

Интерпретация частотных характеристик силовых трансформаторов с применением матрицы проводимостей обмоток

ЛАРИН В.С., МАТВЕЕВ Д.А., ВОЛКОВ А.Ю.

Метод частотных характеристик широко используется для оценки механического и электрического состояния обмоток силовых трансформаторов, а также шунтирующих реакторов. Требования к методу и оборудованию измерения частотных характеристик были стандартизованы в МЭК 60076-18. Но остается много вопросов, связанных с интерпретацией результатов измерений частотных характеристик. Известно, что электрические и серьезные механические повреждения некоторых обмоток трансформаторов приводят к значительным изменениям частотных характеристик обмоток. В общем случае измеряемая обмотка трансформатора имеет связь с другими обмотками, что оказывает влияние на получаемые частотные характеристики отдельно взятой обмотки и может затруднять анализ состояния обмоток трансформатора. Используя представление трансформатора в виде многополюсника с матрицей проводимостей обмоток, показано, что измеряемые по стандартным схемам частотные характеристики определяются комбинацией проводимостей как измеряемой обмотки, так и связанных с ней других обмоток. На примере трансформатора с соединенной в треугольник обмоткой показано, что взаимное влияние обмоток может приводить на практике к неверной оценке состояния отдельных фаз обмотки. Рассмотрены вопросы применения нестандартных схем измерений, включая схемы для измерения элементов матрицы проводимостей обмоток, для получения дополнительной диагностической информации и интерпретации результатов измерений частотных характеристик.

К л ю ч е в ы е с л о в а: силовые трансформаторы, оценка состояния, частотные характеристики, интерпретация частотных характеристик

На протяжении многих лет метод частотных характеристик (МЧХ)* широко используется для оценки механического и электрического состояния обмоток силовых трансформаторов, а также шунтирующих реакторов.

Требования к методу и оборудованию измерения частотных характеристик были стандартизованы [1]. К настоящему времени накоплен большой опыт интерпретации результатов измерений частотных характеристик [1–3]. Вместе с тем, остается много вопросов, связанных с интерпретацией результатов измерений МЧХ. Разработка объективной методологии интерпретации результатов измерений МЧХ является основной целью рабочей группы А2.53 СИГРЭ.

Для целей интерпретации частотных характеристик на практике получило широкое распространение их сравнение с помощью корреляционного анализа и различных индексов, показывающих различие частотных характеристик в широком диапазоне частот [3, 4]. Качественно иным образом интерпретация результатов измерений частотных характеристик может быть выполнена исходя из ана-

лиза особенностей конструкции объекта измерения и применяемых в нем типов обмоток на основе анализа собственных частот колебаний этих обмоток [5–7], поскольку электрические и серьезные механические повреждения обмоток трансформаторов приводят к значительным изменениям собственных частот колебаний обмоток.

Собственные частоты отдельно стоящей обмотки могут быть легко получены при измерении частотных характеристик, поскольку получаемые резонансные частоты соответствуют собственным частотам колебаний обмотки. Но при размещении обмотки на магнитопроводе рядом с другими обмотками в частотной характеристике отдельно взятой обмотки, полученной путем измерений по сквозным схемам согласно МЭК 60076-18, появляются дополнительные резонансные частоты, связанные с взаимодействием между обмотками:

1) электромагнитная связь между обмотками — приводит к появлению резонансных пиков в области средних частот частотных характеристик;

2) емкостная связь между обмотками — при стандартных измерениях вторичная обмотка находится под плавающим потенциалом, в результате через измерительное сопротивление прибора для

* В зарубежной терминологии — Frequency Response Analysis (FRA).

измерений частотных характеристик также протекает емкостная составляющая тока, вызванная стеканием тока с вторичной обмотки и других незаземленных металлических частей [7];

3) электрическая связь между обмотками – последовательное электрическое соединение двух и более обмоток может привести к изменению результирующих резонансных частот по сравнению с резонансными частотами отдельно взятых обмоток.

Наличие в частотной характеристике отдельной обмотки составляющих от других обмоток затрудняет интерпретацию результатов измерений частотных характеристик и оценку состояния измеряемой обмотки трансформатора.

Вклад электромагнитной и емкостной связи между обмотками может быть выявлен с использованием подхода к идентификации собственных частот обмоток [5, 6], основанного на сравнении измеренной частотной характеристики рассматриваемой обмотки при разомкнутой и замкнутой коротко вторичной обмотке и выявлении совпадающих резонансных частот, а также вычислении активной проводимости обмоток. Как показывает практика, использование этого подхода позволяет идентифицировать собственные частоты винтовых и катушечных обмоток, в том числе обмоток с большой продольной емкостью, в которой резонансные пики, соответствующие собственным частотам колебаний, могут быть неявно выражены в исходной частотной характеристике.

Вклад емкостной связи между обмотками может быть устранен проведением измерений с заземлением вторичных обмоток, которые при измерениях по стандартным схемам обычно находятся под плавающим потенциалом. Например, это может быть сделано при включении в программу схем измерений с закороченными и заземленными вторичными обмотками.

Иная ситуация с вкладом электрической связи между обмотками. Обмотки трансформатора могут быть соединены в треугольник, и в этом случае измерение по стандартным сквозным схемам согласно МЭК 60076-18 как при разомкнутых, так и закороченных вторичных обмотках дает сложную частотную характеристику трех фаз одновременно, даже если она измеряется при подключении к двум линейным зажимам обмотки. Другими характерными примерами являются последовательно соединенные обмотки (автотрансформаторное соединение обмоток) и обмотки, соединенные в звезду без выведенной нейтрали.

В целом наличие электрической связи между обмотками может привести к уменьшению отклонений частотных характеристик в случае, если в

одной из трех фаз в результате повреждения изменились некоторые резонансные частоты.

Характерным примером влияния электрической связи является параллельное включение обмоток разных стержней магнитной системы. В [7] показано, что одной из причин появления в частотной характеристике новых резонансных частот или двойных резонансных пиков является повреждение одной из параллельных частей обмотки или одной из параллельных обмоток, размещенных на разных стержнях магнитопровода.

Частотные характеристики соединенной в треугольник обмотки (практический пример). Для примера далее представлены результаты измерений частотных характеристик распределительного трансформатора мощностью 630 кВА напряжением 10/0,4 кВ, выполненные для схем и групп соединения обмоток У/Ун-0 и Д/Ун-11.

На исследуемом трансформаторе были выполнены измерения частотных характеристик обмотками высшего напряжения (ВН) по стандартной схеме с разомкнутой (HVOC) и с закороченной (HVSC) обмотками низшего напряжения (НН). Измеренные частотные характеристики обмотки ВН приведены на рис. 1, 2.

Из рис. 1 видно, что при соединении обмоток в треугольник результирующая частотная характеристика значительно отличается от частотной характеристики отдельно взятой фазы обмотки ВН: имеют место новые резонансные пики и смещение частотной характеристики по вертикальной оси.

Для имитации повреждения была установлена коротка на выводах первого диска в фазе А обмотки ВН. Полученные частотные характеристики для соединения обмотки ВН в треугольник показаны на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что при наличии коротки в фазе А обмотки ВН, концы которой подключены к выводам А и В, наибольшие изменения отмечаются в схеме В-С, из чего можно сделать ошибочное предположение о наличии КЗ в фазе В обмотки, подключенной к выводам В и С.

Матрица проводимостей обмоток. Полученные результаты можно объяснить с использованием представления трансформатора в виде многополюсника (модели «черного ящика») с соответствующей матрицей полных проводимостей между выводами [8].

Рассмотрим это более подробно на примере упрощенной эквивалентной схемы замещения двухобмоточного трансформатора (рис. 3).

Используя схему рис. 3,а, отношение напряжений U_2/U_1 , получаемое при подаче напряжения источника U_1 на вывод 1 и измерении выходного на-

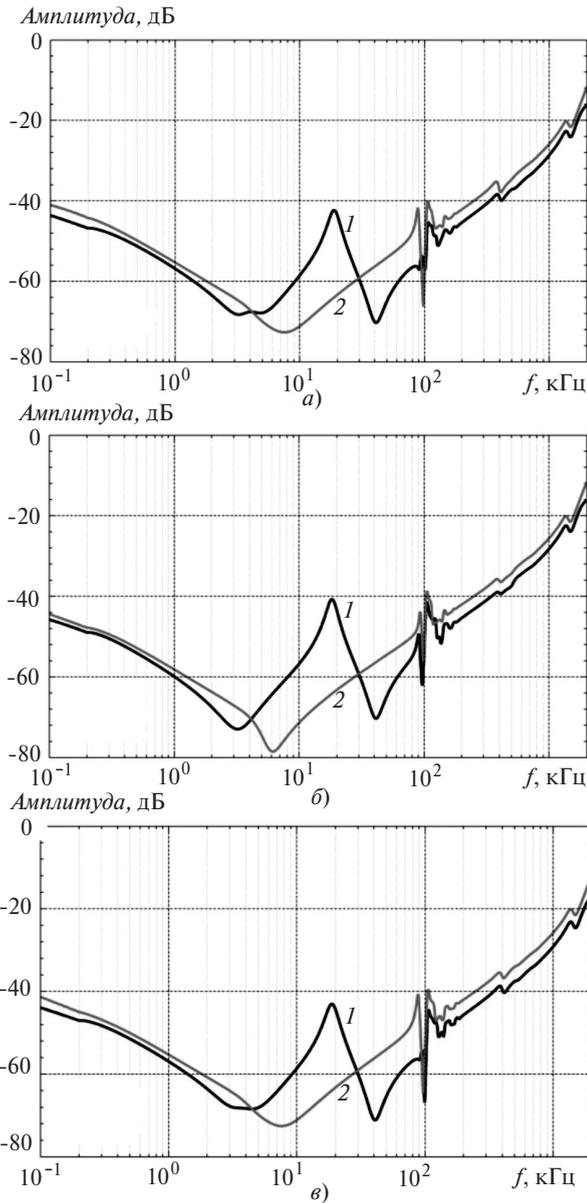


Рис. 1. Частотные характеристики при соединении обмотки ВН в звезду (1) и треугольник (2) при разомкнутой обмотке НН: а – измерения между выводами А-Н (1) и А-В (2); б – между выводами В-Н (1) и В-С (2); в – между выводами С-Н (1) и С-А (2)

пряжения U_2 на выводе 2 на измерительном сопротивлении Z , может быть представлено в виде:

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{Y}_{12}(\dot{Y}_{33}\dot{Y}_{44} - \dot{Y}_{34}^2) + \dot{Y}_{23}(\dot{Y}_{34}\dot{Y}_{14} + \dot{Y}_{13}\dot{Y}_{44}) + \dot{Y}_{24}(\dot{Y}_{33}\dot{Y}_{14} + \dot{Y}_{34}\dot{Y}_{13})}{\dot{Y}_{33}\dot{Y}_{44}\dot{Y}_{22}\dot{Y}_{33}\dot{Y}_{24}^2 - \dot{Y}_{44}\dot{Y}_{23}^2 - 2\dot{Y}_{34}\dot{Y}_{23}\dot{Y}_{24} - \dot{Y}_{22}\dot{Y}_{34}^2} \rightarrow \quad (1)$$

где $\dot{Y}'_{22} = \dot{Y}_{22} + 1/Z$.

Из (1) видно, что при измерениях одной из обмоток по стандартной схеме измерений отношение напряжений U_2/U_1 (частотная характеристика) определяется комбинацией проводимостей, в кото-

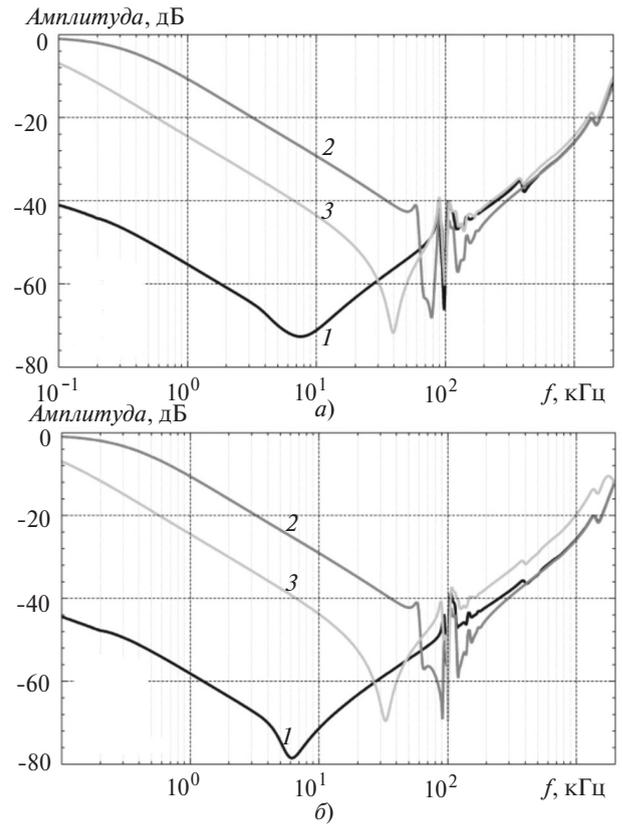


Рис. 2. Частотные характеристики выводов А-В (а) и В-С (б) обмотки ВН при отсутствии и наличии закоротки в фазе А: 1 и 2 – схемы измерений НВОС и НВС без закоротки; 3 – схема измерений НВОС с закороткой в фазе А

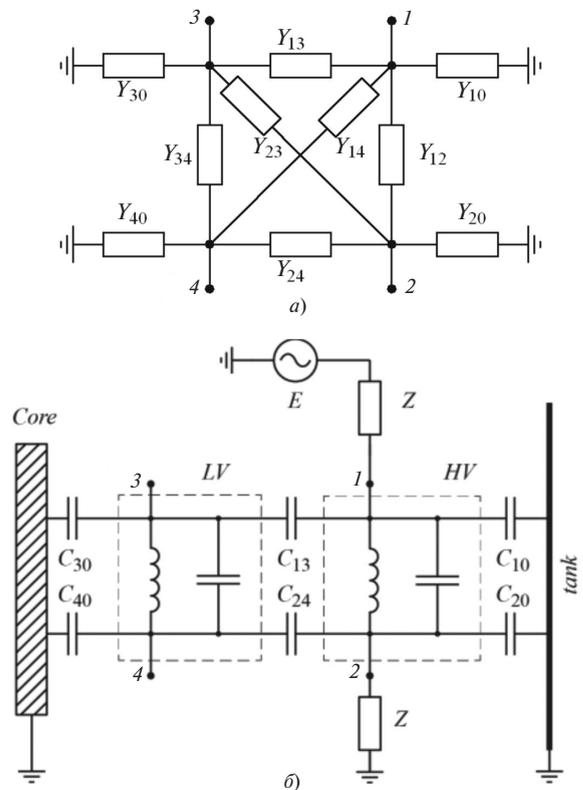


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения двухобмоточного трансформатора: а – составленная с помощью эквивалентных комплексных проводимостей; б – на основе физических представлений об электромагнитных процессах в трансформаторе

рию помимо проводимости измеряемой обмотки Y_{12} входят проводимости вторичной обмотки Y_{33} , Y_{34} , Y_{44} .

При закорачивании вторичной обмотки соответствующая проводимость Y_{34} оказывается зашунтированной, эквивалентная схема немного упрощается (рис. 4,а), а выражение для частотной характеристики первичной обмотки принимает вид:

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{Y}_{12}\dot{Y}'_{33} + \dot{Y}'_{13}\dot{Y}'_{23}}{\dot{Y}'_{22}\dot{Y}'_{33} - \dot{Y}'_{23}{}^2}, \quad (2)$$

где $\dot{Y}'_{13} = \dot{Y}_{13} + \dot{Y}_{14}$; $\dot{Y}'_{22} = \dot{Y}_{22} + 1/Z$; $\dot{Y}'_{23} = \dot{Y}_{23} + \dot{Y}_{24}$; $\dot{Y}'_{33} = \dot{Y}_{30} + \dot{Y}_{40} + \dot{Y}_{13} + \dot{Y}_{14} + \dot{Y}_{23} + \dot{Y}_{24}$.

В случае заземления вторичной обмотки эквивалентная схема (рис. 4,б) и выражение для частотной характеристики еще более упрощается:

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{Y}_{12}}{\dot{Y}'_{22}}, \quad (3)$$

где $\dot{Y}'_{22} = \dot{Y}_{20} + \dot{Y}_{23} + \dot{Y}_{24} + \dot{Y}_{12} + 1/Z$.

Используя измеренные частотные характеристики, проводимость измеряемой обмотки \dot{Y}_{FRA} может быть приближенно найдена как отношение тока обмотки $I_{12} = U_2/Z$ и напряжения $U_{12} = U_2 - U_1$. Из (3) можно показать, что получае-

мая таким образом проводимость \dot{Y}_{FRA} также будет комбинацией нескольких проводимостей:

$$\dot{Y}_{FRA} = \frac{\dot{U}_2}{(\dot{U}_1 - \dot{U}_2)Z} = \frac{\dot{Y}_{12}}{Z(\dot{Y}_{20} + \dot{Y}_{23} + \dot{Y}_{24} + 1/Z)}, \quad (4)$$

которая примерно равна проводимости обмотки Y_{12} только при $[Y_{20} + Y_{23} + Y_{24}] \ll 1/Z$.

Для упрощенной схемы замещения рис. 3,а, в которой проводимости Y_{20} , Y_{23} и Y_{24} определяются емкостями первичной обмотки на землю и на вторичную обмотку, это соотношение может быть записано в виде $2\pi f(C_{20} + C_{23} + C_{24}) \ll 1/Z$. Значения емкости обмоток на землю и между обмотками в масляных силовых трансформаторах обычно составляют порядка единиц нФ. Для оценки граничной частоты примем $C_{20} + C_{23} + C_{24} \leq 10$ нФ. Тогда $2\pi f \cdot 10^{-8} \ll 1/50 = 0,02$ или $f \ll 320$ кГц. Из этого следует, что на частотах до сотен кГц можно ожидать совпадения результата вычисления по выражению (4) с проводимостью обмотки (Y_{12}), в то время как на частотах свыше сотен кГц вклад емкостей на землю и между обмотками будет приводить к отличию Y_{FRA} от Y_{12} . Это необходимо учитывать при использовании частотных характеристик для вычисления проводимостей и сопротивлений измеряемых обмоток.

При соединении измеряемой обмотки в треугольник и измерении по стандартным схемам получаемые частотные характеристики определяются комбинацией проводимостей обмоток трех фаз, что затрудняет пофазный анализ частотных характеристик.

Для трансформатора со схемой и группой соединения обмоток Д/Ун-11 матрица проводимостей имеет размерность 7×7 . Из-за большой размерности матрицы проводимостей вывод выражения для частотной характеристики фазы обмотки

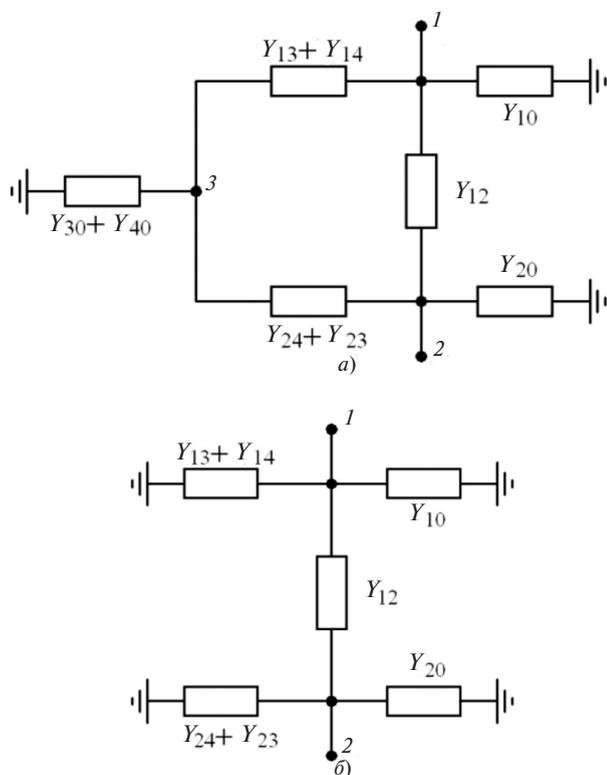


Рис. 4. Схема замещения при закороченной вторичной обмотке (а) и при закороченной и заземленной вторичной обмотке (б)

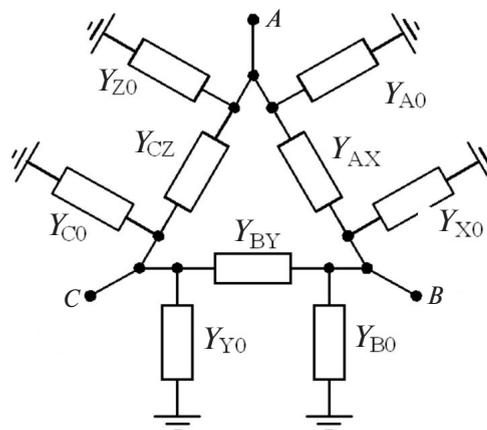


Рис. 5. Схема замещения соединенной в треугольник обмотки ВН

ВН при разомкнутой обмотке НН затруднен. Далее приведен вывод выражений только для случая закороченной и заземленной обмотки НН (рис. 5).

В матричном виде связь токов и напряжений узлов может быть записана в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{AA} & -\dot{Y}_{AX} & -\dot{Y}_{CZ} \\ -\dot{Y}_{AX} & \dot{Y}_{BB} & -\dot{Y}_{BY} \\ -\dot{Y}_{CZ} & -\dot{Y}_{BY} & \dot{Y}_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\dot{Y}_{AA} = \dot{Y}_{A0} + \dot{Y}_{AX} + \dot{Y}_{Z0} + \dot{Y}_{CZ}$;

$\dot{Y}_{BB} = \dot{Y}_{B0} + \dot{Y}_{BY} + \dot{Y}_{X0} + \dot{Y}_{AX}$;

$\dot{Y}_{CC} = \dot{Y}_{C0} + \dot{Y}_{CZ} + \dot{Y}_{Y0} + \dot{Y}_{BY}$.

Принимая $\dot{U}_A = 1$ и исключая первую строку в матричном выражении (5), получаем систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}'_{BB} & -\dot{Y}_{BY} \\ -\dot{Y}_{BY} & \dot{Y}_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{AX} \\ \dot{Y}_{CZ} \end{bmatrix},$$

где $\dot{Y}'_{BB} = \dot{Y}_{BB} + 1/Z$. Из этой системы может быть получено выражение для отношения напряжений на зажимах обмоток:

$$\frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_A} = \frac{\dot{Y}_{AX}\dot{Y}_{CC} + \dot{Y}_{BY}\dot{Y}_{CZ}}{\dot{Y}'_{BB}\dot{Y}_{CC} - \dot{Y}_{BY}^2}. \quad (6)$$

Аналогично могут быть получены выражения для отношений напряжений других выводов:

$$\frac{\dot{U}_C}{\dot{U}_B} = \frac{\dot{Y}_{BY}\dot{Y}_{AA} + \dot{Y}_{CZ}\dot{Y}_{AX}}{\dot{Y}'_{CC}\dot{Y}_{AA} - \dot{Y}_{CZ}^2}; \quad (7)$$

$$\frac{\dot{U}_A}{\dot{U}_C} = \frac{\dot{Y}_{CZ}\dot{Y}_{BB} + \dot{Y}_{AX}\dot{Y}_{BY}}{\dot{Y}'_{AA}\dot{Y}_{BB} - \dot{Y}_{AX}^2}. \quad (8)$$

Из выражений (6)–(8) следует, что частотные характеристики соединенной в треугольник обмотки, измеренные по стандартным схемам, представляют собой сумму произведений проводимостей обмоток измеряемой фазы и соседних фаз, что объясняет приведенные на рис. 2 результаты.

Применение матрицы проводимостей обмоток для интерпретации результатов измерений частотных характеристик и рекомендации по схемам измерений. Из сравнения выражений (1)–(3) следует, что при измерениях по стандартным схемам получаемые частотные характеристики определяются комбинацией проводимостей не только измеряемой обмот-

ки, но и других связанных с ней обмоток. Для снижения взаимного влияния соседних обмоток на измеряемые частотные характеристики отдельной обмотки предпочтительно использование схем с закорачиванием вторичных обмоток. Еще большего снижения взаимного влияния можно достичь в случае одновременного закорачивания и заземления вторичных обмоток.

Важно отметить, что в настоящее время применение схем с заземлением вторичных обмоток не нормировано стандартом МЭК 60076-18 и такие схемы не используются широко на практике. Представляется целесообразным при последующем пересмотре МЭК 60076-18 рассмотреть вопрос о применении таких схем измерений.

Для интерпретации результатов измерений частотных характеристик представляют интерес также измерения элементов матрицы проводимостей обмоток, поскольку такие измерения могут дать дополнительную диагностическую информацию в тех случаях, когда требуется более детально проанализировать состояния обмоток трансформатора.

В [8] было показано, что измерения элементов матрицы проводимостей обмоток могут быть выполнены при использовании стандартной измерительной системы с помощью нестандартных схем измерений. В общем виде матрица проводимостей имеет размерность $N \times N$, где N – число линейных выводов трансформатора. В случае двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток Ун/Д размерность матрицы проводимостей будет 7×7 и для вычисления всех элементов матрицы потребуется проведение $7 \times 7 = 49$ измерений частотных характеристик, что достаточно трудоемко. Поэтому проводить такие измерения во всех случаях представляется нецелесообразным. Вместе с тем, они могут быть выполнены в отдельных случаях, когда требуется получить дополнительный диагностический материал для выявления поврежденной фазы обмотки и оценки характера и опасности повреждения.

Если требуется более детально исследовать состояние одной из обмоток трансформатора, например соединенной в треугольник, число измерений может быть сокращено путем исключения измерения проводимостей, связанных с линейными выводами других обмоток. Для анализа необходимы в первую очередь проводимости исследуемой обмотки, для получения которых требуется по два измерения на фазу. Так, для обмотки, соединенной в треугольник, потребуются измерения всего шести проводимостей, а именно, Y_{AA} , Y_{AX} , Y_{BB} , Y_{BC} , Y_{CC} и Y_{CA} . Таким образом, искомые проводимости фаз исследуемой обмотки Y_{AX} , Y_{BC} и Y_{CA} могут быть

получены без существенного увеличения объема измерений.

Выводы. 1. Частотные характеристики обмоток, получаемые по стандартным схемам измерений, определяются комбинацией проводимостей обмоток, в которую помимо проводимости измеряемой обмотки входят проводимости, связанные со вторичными обмотками. Уменьшить вклад вторичных обмоток можно путем выполнения измерений по нестандартным схемам с закороченными и заземленными вторичными обмотками.

2. Для соединенной в треугольник обмотки измеряемые частотные характеристики определяются комбинацией проводимостей обмоток трех фаз, что затрудняет пофазный анализ частотных характеристик. Это обстоятельство следует учитывать при интерпретации результатов измерений частотных характеристик.

3. Использование нестандартных схем для измерения элементов матрицы проводимостей может быть использовано для получения дополнительной диагностической информации с целью интерпретации результатов измерений частотных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 60076-18:2012. Power transformers. Part 18: Measurement of frequency response.

2. IEEE C57.149-2012. IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. ISBN 978-0-7381-8227-8.

3. Picher P., Tenbohlen S., Lachman M., Scardazzi A., Patel P. Current state of transformer FRA interpretation. — Procedia Engineering, 2017, vol. 202, pp. 3–12.

4. Samimi M.H., Tenbohlen S. FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art. — International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, vol. 89, pp. 115–125.

5. 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. Report A2-115, Paris, France, 21–26 August 2016.

6. Ларин В.С. Анализ частотных характеристик для локализации коротких замыканий в обмотках трансформаторов. — Электричество, 2018, № 4, с. 14–25.

7. Larin V.S., Matveev D.A., Volkov A.Yu. Application of natural frequencies deviations patterns and high-frequency white-box transformer models for FRA interpretation. — 47th CIGRE Session. Report A2-209, Paris, France, 26–31 August 2018.

8. Holdyk A., Gustavsen B., Arana I., 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.

[29.01.2020]

А в т о р: Ларин Василий Серафимович — кандидат техн. наук, представитель Российского национального комитета СИГРЭ, защитил диссертацию в 2007 г.

Матвеев Даниил Анатольевич — научный сотрудник НИУ «МЭИ».

Волков Алексей Юрьевич — начальник группы Отдела трансформаторов Всероссийского электротехнического института

Electrichestvo, 2020, No. 5, pp. 19–25

DOI:10.24160/0013-5380-2020-5-19-25

Interpretation of Power Transformer Frequency Responses Using the Matrix of Winding Admittances

LARIN Vasily S. (All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia) — Head of the Department. Regular member of the CIGRE Study Committee», Cand. Sci. (Eng.)

MATVEYEV Daniil A. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Research Scientist

VOLKOV Aleksey Yu. (All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia) — Head of Transformer Division Group

Frequency response analysis (FRA) is widely used to assess the mechanical and electrical conditions of the power transformer and shunt reactor windings. The requirements for the FRA and for frequency response measurement equipment have been standardized in the IEC 60076-18 standard. However, there still remain many questions concerned with interpreting the frequency response measurement results. As is well known, electrical faults and serious mechanical damages of certain transformer windings entail significant changes in the winding frequency responses. In the general case, the measured transformer winding is coupled with the other windings, a circumstance that has an effect on the frequency responses obtained for an individual winding and adds difficulty to assessing the condition of the transformer windings. It is shown—based on representing the transformer as a multiterminal circuit with the matrix of winding admittances—that the frequency responses measured according to the standard schemes are

coupled with it. It is shown, taking as an example the transformer with a delta-connected winding, that the mutual influence of windings can lead in practice to an incorrectly assessed condition of individual winding phases. Matters concerned with the use of non-standard measurement schemes, including those for measuring the winding admittance matrix entries, are considered with the aim to obtain additional diagnostic information and interpreting the frequency response measurement results.

Key words: *power transformers, condition assessment, frequency responses, frequency response analysis, frequency response interpretation*

REFERENCES

1. **IEC 60076-18:2012.** Power transformers. Part 18: Measurement of frequency response.

2. **IEEE C57.149-2012.** IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. ISBN 978-0-7381-8227-8.

3. **Picher P., Tenbohlen S., Lachman M., Scardazzi A., Patel P.** Current state of transformer FRA interpretation. — *Procedia Engineering*, 2017, vol. 202, pp. 3–12.

4. **Samimi M.H., Tenbohlen S.** FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art. — *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2017, vol. 89, pp. 115–125.

5. **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. Report A2-115, Paris, France, 21–26 August 2016.

6. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 4, pp. 14–25.

7. **Larin V.S., Matveev D.A., Volkov A.Yu.** Application of natural frequencies deviations patterns and high-frequency white-box transformer models for FRA interpretation. — 47th CIGRE Session. Report A2-209, Paris, France, 26–31 August 2018.

8. **Holdyk A., Gustavsen B., Arana I., 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.

[29.01.2020]