

Анализ частотных характеристик для локализации коротких замыканий в обмотках трансформаторов

ЛАРИН В.С.

Представлен подход к определению наличия и местоположения внутренних коротких замыканий путем анализа частотных характеристик обмоток трансформаторов, основанный на оценке изменений собственных частот колебаний обмоток и их представлении в виде графических образов (паттернов). Приведены результаты исследований физических и математических моделей катушечных обмоток, показывающие характерные паттерны изменений собственных частот при варьировании мест расположения межкатушечных и витковых замыканий вдоль высоты обмотки. Представлены подходы к определению местоположения внутреннего замыкания в катушечной обмотке графическим путем и с помощью полученных эмпирических выражений.

Ключевые слова: трансформаторы, обмотки, короткие замыкания, частотные характеристики

Анализ частотных характеристик (в зарубежной терминологии — Frequency response analysis — FRA) в последние годы находит все большее применение для оценки состояния обмоток силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов.

Для интерпретации результатов FRA-измерений на практике широко используют сравнение между собой измеренных частотных характеристик с помощью корреляционного анализа и индексов [1], показывающих различие частотных характеристик в широком диапазоне частот.

Подход на основе коэффициентов парной корреляции нашел отражение в стандарте [2] и реализован во многих коммерческих измерительных приборах FRA.

Несмотря на свою простоту, данный подход, будучи основанный на интегральных показателях, не позволяет учесть специфику объекта измерений и интерпретировать тип и местоположение дефекта. В стандарте [2] установлены жестко границы трех частотных диапазонов (0÷100 кГц, 100÷600 кГц и 600÷1000 кГц) без учета типов обмоток и характерных значений их собственных частот. Изменения частотной характеристики в первом частотном диапазоне является индикатором серьезного повреждения обмотки, в то время как соответствующие изменения во втором частотном диапазоне при равном коэффициенте парной корреляции классифицируются как менее серьезные повреждения обмотки. Очевидно, что такое разделение на фиксированные частотные диапазоны является весьма условным, отражает отдельные частные случаи и имеет разную степень применимости в зависимости от типа обмоток. Например, для катушечных обмоток высшего напряжения трансформаторов классов напряжения 110 кВ и выше первая собст-

венная частота обычно составляет 10÷20 кГц и в первом частотном диапазоне 0÷100 кГц будут расположены первые 5÷10 собственных частот. Для винтовых и цилиндрических обмоток низшего напряжения классов напряжения 6÷20 кВ первая собственная частота может составлять 200÷300 кГц и первые собственные частоты обмоток окажутся во втором частотном диапазоне (100÷600 кГц).

В [3] было показано, что интерпретация результатов FRA-измерений может быть выполнена качественно иным образом, исходя из анализа особенностей конструкции объекта измерения и применяемых в нем типов обмоток на основе анализа собственных частот колебаний этих обмоток.

В частотной характеристике отдельной обмотки, полученной относительно начала и конца обмотки, содержится набор резонансных и антирезонансных частот, имеющих разную природу. Отдельные резонансные частоты соответствуют собственным частотам колебаний обмоток, которые являются их фундаментальными характеристиками. Эти частоты в первую очередь зависят от электрической длины обмотки, физических параметров продольной изоляции обмотки (например, диэлектрической проницаемости витковой изоляции), расположения и электромагнитной связи отдельных частей обмотки, ограничений на пространственное распределение напряжения внутри обмотки (соединения между частями обмоток, соединения выводов обмоток с землей).

Изменения собственных частот обмоток, как правило, связаны с серьезными повреждениями обмоток и имеют различный графический образ («паттерн») в зависимости от типа повреждения и его местоположения.

В статье подход к интерпретации FRA-измерений с помощью «паттернов» отклонений собственных частот колебаний обмоток развивается на примере внутренних замыканий (витковых и межкатушечных) в обмотках силовых трансформаторов и реакторов.

В рамках оценки состояния силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов на практике представляет интерес решение двух задач:

1) определение наличия внутренних коротких замыканий (КЗ) в обмотках;

2) приближенное определение местоположения КЗ в обмотке.

Применительно к оценке состояния трансформаторов и реакторов в эксплуатации вторая задача является скорее факультативной, поскольку наличие внутреннего КЗ является существенным ограничением их дальнейшей эксплуатации. Однако данная задача востребована в случае последующей разборки и осмотра для идентификации внутренних повреждений, выявления причин повреждений и оценки ремонтпригодности трансформатора (реактора).

Первая задача может быть решена с помощью традиционных методов диагностики, таких как измерение потерь холостого хода, коэффициента трансформации и сопротивления обмотки постоянному току, но, к сожалению, данные методы не могут помочь с решением второй задачи.

Решение первой задачи, определение наличия внутреннего короткого замыкания с использованием FRA может быть выполнено при сравнении частотных характеристик до и после повреждения, а также при сравнении частотных характеристик между фазами одного трансформатора.

В последнее время ведутся работы по развитию интерпретации FRA, выявлению и локализации внутренних замыканий в обмотках. Так, в [4] были представлены результаты измерений на физической модели трансформатора с многослойными цилиндрическими обмотками при варьировании места виткового замыкания и сопротивления переключки, с помощью которой выполнялось это замыкание. В [5] представлены результаты математического моделирования витковых замыканий в многослойной цилиндрической обмотке и получены зависимости отклонений максимумов входного сопротивления обмотки по частоте и амплитуде от местоположения замыкания. В [6] по результатам измерений на физической модели сделан вывод о возможности оценки места межкатушечного замыкания с помощью построения амплитудно-фазовой частотной характеристики (диаграммы Найквиста). В [7] предложен подход к интерпретации внутренних повреждений на основе анализа передаточных функций, а в [8] – на основе построения частот-

ных характеристик в полярных координатах. В [9] приводятся результаты измерений передаточных функций ВН–НН и НН–ВН, а также входного сопротивления многослойной цилиндрической обмотки ВН при замыкании отдельных слоев и отмечается симметричность зависимости изменения импеданса обмотки от местоположения внутреннего замыкания.

Далее приведены результаты исследований, проведенных на катушечных непрерывных обмотках для выявления возможности решения с помощью FRA второй задачи – приближенного определения местоположения внутреннего КЗ в обмотке.

Определение собственных частот колебаний обмотки. Развиваемый в статье подход основывается на анализе изменений собственных частот колебаний обмоток трансформаторов. Для идентификации собственных частот может быть использован подход [3, 10], основанный на сравнении измеренной частотной характеристики и активной проводимости рассматриваемой обмотки при разомкнутой и замкнутой накоротко вторичной обмотке.

Суть данного подхода состоит в том, что на первых собственных частотах в пространственном распределении тока рассматриваемой обмотки имеются узлы, в которых ток меняет направление, в результате чего токи в соседних частях обмотки имеют противоположное направление. Наводимые в витках вторичной обмотки ЭДС взаимно компенсируются, а магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, проникает в магнитопровод без реакции со стороны вторичной обмотки. Таким образом, на частоте, соответствующей одной из первых собственных частот колебаний рассматриваемой обмотки, замыкание накоротко вторичной обмотки практически не оказывает влияния на полное входное сопротивление этой первичной обмотки и на значения ее собственных частот колебаний. Вместе с тем состояние вторичной обмотки, ее замыкание и размыкание на частотах много ниже первой собственной частоты колебаний оказывают влияние на проникновение магнитного потока в магнитопровод и путь, по которому замыкается этот поток, что приводит к существенному изменению полного входного сопротивления рассматриваемой обмотки и резонансным частотам межобмоточного взаимодействия (рис. 1). Данное правило справедливо как для наружных обмоток высшего напряжения, так и для внутренних обмоток низшего напряжения.

Алгоритм определения собственных частот колебаний обмотки [3, 10] содержит следующие основные шаги.

1. По измеренным частотным характеристикам обмотки при разомкнутой и замкнутой накоротко

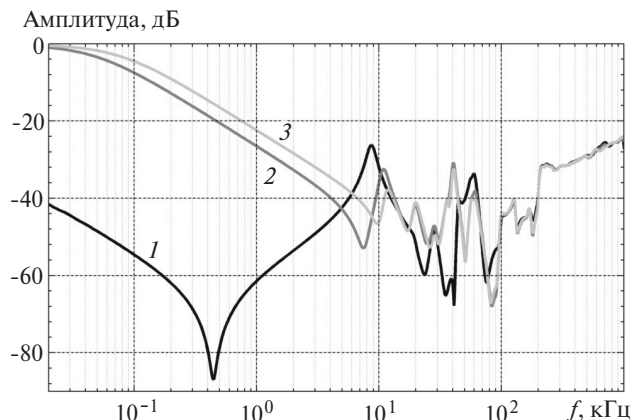


Рис. 1. Частотная характеристика первичной обмотки при разомкнутой и замкнутой частях расщепленной обмотки НН: 1 – обмотки НН1 и НН2 разомкнуты; 2 – обмотка НН1 замкнута; 3 – обмотки НН1 и НН2 замкнуты

вторичной обмотке выполняется приближенная оценка полной проводимости обмотки:

$$\bar{Y}_{12} = \left(\frac{1}{Z_c} + j\omega C_s \right) \frac{\bar{U}_2}{\bar{U}_1 - \bar{U}_2} \approx \left[Z_c \left(\frac{1}{A \angle \varphi} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где \bar{U}_1 и \bar{U}_2 – входное и выходное напряжения; $A = |\bar{U}_2 / \bar{U}_1|$; $\varphi = \angle(\bar{U}_2, \bar{U}_1)$; Z_c – согласующее сопротивление канала измерения отклика FRA-прибора; C_s – емкость на землю относительно канала измерения отклика (емкость высоковольтного ввода и отводов, соединяющих конец обмотки с вводом и другими обмотками, а также емкость измерительных кабелей и соединительных проводов).

2. Вычисляется активная проводимость обмотки \bar{G}_{12} как действительная часть полной проводимости \bar{Y}_{12} .

3. Определяются резонансные частоты, на которых достигаются локальные максимумы активных проводимостей \bar{G}_{12} обмотки при разомкнутой и замкнутой накоротко вторичной обмотке.

4. Для определения собственных частот колебаний обмотки выявляются те резонансные частоты, на которых достигается совпадение частотных характеристик обмотки (активных проводимостей) при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке.

Необходимо отметить, что наличие паразитной емкости C_s приводит к тому, что погрешность определения полной и активной проводимости по результатам FRA-измерений увеличивается с ростом частоты. Это проявляется, например, в аномально резком увеличении активной проводимости, полученной из выражения (1) с увеличением частоты (рис. 2,а). Однако, как показывает практика, данная погрешность начинает сильно влиять на частотах ближе к 1 МГц и в целом не мешает определять собственные частоты колебаний обмоток в диапазоне до нескольких сотен кГц.

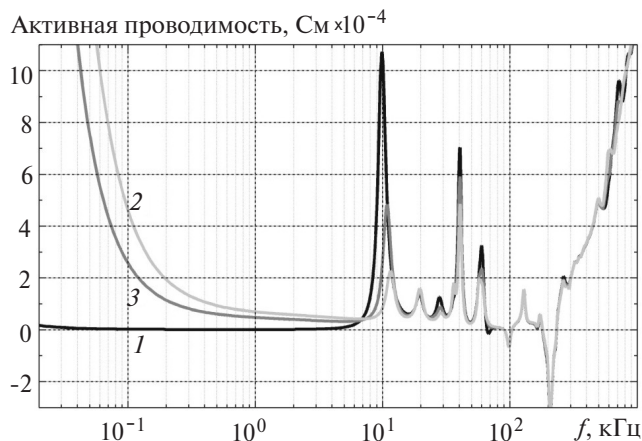


Рис. 2. Активная проводимость первичной обмотки при разомкнутой и замкнутой частях расщепленной обмотки НН: 1 – обмотки НН1 и НН2 разомкнуты; 2 – обмотка НН1 замкнута; 3 – обмотки НН1 и НН2 замкнуты

Определение наличия внутренних замыканий. В [3] были представлены результаты исследований частотных характеристик при наличии внутренних витковых и межкатушечных замыканий, выполненных на физической модели непрерывной катушечной обмотки. Характерные экспериментальные зависимости отклонений первых пяти собственных частот колебаний в случае внутренних межкатушечных замыканий для физической модели обмотки показаны на рис. 3 (аналогичные результаты также были получены при моделировании на расчетных моделях обмоток).

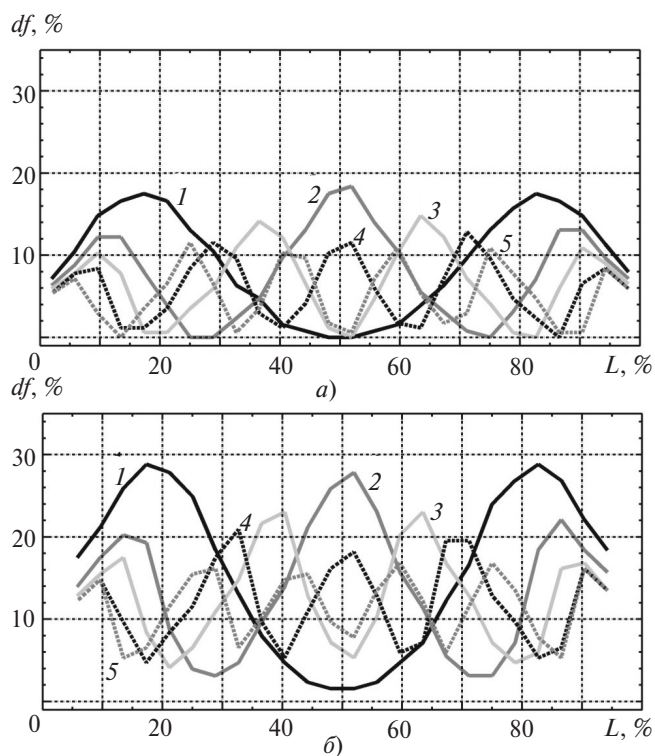


Рис. 3. Отклонения собственных частот обмотки проводимости при замыкании двух (а) и шести (б) катушек [3]: 1– 5 – отклонения по первой, второй, третьей, четвертой и пятой собственной частоте, соответственно

При внутренних замыканиях в катушечных обмотках имеет место определенный «паттерн» отклонений собственных частот обмотки в зависимости от местоположения замыкания, который для практически симметричной относительно середины обмотки также имеет симметричный вид.

Полученные зависимости можно объяснить исходя из пространственных распределений напряжения вдоль обмотки при воздействии напряжения с частотой, равной собственной частоте колебаний обмотки. Если в результате виткового или межкатушечного замыкания в обмотке соединяются точки, имеющие на некоторой собственной частоте примерно равный потенциал, то это не приводит к значимому искажению пространственного распределения напряжения и изменению рассматриваемой собственной частоты. Например, при замыкании в середине обмотки изменение нечетных собственных частот будет незначительным, поскольку на этих частотах в середине обмотки достигается максимум пространственного распределения (рис. 3). Наоборот, замыкание части обмотки вблизи узлов пространственного распределения напряжения для некоторой собственной частоты приводит к существенному ее изменению. Так, замыкание в начале и конце обмотки приводит к увеличению всех собственных частот, а замыкание в середине высоты обмотки – к увеличению второй и четвертой собственной частоты.

Рассматриваемая сущность собственных частот может быть использована для интерпретации результатов FRA-измерений и решения двух упоминаемых ранее практических задач диагностики.

При внутренних коротких замыканиях происходит сокращение электрической длины обмотки, и потому собственные частоты обмотки, как правило, должны либо увеличиться, либо остаться практически без изменений в случае, когда короткое замыкание имеет место вблизи максимума пространственного распределения напряжения для некоторой собственной частоты. Это важное свойство может быть использовано в качестве одного из основных признаков внутреннего замыкания в обмотке.

Другим признаком внутреннего замыкания применительно к обмотке, размещенной на стержне магнитопровода, может являться значительное увеличение в частотной характеристике, соответствующей разомкнутым вторичным обмоткам, частоты первого антирезонанса. Эта частота при отсутствии замыканий обычно составляет сотни Гц – единицы кГц, а в случае внутреннего замыкания в обмотке может увеличиваться в несколько раз в зависимости от его масштаба.

Необходимо отметить, что увеличение частоты первого антирезонанса не является признаком наличия короткого замыкания в измеряемой обмот-

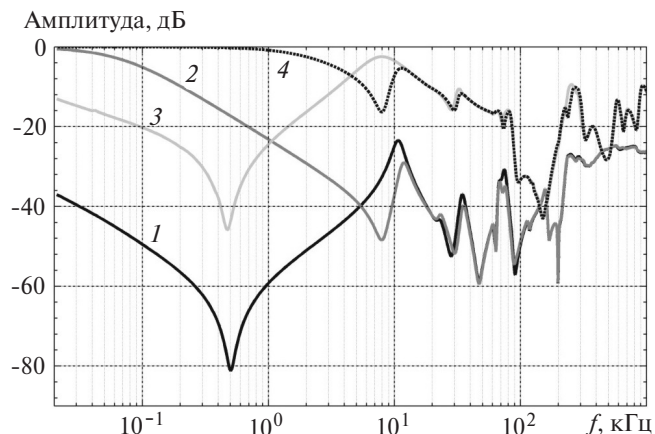


Рис. 4. Частотные характеристики обмоток ВН (1 и 2) и НН1 (3 и 4) трансформатора: 1 и 3 – обмотка НН2 не закорочена; 2 и 4 – обмотка НН2 закорочена

ке, поскольку увеличение этой частоты происходит в частотных характеристиках и других обмоток, расположенных на том же стержне и не затронутых внутренним повреждением (рис. 4).

Таким образом, признаками внутреннего КЗ могут являться:

1) увеличение частоты первого антирезонанса в несколько раз (необходимое, но не достаточное условие);

2) увеличение первых собственных частот колебаний обмотки (достаточное условие).

Локализация внутренних замыканий. Для выявления возможности локализации внутренних коротких замыканий в обмотках были проведены расчетные исследования с применением высокочастотных моделей обмоток в программе EMTLAB [3, 10], а также экспериментальные исследования на физических моделях (рис. 5):

модель № 1 имеет непрерывную катушечную обмотку без магнитной системы; обмотка состоит из 52 катушек, общее число витков 516, ее размеры примерно соответствуют обмотке высшего напряжения трансформаторов классов напряжения 110 кВ и выше (рис. 5,а);

модель № 2 имеет магнитопровод с двумя обмоточными стержнями, на каждом из которых размещены идентичные обмотки, содержащие 54 катушки по 7 витков в каждой; средний диаметр обмоток около 430 мм, высота около 900 мм (рис. 5,б).

Основные результаты экспериментальных исследований на модели №1 приведены в [3]. Далее приведены новые результаты обработки экспериментальных данных этой модели.

Отклонения значений первых трех и более собственных частот, приведенные на рис. 3, могут быть представлены в виде «паттерна» на лепестковой диаграмме.

Использование большего числа собственных частот может повысить точность определения ме-

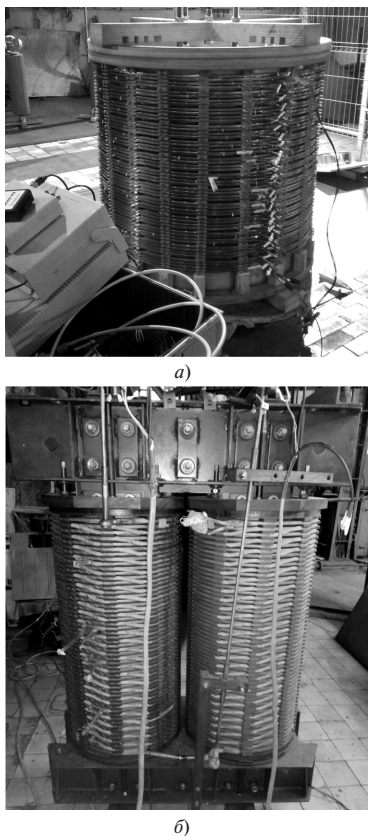


Рис. 5. Внешний вид моделей: а — № 1; б — № 2

стоположения внутреннего КЗ. Вместе с тем, далее для простоты дано описание подхода, использующего первые три собственные частоты.

Для построения «паттерна» на лепестковой диаграмме следует перейти к относительным отклонениям df_1'' , df_2' и df_3' (полученные значения отклонений собственных частот df_1 , df_2 и df_3 относятся к базисным значениям).

В качестве базисного значения для i -ой собственной частоты, в общем случае, следует выбрать максимальное значение отклонения $df_{i \max}$ для этой частоты в пределах всей длины обмотки (см. рис. 3), но это значение заранее неизвестно. Альтернативно, за базисное значение df_{base} при построении лепестковой диаграммы может быть принято максимальное из текущих значений отклонений собственных частот: $df_{base} = \max(df_1, df_2, df_3)$.

На рис. 6 представлены характерные «паттерны», показанные в виде треугольников отклонений собственных частот, для случаев КЗ двух катушек, расположенных на относительном расстоянии L , равном 21,2; 36,5 и 48,1% от начала обмотки (L — удельное электрическое расстояние от начала обмотки до средней точки участка обмотки, затронутого коротким замыканием).

На рис. 7 показано альтернативное представление «паттернов» в виде точек, соответствующих центрам масс треугольников отклонений собственных частот.

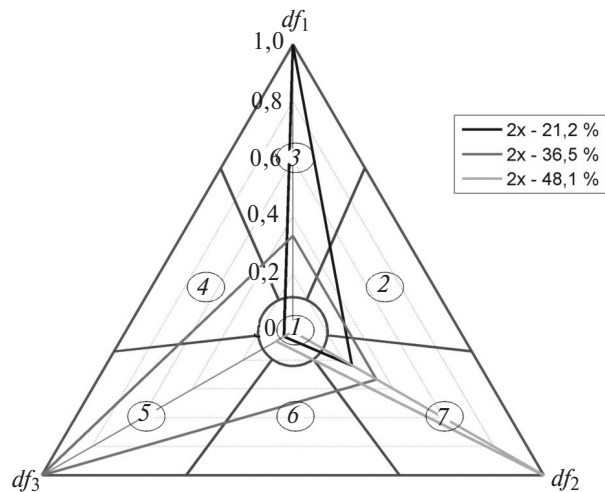


Рис. 6. Треугольники отклонений собственных частот

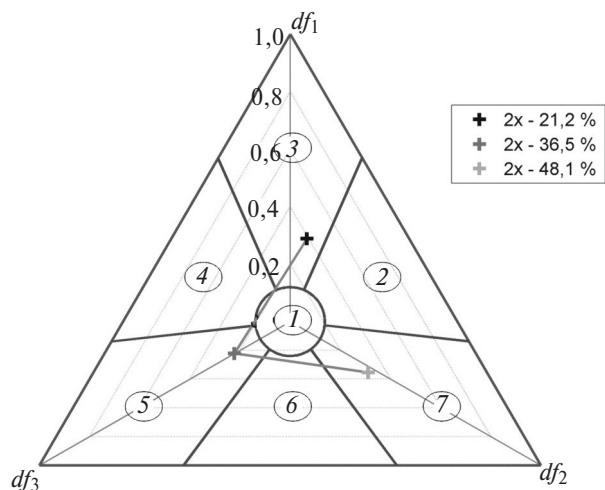


Рис. 7. Центры масс треугольников отклонений собственных частот

Положение центра масс треугольника отклонений собственных частот в декартовых координатах может быть вычислено как

$$x_0 = \frac{df_2' - df_3'}{2\sqrt{3}}; \quad y_0 = \frac{2df_1' - df_2' - df_3'}{6}.$$

С использованием представления центров масс треугольников результаты измерений, приведенные на рис. 3, примут вид, показанный на рис. 8. По мере приближения места КЗ от начала обмотки к ее середине происходит поворот центров масс треугольников отклонений собственных частот по спиралевидной траектории против часовой стрелки относительно нуля координат, в результате центры масс последовательно проходят от области 1 к области 7. При дальнейшем смещении места КЗ от середины обмотки к ее концу происходит обратный поворот из области 7 к области 1.

С учетом последнего обстоятельства координаты центра масс треугольников удобно представить в полярных координатах: $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$; $\varphi_0 = \arctan(y_0 / x_0)$.

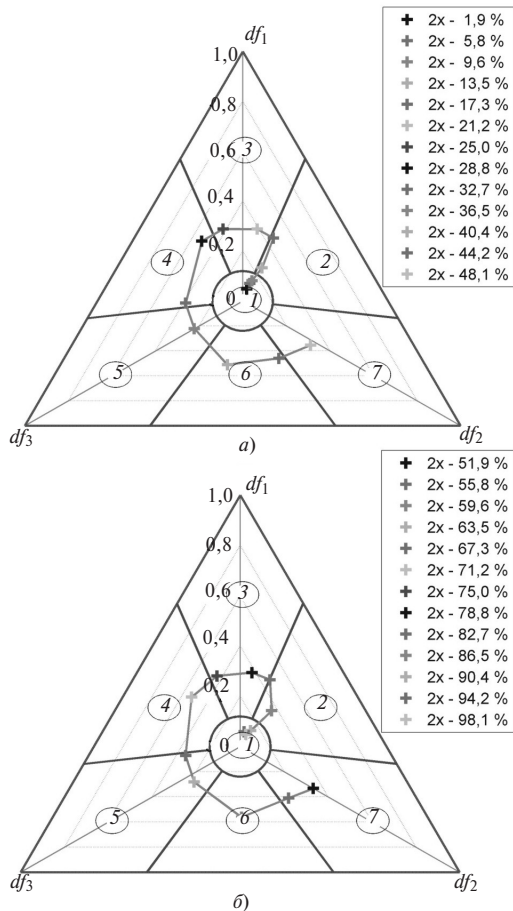


Рис. 8. Центры масс треугольников изменения собственных частот при КЗ двух катушек: а – в диапазоне L от 0 до 50% ; б – в диапазоне L от 50 до 100%

Для рассматриваемого примера полученные зависимости r_0 и φ_0 показаны на рис. 9.

Полученная зависимость φ_0 (в градусах) от расстояния L в диапазоне значений от 20 до 80% может быть аппроксимирована выражением вида:

$$\varphi_0 = 130 \sin\left(\frac{3\pi}{100} L - \pi\right) + 190. \quad (2)$$

На основании (2) может быть решена задача приближенного нахождения местоположения внутреннего КЗ в обмотке:

$$L = \arcsin\left(\frac{\varphi_0 - 190}{130}\right) \frac{100}{3\pi}. \quad (3)$$

При использовании выражения (3) необходимо нормирование значений φ_0 в диапазоне от 60 до 320°: если $\varphi_0 < 60^\circ$, то $\varphi_0 = 60^\circ$; если $\varphi_0 > 320^\circ$, то $\varphi_0 = 320^\circ$.

Альтернативно зависимость φ_0 от расстояния L в диапазоне значений от 20 до 80% может быть аппроксимирована выражением вида:

$$\varphi_0 = -8,1|L - 50| + 330, \quad (4)$$

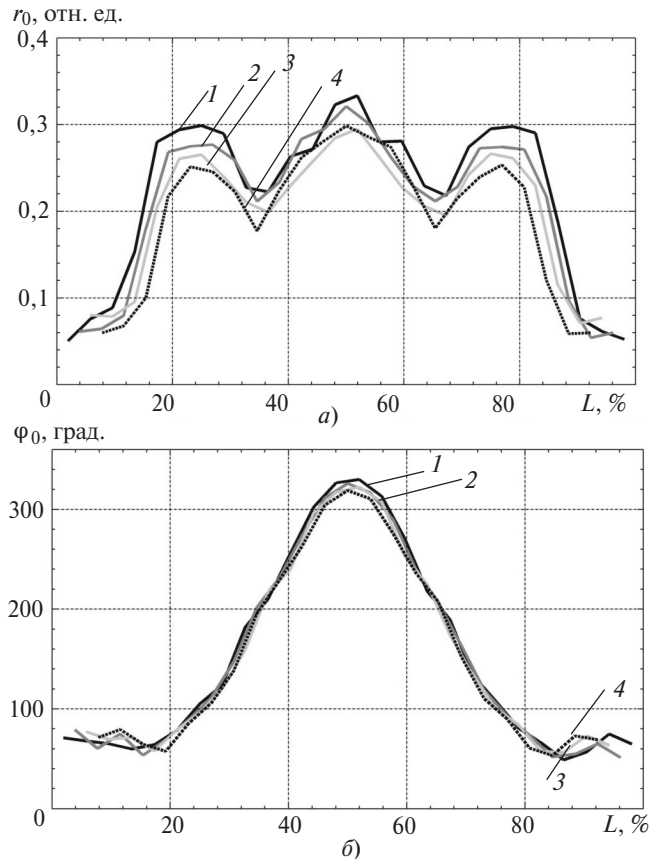


Рис. 9. Зависимости r_0 (а) и φ_0 (б) при КЗ: 1 – двух катушек; 2 – четырех; 3 – шести; 4 – восьми

а выражение для определения L примет вид:

$$L = 50 \pm (\varphi_0 - 330) / 8,1. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) более простые для вычисления, но менее точно описывают исходную зависимость φ_0 от расстояния L.

Необходимо отметить, что симметричность отклонений собственных частот относительно середины усложняет задачу по определению места КЗ. Выражение (3) возвращает значение координаты L, лежащее в диапазоне 20÷50%. Для определения, в какой из двух половин обмотки имеет место КЗ требуется применение дополнительных критериев, которые будут рассмотрены далее.

В диапазонах L от 0 до 20% и от 80 до 100% местоположение КЗ может быть приближенно определено по значениям r_0 и φ_0 следующим образом:

при $r_0 \leq 0,12$ удельное расстояние $L = (0 \div 13)\%$ или $(87 \div 100)\%$; для однозначности может быть принято среднее значение диапазона $L = 6,5\%$ или $93,5\%$;

при $r_0 > 0,12$ и $\varphi_0 < \varphi_0(L=20\%)$ удельное расстояние $L = (13 \div 20)\%$ или $(80 \div 87)\%$; для однозначности может быть принято значение $L = 13,5\%$ или $86,5\%$.

Расхождение оценки местоположения КЗ от фактического для модели №1, определенной с ис-

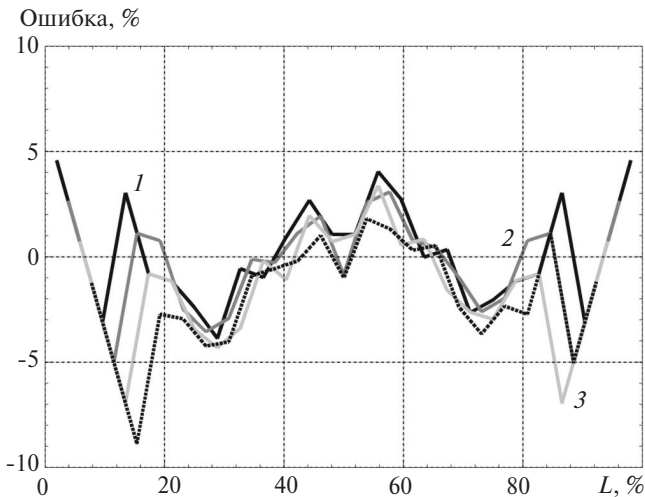


Рис. 10. Расхождение оценки местоположения КЗ катушек по выражению (3): 1–4 – КЗ двух, четырех, шести и восьми катушек, соответственно

пользованием приведенного ранее подхода и аппроксимации (3), приведено на рис. 10.

В диапазоне $L=20\div 80\%$ расхождение оценки местоположения КЗ по выражениям (3) и (5) не превышает 5%. В диапазонах $0\div 20\%$ и $80\div 100\%$ расхождение оценки местоположения КЗ двух и четырех катушек не превышает 5%, наибольшее отклонение при КЗ восьми катушек не более 10%, что связано с дискретностью оценки местоположения (6,5 и 13,5%).

В таблице приведены собственные частоты и их отклонения для двух случаев короткого замыкания. Абсолютная погрешность определения местоположения виткового замыкания в первом случае не превысила 3%. Во втором случае расхождение

оценки местоположения КЗ при использовании вышеприведенного подхода и выражения (3) для этой модели не превысило 5%, а по выражению (5) – 7,5% (последнее в таблице не приведено).

На лепестковой диаграмме могут быть условно нанесены границы семи областей значений L : $0\div 13\%$ ($87\div 100\%$); $13\div 20\%$ ($80\div 87\%$); $20\div 27\%$ ($73\div 80\%$); $27\div 33\%$ ($67\div 73\%$); $33\div 37\%$ ($63\div 67\%$); $37\div 45\%$ ($55\div 63\%$) и $45\div 50\%$ ($50\div 55\%$). В таком случае задача приближенной оценки местоположения внутреннего КЗ может быть выполнена графически построением треугольника изменений собственных частот и определением области, в которой расположен его центр масс.

Оценка, в какой из двух половин обмотки имеет место КЗ, может быть выполнена на основе анализа амплитуды первой собственной частоты частотных характеристик, измеренных по прямой и обратной схемам измерений FRA (при подаче сигнала от генератора к началу и концу измеряемой обмотки соответственно).

В [3] было показано, что в случае, когда КЗ ближе к месту подачи напряжения, максимум пространственного распределения напряжения для первой собственной частоты имеет большее значение. Это может быть объяснено следующим образом. При питании вывода начала обмотки и заземлении вывода ее конца напряжение на первой собственной частоте в половине обмотки, прилегающей к ее началу, возрастает до своего максимального значения, а во второй половине, прилегающей к ее концу, – снижается до нуля, что можно объяснить протеканием емкостного тока в первой половине обмотки и индуктивного тока во второй

Вариант	Собственная частота, кГц			Отклонение, %			Расстояние L , %		Ошибка оценки по (3), %
	f_1	f_2	f_3	df_1	df_2	df_3	Оценка по (3)	Фактическое	
Модель № 1, короткое замыкание двух витков в катушках № 13, 26 и 39									
Без замыканий	87	154	211	–	–	–	–	–	–
КЗ витков № 1–2 в катушке № 13	95	155	214	8,8	0,8	1,7	25,8	23,4	2,4
То же № 9–10 в катушке № 26	87	173	211	0,0	12,2	0,0	50,0	49,9	0,1
То же № 1–2 в катушке № 39	94	154	217	8,0	0,0	2,9	73,9	73,4	0,6
Модель № 2, короткое замыкание нескольких катушек									
Без замыканий	160	370	583	–	–	–	–	–	–
№ 1–8	223	472	752	39,4	27,4	28,8	6,5	7,4	-0,9
№ 9–22	274	377	615	71,5	1,7	5,3	24,3	27,8	-3,4
№ 23–24	165	448	718	3,1	20,9	23,0	39,8	42,6	-2,8
№ 25–30	160	554	587	0,0	49,6	0,6	50,0	50,0	0,0
№ 31–42	209	423	756	30,8	14,2	29,6	70,3	66,7	3,7
№ 43–54	253	532	810	58,2	43,7	38,8	93,5	88,9	4,6

(конец обмотки заземлен непосредственно или через малое сопротивление). Образование короткозамкнутого контура в обмотке приводит к появлению тока КЗ, который стремится скомпенсировать падение напряжения на закороченном участке обмотки. В катушках, расположенных рядом с короткозамкнутой частью обмотки, в результате индуктивной связи наводится индуктивный ток в направлении, противоположном основному току. Таким образом, наведенный ток снижает рост напряжения во второй половине обмотки при движении от конца обмотки к ее середине, в результате чего происходит снижение максимума напряжения по сравнению со случаем КЗ в начале обмотки.

Большие значения напряжения вдоль рассматриваемой обмотки относительно земли и других обмоток при КЗ в начале обмотки вызывают большой емкостный ток (в сторону земли и других обмоток) этой обмотки. Этот емкостный ток, возвращаясь к источнику через импеданс измерительного прибора, приводит к увеличению значений измеряемой частотной характеристики, в том числе на первой собственной частоте.

Различие частотных характеристик из-за возврата емкостного тока подробно рассмотрено в [11]. В отличие от внешней обмотки ВН, где большая часть емкостного тока возвращается к источнику через измерительный импеданс, для внутренних обмоток НН может потребоваться использование специальной схемы измерения с разземлением источника питания [11, 12].

На рис. 11 представлены частотные характеристики для модели № 2, измеренные по прямой и обратной схемам FRA, а также по схемам измерения диагональных проводимостей выводов начала и конца обмотки (Y_{AA} и Y_{XX}) для случаев, когда коротким замыканием охвачены первые 8 и последние 12 катушек.

Из рис. 11 видно, что частотные характеристики для прямой и обратной схем FRA совпадают между собой в широком диапазоне частот, что не дает возможности по ним идентифицировать, в какой из двух половин обмотки имеет место КЗ. Однако имеются отличия в частотных характеристиках Y_{AA} и Y_{XX} .

Так, при КЗ в начале обмотки в катушках № 1÷8 первая собственная частота составляет около 223 кГц. Она явно проявляется в частотных характеристиках FRA и Y_{AA} . Частотная характеристика Y_{XX} помимо собственных частот измеряемой обмотки содержит дополнительные резонансные пики, что связано с тем, что при измерениях обмотки левого стержня (см. рис. 5,б) к выводу конца обмотки X был также подключен вывод конца обмотки правого стержня. Полученная частотная характеристика Y_{XX} представляет собой результат сло-

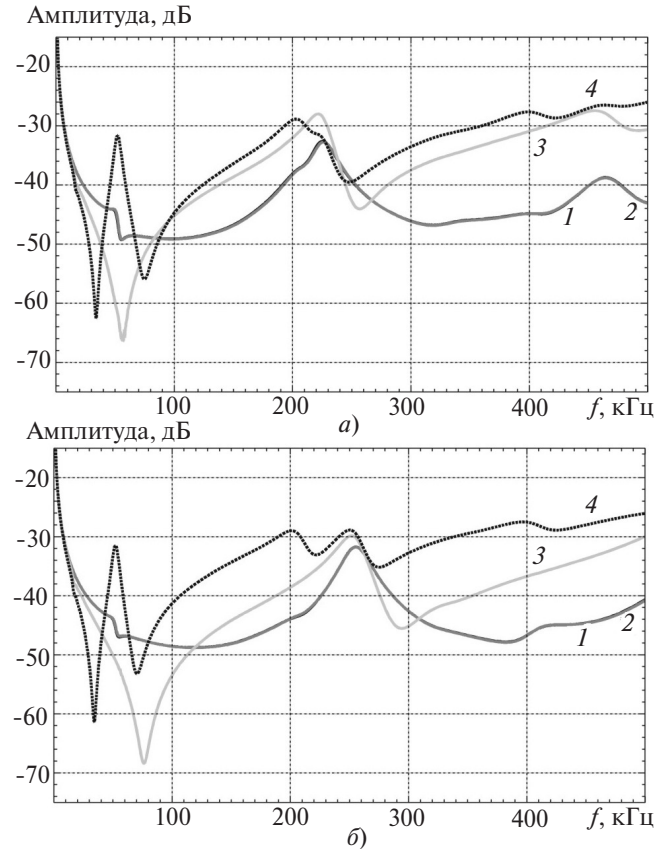


Рис. 11. Частотные характеристики обмотки модели № 2: а — при КЗ катушек № 1–8; б — № 43–54: 1 — FRA, прямая схема; 2 — FRA, обратная схема; 3 — Y_{AA} ; 4 — Y_{XX}

жения частотных характеристик двух включенных параллельно обмоток, одна из которых не имеет внутренних замыканий (ее собственные частоты практически идентичны частотам левой обмотки без замыканий), а вторая — имеет внутреннее замыкание и, как результат, смещенные собственные частоты.

На практике это типичная ситуация, поскольку измеряемая обмотка может быть соединена в треугольник или звезду, а повреждением может быть затронута только одна из фаз. Как видно из рис. 11, значение частотной характеристики Y_{XX} на частоте 225 кГц меньше, чем у частотной характеристики Y_{AA} .

При КЗ в конце обмотки в катушках с номерами №№ 43–54 картина в целом схожая, за исключением того, что на первой собственной частоте, составляющей около 253 кГц, значение частотной характеристики Y_{AA} превышает значение частотной характеристики Y_{XX} .

Таким образом, половина обмотки с КЗ может быть идентифицирована путем сравнения частотных характеристик, полученных по схемам измерения диагональных элементов матрицы проводимости и сравнения их значений на первой собственной частоте.

Обсуждение результатов. *Применимость подхода на основе анализа собственных частот колебаний.* Предлагаемый подход к интерпретации результатов FRA на основе анализа «паттернов» отклонений собственных частот колебаний дает дополнительные возможности для анализа результатов по сравнению с использованием корреляционного анализа и интегральных индексов.

Рассматриваемый в статье подход не претендует на применимость для всех возможных типов обмоток и видов коротких замыканий. Он представляет собой результат обобщения расчетов на расчетных высокочастотных моделях и экспериментальных измерений на физических моделях обмоток. Степень его применимости для широкого спектра возможных на практике обмоток и сочетаний внутренних повреждений требует дополнительных исследований и проработки.

Относительно применимости анализа собственных частот для интерпретации других видов повреждений обмоток можно отметить следующее.

1. Потеря радиальной устойчивости — радиальное сжатие, как правило, приводит к сокращению изоляционного промежутка между обмоткой НН и стержнем (обмоткой СН и обмоткой НН в случае трехобмоточного трансформатора); это приводит к снижению первых собственных частот колебаний рассматриваемой обмотки, таким образом, может быть выявлено по отклонению собственных частот.

2. Потеря осевой устойчивости — изменения собственных частот обмотки незначительны, имеются изменения амплитуд частотной характеристики; может быть выявлена по отсутствию значимого изменения собственных частот и изменению значений амплитуд частотной характеристики на частотах, соответствующих собственным частотам колебаний обмотки.

3. Потеря прессовки обмотки в общем случае может не сопровождаться значимым изменением осевых размеров и продольной емкости обмотки. Поскольку электрическая длина обмотки и основные ее физические и геометрические параметры остаются без изменений, изменения собственных частот практически отсутствуют. В обмотках широко применяется предварительно обработанный малоусадочный картон, усадка которого при номинальном давлении прессовки составляет всего несколько процентов. Потеря прессовки порядка нескольких десятков процентов, что характерно в эксплуатации, может быть не выявлена с помощью анализа частотных характеристик и собственных частот колебаний обмоток. Вместе с тем сильное изменение собственных частот возможно в случае повреждения прессующего кольца и осевого смещения обмотки под действием больших осевых сил при коротком замыкании.

Чувствительность метода. Внутренние короткие замыкания, в том числе витковые вызывают значительные отклонения собственных частот. Так, для модели № 1 витковые замыкания в катушках № 13 и 26 приводят к похожему на межкатушечное замыкание изменению собственных частот. При этом, несмотря на небольшое число затронутых замыканием витков N (0,4%), отклонения собственных частот составляют около 9–12% (рис. 12). С ростом числа витков N , затронутых КЗ, отклонения собственных частот увеличиваются практически линейно. При КЗ четырех катушек, содержащих в сумме 80 витков, что составляет около 15% общего числа, отклонения собственных частот достигают 30–35%.

Таким образом, подход с определением местоположения КЗ по отклонению первых собственных частот оказывается достаточно чувствительным как к межкатушечным замыканиям, так и к витковым замыканиям.

Точность определения местоположения КЗ. Из рис. 3 видно, что чем больше номер собственной частоты, тем больше степень вариации ее отклонения в диапазонах изменения относительной длины обмотки L : 0÷20% и 80÷100%. Из этого следует возможность повышения точности оценки местоположения КЗ в начальной и конечной частях обмотки за счет повышения числа рассматриваемых собственных частот свыше трех.

Так, для рассматриваемой модели № 1 было получено, что при использовании первых четырех собственных частот возможно расширить диапазон применения аппроксимации φ_0 вида (2) до 15÷85%, а в начальной (конечной) части сделать разделение на диапазоны 0÷12% и 12÷15% (85÷88% и 88÷100% соответственно). В этом случае наибольшее расхождение оценки местоположения короткого замыкания двух — восьми катушек не превысило 7%.

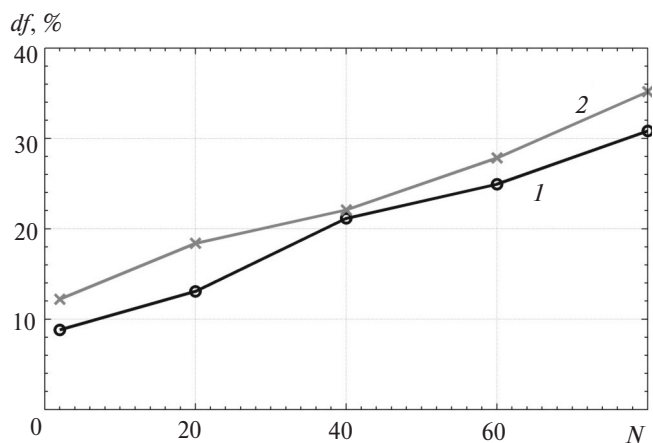


Рис. 12. Отклонения собственных частот в зависимости от числа витков N в закороченной части обмотки: 1 — катушка № 13; 2 — катушка № 26

Однако на практике собственные частоты выше третьей не всегда бывают явно выражены в частотных характеристиках обмоток трансформаторов и возможны сложности с их идентификацией. Таким образом, использование первых трех собственных частот оказывается предпочтительным по соотношению сложности вычисления и точности оценки местоположения КЗ.

Корректировка отклонений собственных частот. Для исследованных физических моделей катушечных обмоток было получено, что наибольшие значения отклонений первых собственных частот отличаются между собой, как правило, не более чем в 1,3÷1,5 раза. Например, на рис. 3,а максимальные значения отклонений первых трех собственных частот составляют около 17, 18 и 15%, отношение наибольшего значения к наименьшему составляет около 1,2, и этим отличием можно пренебречь.

В общем случае максимальные отклонения отдельных собственных частот могут отличаться значительно и целесообразно в общий алгоритм ввести их корректировку: $df'_2 = df_2 k_2$; $df'_3 = df_3 k_3$; $df_{base} = \max(df_1, df_2 k_2, df_3 k_3)$, где k_2 и k_3 – поправочные коэффициенты.

Так, для нескольких исследованных расчетных высокочастотных моделей обмоток наибольшие отклонения по всей длине обмотки для второй и в большей степени для третьей частоты оказались в несколько раз меньше наибольшего отклонения первой собственной частоты. В этом случае для широкого диапазона значений относительного местоположения замыкания L превалирует отклонение первой частоты df_1 и получаемая без корректировки отклонений собственных частот фигура в лепестковой диаграмме смещена преимущественно к первой ее вершине.

Вопрос определения поправочных коэффициентов нетривиальный и требует отдельной проработки. В качестве первого приближения поправочные коэффициенты могут быть определены как $k_i = |G_{12,1} / G_{12,i}|^{1/i}$, где $G_{12,1}$ и $G_{12,i}$ – значение активной проводимости на первой и i -й собственной частоте. Применимость такой корректировки базируется на результатах исследований частотных характеристик расчетных и физических моделей катушечных обмоток. Как правило, отклонение i -й собственной частоты df_i тем больше, чем больше максимум пространственного напряжения $U_{i \max}$ для этой частоты (например, см. [3]). Кроме того, чем больше значение $U_{i \max}$ в обмотке, тем больше токи и потери в ней, а значит, больше значение активной проводимости $G_{12,i}$ на i -й собственной частоте. Для первых собственных частот с номерами i и j отношение пространственных максимумов на-

пряжения $U_{i \max} / U_{j \max}$ может быть приближенно оценено как отношение $G_{12,i} / G_{12,j}$ при незамкнутой вторичной обмотке.

Схемы измерения частотных характеристик. Используемый подход к определению собственных частот базируется на сравнении частотных характеристик определенной обмотки при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке.

Измерения частотных характеристик при разомкнутой и замкнутой накоротко обмотках низшего (среднего) напряжения широко применяются для обмоток высшего (среднего) напряжения. При этом распространена практика, когда для замыкания обмотки низшего (среднего) напряжения, соединенной в звезду с выведенной нейтралью, соединяются вместе выводы фаз A , B и C (U , V и W) без соединения с выводом нейтрали N . Эта практика нашла отражение в руководстве IEEE по применению и интерпретации результатов анализа частотных характеристик обмоток масляных трансформаторов [13].

Такая практика вполне справедлива для обмоток, соединенных в треугольник, для которых соединение между собой выводов трех фаз действительно приводит к закорачиванию каждой из фаз данной обмотки. Однако применительно к обмоткам, соединенным в звезду, данная практика является не совсем корректной, поскольку вместо соединения выводов начала и конца каждой из фаз обмотки, по сути, выполняется объединение одноименных выводов нескольких фаз. На высоких частотах обмотки имеют, как правило, емкостное входное сопротивление, а потому такое соединение представляет собой емкостную нагрузку измеряемой фазы обмотки НН на две другие фазы этой обмотки, не задействованные в измерениях, а потому имеет мало общего с коротким замыканием каждой из фаз вторичной обмотки.

Таким образом, для идентификации собственных частот обмоток при наличии вторичных обмоток, соединенных в звезду с выведенной нейтралью, «закоротка» должна быть выполнена соединением вместе четырех выводов A , B , C и N (U , V , W и N) либо путем пофазного замыкания линейных выводов и вывода нейтрали N (последнее является более предпочтительным).

Для идентификации собственных частот колебаний внутренних обмоток целесообразно также выполнять измерения частотных характеристик при замкнутой накоротко внешней обмотке (обмотке высшего напряжения), что пока не является широко распространенной практикой.

Необходимо отметить, что для соединенных в звезду вторичных обмоток, не имеющих вывода нейтрали, описываемый подход не применим в явном виде, однако с учетом того, что на практике в

силовых трансформаторах наиболее распространены соединения обмоток в треугольник и звезду с выведенной нейтралью, данный подход можно использовать для значительной части наиболее распространенных случаев.

Выводы. Наличие внутреннего короткого замыкания в одной из обмоток стержня магнитопровода может быть выявлено по значительному отклонению частоты первого антирезонанса. Критерием внутреннего короткого замыкания в обмотке может служить увеличение первых собственных частот колебаний обмотки.

Как межкатушечные замыкания, так и витковые замыкания вызывают значительные отклонения собственных частот колебаний обмотки, которые могут достигать десятков процентов, благодаря чему эти замыкания могут быть выявлены с помощью анализа частотных характеристик.

При внутреннем коротком замыкании в зависимости от его местоположения в обмотке имеет место определенный «паттерн» отклонений собственных частот колебаний обмотки, симметричный относительно середины этой обмотки. Наличие «паттернов» позволяет реализовать локализацию внутренних замыканий в обмотках на основе анализа частотных характеристик, однако симметрия «паттернов» требует использования дополнительных схем измерения частотных характеристик.

Приближенное определение местоположения КЗ в непрерывной катушечной обмотке может быть выполнено графическим способом с помощью построения треугольника отклонений первых трех собственных частот колебаний обмотки и нахождения области, в которой лежит центр масс этого треугольника.

Приближенное определение местоположения КЗ в непрерывной катушечной обмотке также может быть выполнено с помощью подхода, основанного на аппроксимации зависимости координат центра масс треугольника изменений собственных частот от местоположения КЗ.

Определение, в какой из двух половин обмотки имеет место КЗ, может быть выполнено с помощью измерения диагональных элементов матрицы проводимости рассматриваемой обмотки.

Для определения собственных частот колебаний и интерпретации частотных характеристик обмоток ВН короткое замыкание обмотки НН, соединенной в звезду с выведенной нейтралью, необходимо выполнять при соединении вместе трех линейных выводов и вывода нейтрали или пофазного соединения линейного вывода измеряемой фазы с выводом нейтрали.

Для определения собственных частот колебаний обмотки НН стандартные схемы измерений желательно дополнить схемой, в которой при измере-

нии частотной характеристики внутренней обмотки НН выполняется короткое замыкание внешней обмотки ВН.

Автор выражает благодарность А.Ю. Волкову, принимавшему участие в измерениях на моделях обмоток, а также Д.А. Матвееву за ценные замечания при обсуждении результатов, представленных в статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Samimi M. H., Tenbohlen S.** FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art. — Intern. Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, vol. 89, pp. 115–125.
2. **The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China.** DL/T 911–2004 Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers, 2005.
3. **Volkov A.Yu., Drobyshevski A.A., Larin V.S., Matveev D.A., Drobyshevski S.A.** Interpretation of Results of Diagnostics of Power Transformers by Using the Frequency Response Analysis. — 46th CIGRE Session, Paris (France), 21–26 August 2016, report A2–115.
4. **Wilk A., Adamczyk D.** Investigations on Sensitivity of FRA Method in Diagnosis of Interturn Faults in Transformer Winding. — IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 27–30 June 2011.
5. **Afkar H., Vahedi A.** Identifying and Locating Connection Fault of Layer Winding Turn in Distribution Transformer. — J. World. Elect. Eng. Tech. 3(2), 2014, 74–82 pp.
6. **Yousof M.F.M., Ekanayake C. and Saha T.K.** Locating Inter-disc Faults in Transformer Winding Using Frequency Response Analysis. — Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2013). Hobart, TAS (Australia), 29 September — 3 October 2013.
7. **Patel K., Das N., Abu-siada A. and Islam S.** Power Transformer Winding Fault Analysis using Transfer Function. — Australasian Universities Power Engineering Conference, (AUPEC 2013) Hobart, T AS (Australia), 29 September — 3 October 2013.
8. **Aljohani O., Abu-Siada A.** Application of FRA Polar Plot Technique to Diagnose Internal Faults in Power Transformers. — IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition, 27–31 July 2014.
9. **Khanali M., Soloot A.H., Hoidalén H.K., Jayaram S.H.** Study on locating transformer internal faults using sweep frequency response analysis. — Electric Power Systems Research, 2017, vol. 145, 55–62 pp.
10. **Larin V., Matveev D., Volkov A.** Study of transient interaction in a system with transformer supplied from network through a cable: assessment of interaction frequencies and resonance involvement. — Proc. of the 3rd International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Split (Croatia). October 15–17, 2014.
11. **Larin V.S., Matveev D.A.** Analysis of transformer frequency response deviations using white-box modelling. — CIGRE Study Committee A2 COLLOQUIUM, Cracow (Poland). October 1–6, 2017.
12. **Holdyk A., Gustavsen B., Arana I. and Holboell J.** Wideband Modeling of Power Transformers Using Commercial sFRA Equipment. — IEEE Transactions On Power Delivery, June 2014, vol. 29, No. 3, pp. 1446–1553.
13. **IEEE C57.149-2012.** IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers.

А в т о р: **Ларин Василий Серафимович** окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов».

Начальник отдела трансформаторов ВЭИ. Регулярный член Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в комитете А2 СИГРЭ.

Elektrichestvo, 2018, No. 4, pp. 14–25

DOI:10.24160/0013-5380-2018-4-14-25

Frequency response analysis for localization of short circuits in transformer windings

LARIN Vasilii S. (*All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia*) – *Head of the Department. Regular member of the CIGRE Study Committee A2 «Transformers», Cand. Sci.*

The article presents an approach to detecting and locating internal short-circuit faults through analyzing the frequency responses of transformer windings. The proposed approach is based on estimating changes in the winding natural frequencies and presenting them in the form of graphic images (patterns). The results from investigations of the physical and mathematical models of windings are given, which show the characteristic patterns of changes in the natural frequencies depending on the location of disk-to-disk and turn-to-turn short-circuit faults along the winding height. Approaches to locating an inner fault in a winding using a graphic method and using the obtained empirical expressions are presented.

Key words: *transformers, windings, short-circuit faults, frequency responses*

REFERENCES

1. **Samimi M. H., Tenbohlen S.** FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art. — Intern. Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, vol. 89, pp. 115–125.
2. **The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China.** DL/T 911–2004 Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers, 2005.
3. **Volkov A.Yu., Drobyshevski A.A., Larin V.S., Matveev D.A., Drobyshevski S.A.** Interpretation of Results of Diagnostics of Power Transformers by Using the Frequency Response Analysis. — 46th CIGRE Session, Paris (France), 21–26 August 2016, report A2–115.
4. **Wilk A., Adamczyk D.** Investigations on Sensitivity of FRA Method in Diagnosis of Interturn Faults in Transformer Winding. — IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 27–30 June 2011.
5. **Afkar H., Vahedi A.** Identifying and Locating Connection Fault of Layer Winding Turn in Distribution Transformer. — J. World. Elect. Eng. Tech. 3(2), 2014, 74–82 pp.
6. **Yousof M.F.M., Ekanayake C. and Saha T.K.** Locating Inter-disc Faults in Transformer Winding Using Frequency Response Analysis. — Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2013). Hobart, TAS (Australia), 29 September – 3 October 2013.
7. **Patel K., Das N., Abu-siada A. and Islam S.** Power Transformer Winding Fault Analysis using Transfer Function. — Australasian Universities Power Engineering Conference, (AUPEC 2013) Hobart, TAS (Australia), 29 September – 3 October 2013.
8. **Aljohani O., Abu-Siada A.** Application of FRA Polar Plot Technique to Diagnose Internal Faults in Power Transformers. — IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition, 27–31 July 2014.
9. **Khanali M., Soloot A.H., Hoidalén H.K., Jayaram S.H.** Study on locating transformer internal faults using sweep frequency response analysis. — Electric Power Systems Research, 2017, vol. 145, 55–62 pp.
10. **Larin V., Matveev D., Volkov A.** Study of transient interaction in a system with transformer supplied from network through a cable: assessment of interaction frequencies and resonance involvement. — Proc. of the 3rd International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Split (Croatia). October 15–17, 2014.
11. **Larin V.S., Matveev D.A.** Analysis of transformer frequency response deviations using white-box modelling. — CIGRE Study Committee A2 COLLOQUIUM, Cracow (Poland). October 1–6, 2017.
12. **Holdyk A., Gustavsen B., Arana I. and Holboell J.** Wideband Modeling of Power Transformers Using Commercial sFRA Equipment. — IEEE Transactions On Power Delivery, June 2014, vol. 29, No. 3, pp. 1446–1553.
13. **IEEE C57.149-2012.** IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers.

[21.08.2017]