$, $\dot{U}_{H2}^{(3)}=93,045e^{j(-0,9)}$, $\dot{I}_B^{(3)}=110e^{j(-1,8)}$, $\dot{I}_{H1}^{(3)}=54,76e^{j178}$, $\dot{I}_{H2}^{(3)}=55,45e^{j(178)}$.

Имеем следующие системы уравнений:

$$\dot{I}_B^{(1)} = \left(\frac{1}{Z_{B-H1}} + \frac{1}{Z_{B-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP1}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(1)} + \left(\frac{-1}{Z_{B-H1}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(1)} + \left(\frac{-1}{Z_{B-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(1)}; \quad (16)$$

$$\dot{I}_B^{(2)} = \left(\frac{1}{Z_{B-H1}} + \frac{1}{Z_{B-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP1}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(2)} + \left(\frac{-1}{Z_{B-H1}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(2)} + \left(\frac{-1}{Z_{B-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(2)}; \quad (17)$$

$$\dot{I}_B^{(3)} = \left(\frac{1}{Z_{B-H1}} + \frac{1}{Z_{B-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP1}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(3)} + \left(\frac{-1}{Z_{B-H1}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(3)} + \left(\frac{-1}{Z_{B-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(3)}; \quad (18)$$

$$\dot{I}_{H1}^{(1)} = \left(\frac{-1}{Z_{B-H1}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(1)} + \left(\frac{1}{Z_{B-H1}} + \frac{1}{Z_{H1-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP2}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(1)} + \left(\frac{-1}{Z_{H1-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(1)}; \quad (19)$$

$$\dot{I}_{H1}^{(2)} = \left(\frac{-1}{Z_{B-H1}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(2)} + \left(\frac{1}{Z_{B-H1}} + \frac{1}{Z_{H1-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP2}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(2)} + \left(\frac{-1}{Z_{H1-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(2)}; \quad (20)$$

$$\dot{I}_{H1}^{(3)} = \left(\frac{-1}{Z_{B-H1}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(3)} + \left(\frac{1}{Z_{B-H1}} + \frac{1}{Z_{H1-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP2}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(3)} + \left(\frac{-1}{Z_{H1-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(3)}; \quad (21)$$

$$\dot{I}_{H2}^{(1)} = \left(\frac{-1}{Z_{B-H2}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(1)} + \left(\frac{-1}{Z_{H1-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(1)} + \left(\frac{1}{Z_{B-H2}} + \frac{1}{Z_{H1-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP3}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(1)}; \quad (22)$$

$$\dot{I}_{H2}^{(2)} = \left(\frac{-1}{Z_{B-H2}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(2)} + \left(\frac{-1}{Z_{H1-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(2)} + \left(\frac{1}{Z_{B-H2}} + \frac{1}{Z_{H1-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP3}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(2)}; \quad (23)$$

$$\dot{I}_{H2}^{(3)} = \left(\frac{-1}{Z_{B-H2}}\right) \cdot \dot{U}_B^{(3)} + \left(\frac{-1}{Z_{H1-H2}}\right) \cdot \dot{U}_{H1}^{(3)} + \left(\frac{1}{Z_{B-H2}} + \frac{1}{Z_{H1-H2}} + \frac{1}{Z_{DOP3}}\right) \cdot \dot{U}_{H2}^{(3)}. \quad (24)$$

В результате решения систем уравнений (16) – (24) находим сопротивления Z_B , Z_{H1} , Z_{B-H2} , Z_{H1-H2} , Z_{DOP1} , Z_{DOP2} , Z_{DOP3} ; далее, используя первые три равенства (10) – (12) и приняв коэффициенты трансформации равными 1, находим сопротивления Z_B , Z_{H1} , Z_{H2} :

$$Z_B = 1,52 + j38 \text{ Ом};$$

$$Z_{H1} = 3,43 + j112 \text{ Ом};$$

$$Z_{H2} = 1,47 + j123 \text{ Ом}.$$

Из полученных результатов видно, что определение индуктивных сопротивлений дает близкий к каталожным результат, при этом определение активных сопротивлений дает большую погрешность, что связано с большей зависимостью определяемых значений активных сопротивлений от точности расчета, и особенно от снимаемых регистрируемых показателей (количество учитываемых цифр после запятой). В целом же с учетом того, что для расчета коротких замыканий преимущественно используют индуктивные сопротивления трансформаторов, пренебрегая активными, можно заключить, что данная методика является приемлемой. С учетом возможности современных устройств учитывать достаточное количество значащих цифр в регистрируемых показателях и с использованием приборов с высоким классом точности методика может быть использована для диагностики трансформаторов как адекватно отражающая действительные параметры трансформаторов.

Получены системы уравнений для многообмоточного трансформатора, составляющие совокупность для определения параметров схем замещения многообмоточ-

ного трансформатора. В результате решения полученной совокупности однозначно определяются сопротивления трансформаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лейтес Л.В.* Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
2. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. Руководящие указания по релейной защите. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
3. *Беляков Ю.С.* Разработка методов моделирования элементов электрических систем для противоаварийного управления: Дисс. ... канд. техн. наук. – С-Пб: СПбГТУ, 2000. – 260 с.

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2010 г.

UDC 621.314.21

TO COMPILATION EQUIVALENT CIRCUITS MULTIWINDING TRANSFORMERS AND DETERMINATION OF THEIR PARAMETERS ACCORDING REGISTRATION EMERGENCY AND WORKING CONDITIONS

I.N. Smirnov, A.N. Alyunov, V.A. Babarushkin

Vologda State Technical University
15, Lenina st., Vologda, 160000

The question of determining the parameters of equivalent circuits of multiwinding transformers based on data registration of different modes when using the reduced and unreduced equivalent circuits of multiwinding transformer is referred.

Keywords: transformer, equivalent circuit, the parameters of equivalent circuit.

Igor N. Smirnov – Graduate Student.

Alexander N. Alyunov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Valentin A. Babarushkin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.