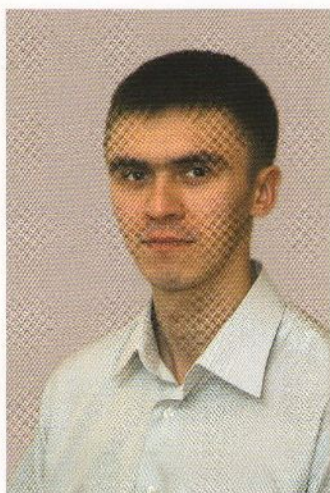


# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА ТРДН-25000/110

УДК 621.314.2

Ильдарханов Р.Г.<sup>1</sup>, инженер филиала ООО "КЭР-Инжиниринг" -  
Инженерный центр "Энергопрогресс"



Предложена математическая модель обмотки низкого напряжения трансформатора марки ТРДН-25000/110 для определения типа дефекта обмотки и его локализации с использованием таблицы соответствия, раскрывающей степень и характер влияния элементов модели на изменения ее передаточной функции, а также таблицы типичных дефектов обмоток с указанием элементов, изменяющихся при соответствующем дефекте. Приведен пример определения типа дефекта обмотки и его локализации с использованием вышеуказанных таблиц.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, метод частотного анализа, передаточная функция, математическая модель.

Силовой трансформатор (СТ) является одним из наиболее важных узлов электрической сети. Особенно актуальным в связи с этим является своевременное выявление развивающихся дефектов обмоток, которое позволяет вывести СТ в ремонт прежде, чем случится авария, связанная с выходом его из строя. По выводам рабочей группы CIGRE WG A2.26, основанным на обобщении международного опыта, метод частотного анализа (МЧА) признан наиболее чувствительным методом диагностики механического состояния обмоток СТ. МЧА является развитием метода низковольтных импульсов, получившего широкое распространение в мире для диагностики деформаций обмоток СТ вследствие воздействия токов короткого замыкания.

Обмотка СТ, по сути, является многочастотным колебательным контуром, состоящим из активных, индуктивных и емкостных элементов. Частотные характеристики СТ несут в себе информацию о свойствах этого колебательного контура. Следовательно, можно соотнести параметры частотных характеристик с параметрами обмотки СТ [1].

Для этого была составлена модель обмотки и получены ее передаточные функции (ПФ) по напряжению, рассчитываемые как отношение выходного напряжения к входному в зависимости от частоты. По модели обмотки были сопоставлены с экспериментальными. За основу взята обмотка низкого напряжения (НН) СТ марки ТРДН-25000/110. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что трансформаторы данной марки широко распространены в отечественной энергосистеме. Моделирование обмотки СТ производилось с помощью математического пакета Multisim 10 с использованием для этого блока Bode Plotter. Принципиальная схема подключения блока Bode Plotter показана на рис. 1.

<sup>1</sup> 420080, Россия, РТ, г. Казань, пр. Ямашева, д.10



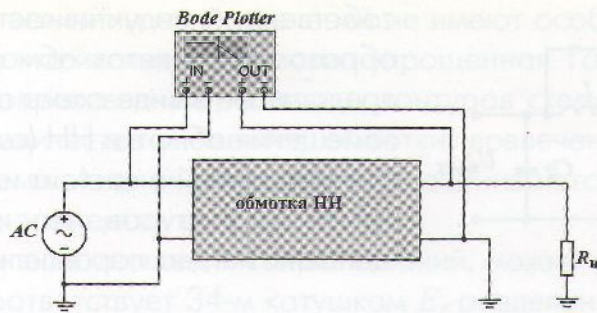


Рис. 1.  
Принципиальная  
схема подключения  
блока Bode Plotter

Структура обмотки НН показана на рис. 2. Обмотка - непрерывная катушечная из прямоугольного медного провода, состоящего из восьми параллельных проводов ПБ сечением  $30 \text{ мм}^2$  и размерами  $(11,6 \times 2,63)/(12,6 \times 3,63) \text{ мм}$ , где в числителе указаны размеры провода без изоляции. Обмотка содержит 2 катушки  $D$  по  $1^{13/18}$  витка, 2 катушки  $C$  по  $1^{16/18}$  витка и 40 катушек  $E$  по  $1^{17/18}$  витка, всего 44 катушки, количество витков  $n = 85$  [2].

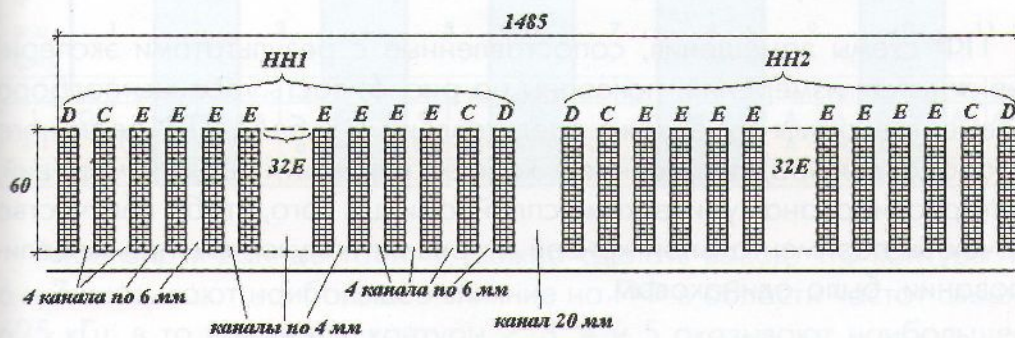


Рис. 2. Структура  
обмотки НН

Структуру схемы замещения обмотки СТ можно определить из рис. 3. На нем изображены вывод начала обмотки 1, вывод конца обмотки 2, упрощенная обмотка НН 3, стержень магнитопровода 4 и бак трансформатора 5.

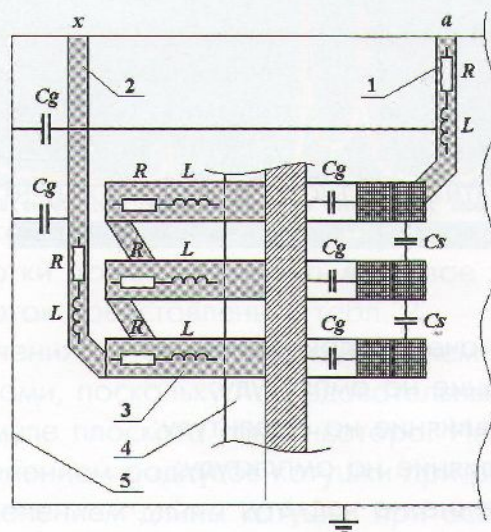


Рис. 3. Структура  
схемы замещения  
обмотки НН

Из рисунка видно, что отводы и витки обмотки обладают омическим сопротивлением  $R$ , собственной индуктивностью  $L$  и емкостью на землю  $C_g$ . Между витками обмотки также существует последовательная емкость  $C_s$ . Взаимная индуктивность между витками учитывается с помощью коэффициента магнитной связи  $M$  и прибавляется к



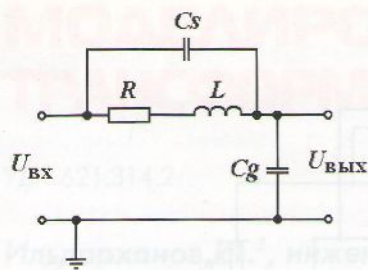
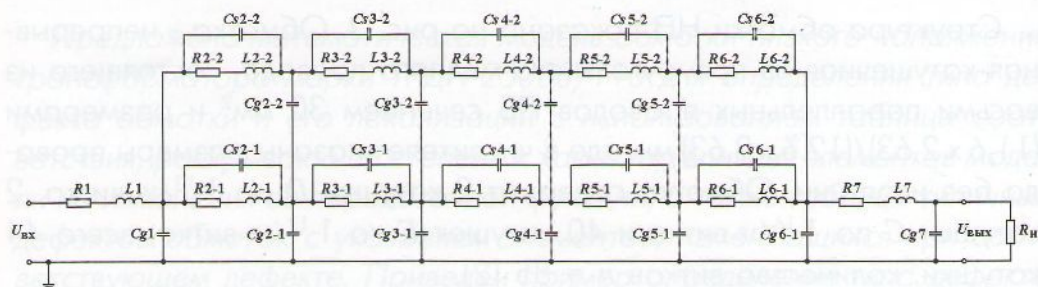


Рис. 4. Схема замещения одного витка обмотки

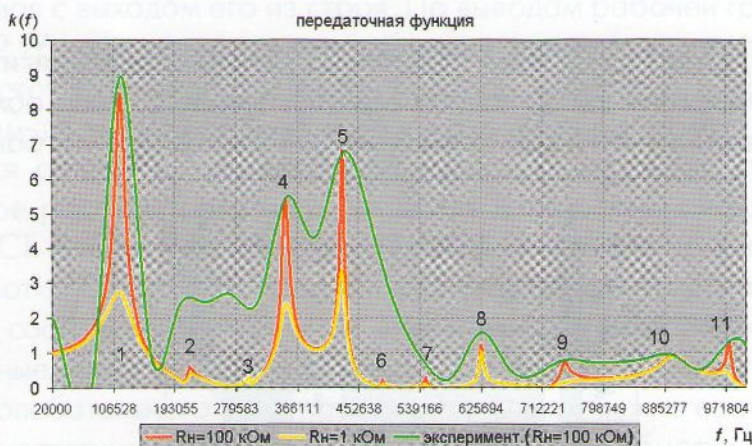
Рис. 5. Схема замещения обмотки НН



собственной индуктивности витка. Таким образом один виток обмотки может быть представлен в виде схемы по рис. 4. Схема замещения обмотки НН (см. рис. 5) является упрощенной и состоит из семи последовательных контуров, пять из которых расщеплены на два параллельных контура.

ПФ схемы замещения, сопоставленные с результатами экспериментальных измерений, показаны на рис. 6, часть таблицы подбора элементов схемы замещения представлена в табл. 1. ПФ реального трансформатора, полученная в ходе экспериментальных измерений, интерполирована кубическими сплайнами для того, чтобы количество точек экспериментальной кривой и кривых, полученных при моделировании, было одинаковым.

Рис. 6. Передаточные функции. Сравнение



Условные обозначения, принятые в табл. 1:

- а - слабое влияние на амплитуду;
- А - умеренное влияние на амплитуду;
- АА - сильное влияние на амплитуду;
- О - слабое влияние на частоту;
- Ч - умеренное влияние на частоту;
- ЧЧ - сильное влияние на частоту.

Суммарное сопротивление схемы значительно превышает значение, измеренное в ходе испытаний исследуемого трансформатора. Однако в процессе подбора сопротивлений значения последних подбирались в угоду заданной амплитуде ПФ при данном сопротивлении нагрузки  $R_H$ .





Абсолютные величины сопротивлений не имеют особого значения, вследствие того что исследуемая схема упрощенная. Гораздо важнее соотношения сопротивлений различных контуров схемы, дающих информацию о количестве элементов обмотки, вовлеченных в тот или иной контур схемы. Аналогичным образом оцениваются и соотношения реактивных элементов схемы.

В итоге, изучив соотношения сопротивлений, можно сделать вывод, что контур 3 соответствует 34-м катушкам  $E$ , разделенным каналами по 4 мм, контур 5 - 6 катушкам  $E$ , разделенным каналами по 6 мм, контур 2 - 2 катушкам  $D$ , контур 4 - 2 катушкам  $C$ , контур 6 соответствует участкам провода между катушками обмотки, контуры 1 и 7 соответствуют отводам начала и конца обмотки соответственно.

4-2	A				A		a		Чa		A		Oa		a		ЧЧAA		AA		OAA		a		OA		a		A	
4-1	a		a		Oa		A		Oa		A		ЧA		A		ЧЧAA		A		AA		OA		a		A			
1	- A		-		-		-		A		-		A		-		-		a		-		-		AA		-			
$i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$	$Cs_i$	$R_i$
№ резонанса	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11									
$i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$	$L_i$	$Cg_i$
1	Oa				a		O	a	O	a					Oa	a	A	A	ЧЧ	ЧЧ	AA	AA								
4-1		Oa	O	a		a	Чa		Oa	Oa	ЧA	Чa	O	a	ЧЧAA	Чa	A	Oa	Oa	a										
4-2	Oa		Oa	Чa		a	Чa		a	O	ЧA	Чa	Oa	a	ЧЧAA	Oa	A	Oa	Oa	a										

Таблица 1. Таблица подбора элементов схемы замещения

Анализируя данные табл. 1, можно сделать вывод, что контуры 1, 6 и 7 оказывают наибольшее влияние на ПФ в области частот свыше 625 кГц, в то время как контуры 2, 3, 4 и 5 оказывают наибольшее влияние на ПФ в области частот до 625 кГц, что вполне соответствует наблюдениям экспериментальных характеристик.

Дефекты обмоток возникают под действием механических усилий различного направления: 1) осевые, 2) радиальные, 3) тангенциальные. К механическим усилиям стоит также отнести вибрацию, приводящую к истиранию витковой изоляции и возникновению межвитковых и междуслойных витковых замыканий. Кроме механических усилий, к витковым замыканиям могут приводить импульсные перенапряжения с крутым фронтом нарастания импульса, а также разрушение изоляции под действием частичных разрядов. Стоит отметить, что в ряде случаев дефекты обмоток могут комбинироваться, например при сжатии части витков обмотки может возникнуть витковое замыкание. Типичные дефекты обмоток представлены в табл. 2.

Изменение значений  $Cs$  связано с изменением расстояния между соседними катушками, поскольку последовательные емкости рассчитываются по формуле плоского конденсатора. Изменение значений  $Cg$  связано с изменением радиусов катушки при радиальной деформации либо с изменением длины катушки при осевых деформациях. Изменение значений  $L$  связано с изменением геометрических размеров катушки и ее формы. Например, при радиальных деформациях изменяется средний радиус катушки, который присутствует в формуле собственной индуктивности кругового кольца прямоугольного сечения [3]. Индуктивность также меняется при витковых замыканиях, т.к. при этом "выключается" часть витка или несколько витков.

Таким образом, сопоставив данные таблиц 1 и 2, а также измене-



ния ПФ, полученные в результате аналогичных измерений одного трансформатора, разнесенных во времени (например, до и после КЗ), можно сделать вывод не только о наличии дефекта и степени его развития, но и о его типе и локализации.

*Пример.* Междуслойное замыкание витков в катушке С.

Согласно таблице 3 уменьшению подвергнутся элементы R4-1, R4-2, L4-1, L4-2. Согласно таблице 2 уменьшение значений R4-1 и R4-2 приведет к незначительному увеличению амплитуды резонансов №2, 7 и 10, к заметному увеличению амплитуды резонансов №1, 4, 5, 6 и к существенному увеличению амплитуды резонанса №8.

Уменьшение L4-1 и L4-2 приведет к незначительному увеличению частоты резонансов №1, 2, 5, 7, 10, к заметному увеличению частоты резонансов №4, 6 и к существенному увеличению частоты резонанса №8. Также уменьшение значений L4-1 и L4-2 приведет к незначительному изменению амплитуды резонансов №1, 2, 4, 5, 11, к заметному изменению амплитуды резонансов №6, 7, 9, 10 и к существенному изменению амплитуды резонанса №8.

ПФ модели с соответствующими изменениями элементов представлены на рис. 7. Кривая а соответствует номинальной схеме замещения, кривая б соответствует схеме замещения с сопротивлениями R4-1 и R4-2, уменьшенными в два раза, и индуктивностями L4-1 и L4-2, уменьшенными на 5 мкГн, кривая в соответствует схеме замещения с сопротивлениями R4-1 и R4-2, уменьшенными в 10 раз, и индуктивностями L4-1 и L4-2, уменьшенными на 10 мкГн.

Как видно из рис. 9, наибольшему увеличению по частоте, как и ожидалось, подверглись резонансы №6 и 8. При этом частоты резонансов №4, 5 и 7 увеличились незначительно.




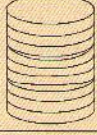

Действующие силы	Тип дефекта		Изменения элементов схемы
1	2	3	4
Осевые	Распрессовка обмотки		Уменьшение значений всех Cs, незначительное увеличение значений L6-1, L6-2
	Сжатие части витков в начале обмотки		Увеличение значений Cs2-1, Cs2-2, уменьшение значений Cg2-1, Cg2-2 и/или увеличение значений Cs4-1, Cs4-2, уменьшение значений Cg4-1, Cg4-2 и/или увеличение значений Cs5-1, Cs5-2, уменьшение значений Cg5-1, Cg5-2
	Сжатие части витков в середине обмотки		Увеличение значений Cs3-1, Cs3-2, уменьшение значений Cg3-1, Cg3-2
	Сжатие части витков в конце обмотки		Увеличение значений Cs2-1, Cs2-2, уменьшение значений Cg2-1, Cg2-2 и/или увеличение значений Cs4-1, Cs4-2, уменьшение значений Cs4-1, Cs4-2

Таблица 2. Основные типы дефектов обмоток





Радиальные	Локальная деформация витков к оси обмотки («полегание» витков) в начале обмотки		Увеличение значений $Cg_{2-1}$ и/или $Cs_{4-1}$ и/или $Cs_{5-1}$ , уменьшение значений $L_{2-1}$ , $L_{2-2}$ и/или $L_{4-1}$ , $L_{4-2}$ и/или $L_{5-1}$ , $L_{5-2}$
	«Полегание» витков в середине обмотки		Увеличение значений $Cs_{3-1}$ и/или $Cs_{3-2}$ , уменьшение значений $L_{3-1}$ , $L_{3-2}$
Радиальные	«Полегание» витков в конце обмотки		Увеличение значений $Cg_{2-1}$ и/или $Cg_{4-1}$ и/или $Cg_{5-1}$ , уменьшение значений $L_{2-1}$ , $L_{2-2}$ и/или $L_{4-1}$ , $L_{4-2}$ и/или $L_{5-1}$ , $L_{5-2}$
	Локальная деформация витков от оси обмотки («грыжа») в начале обмотки		Уменьшение значений $Cg_{2-1}$ и/или $Cg_{4-1}$ и/или $Cg_{5-1}$ , увеличение значений $L_{2-1}$ , $L_{2-2}$ и/или $L_{4-1}$ , $L_{4-2}$ и/или $L_{5-1}$ , $L_{5-2}$
	«Грыжа» в середине обмотки		Уменьшение значений $Cg_{3-1}$ , увеличение значений $L_{3-1}$ , $L_{3-2}$
	«Грыжа» в конце обмотки		Уменьшение значений $Cg_{2-1}$ и/или $Cg_{4-1}$ и/или $Cg_{5-1}$ , увеличение значений $L_{2-1}$ , $L_{2-2}$ и/или $L_{4-1}$ , $L_{4-2}$ и/или $L_{5-1}$ , $L_{5-2}$
Тангенциальные	Скручивание в начале обмотки		Незначительное изменение значений $Cg_{2-1}$ , $Cg_{2-2}$ и/или $Cs_{4-1}$ , $Cs_{4-2}$ и/или $Cs_{5-1}$ , $Cs_{5-2}$
	Скручивание в конце обмотки		Незначительное изменение значений $Cg_{2-1}$ , $Cg_{2-2}$ и/или $Cs_{4-1}$ , $Cs_{4-2}$ и/или $Cs_{5-1}$ , $Cs_{5-2}$
	Скручивание по всей высоте обмотки		Незначительное изменение значений всех $Cs$
Нарушение витковой изоляции	Междуслойное замыкание витков в начале обмотки		Уменьшение значений $R_{2-1}$ , $R_{2-2}$ , $L_{2-1}$ , $L_{2-2}$ и/или $R_{4-1}$ , $R_{4-2}$ , $L_{4-1}$ , $L_{4-2}$ и/или $R_{5-1}$ , $R_{5-2}$ , $L_{5-1}$ , $L_{5-2}$
	Междуслойное замыкание витков в середине обмотки		Уменьшение значений $R_{3-1}$ , $R_{3-2}$ , $L_{3-1}$ , $L_{3-2}$
	Междуслойное замыкание витков в конце обмотки		Уменьшение значений $R_{2-1}$ , $R_{2-2}$ , $L_{2-1}$ , $L_{2-2}$ и/или $R_{4-1}$ , $R_{4-2}$ , $L_{4-1}$ , $L_{4-2}$ и/или $R_{5-1}$ , $R_{5-2}$ , $L_{5-1}$ , $L_{5-2}$

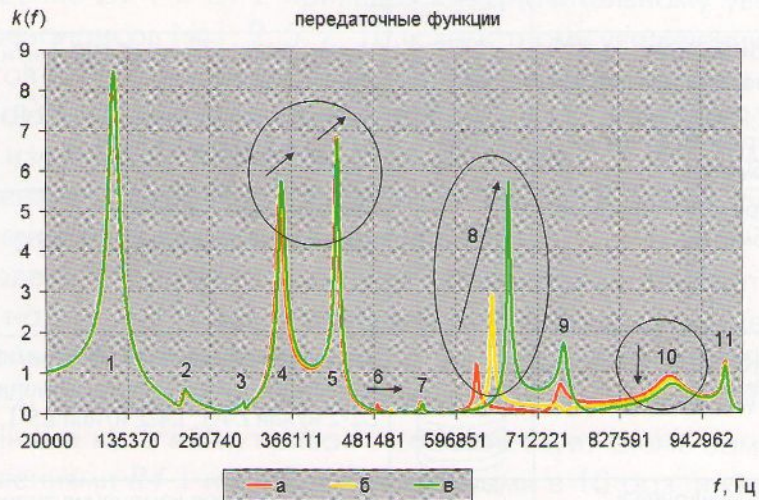
Продолжение  
таблицы 2.

При решении обратной задачи, то есть при выявлении элементов, значения которых изменились, по заданным изменениям ПФ, аналогичным образом следует зафиксировать номера резонансов, подвергшихся изменению, характер и степень их изменения, а затем, с помощью табл. 1, определить, к какому контуру относятся искомые элементы.





Рис. 7. Влияние элементов  $R4-1$ ,  $R4-2$ ,  $L4-1$ ,  $L4-2$  на ПФ схемы замещения



## Выводы

Построена модель обмотки НН силового трансформатора марки ТРДН-25000/110, позволяющая определять тип дефекта обмотки и его локализацию. Приведён перечень возможных дефектов обмоток СТ с указанием элементов схемы замещения, изменяющихся при соответствующем дефекте. Выявлена зависимость между изменениями ПФ и типом дефекта, а также его локализацией в обмотке СТ. Результаты моделирования подтверждаются результатами экспериментальных исследований, что говорит о корректности построенной модели и целесообразности её применения для контроля состояния обмоток НН трансформаторов марки ТРДН-25000/110, а также возможности использования предлагаемой методики построения модели для обмоток СТ других типов.

## Литература

1. A.W.Darwin, D.Sofian, Z.D.Wang, P.N.Jarman. Interpretation of frequency response analysis (FRA) results for diagnosing transformer winding deformation // CIGRE 2009 6th Southern Africa Regional Conference, 503 p.
2. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Учеб. Пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., "Энергия", 1976. - 544 с.
3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. - 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. - 488 с.
4. Ильдарханов Р.Г., Усачев А.Е. Контроль состояния обмоток силовых трансформаторов путём спектрального анализа передаточных функций // Известия вузов. Проблемы энергетики №3-4, 2010. - С. 38-47.