

Определение коэффициентов затухания по измеренным частотным характеристикам обмоток силовых трансформаторов.

Ч. 2. Анализ результатов измерений

ЛАРИН В.С.,

ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия

МАТВЕЕВ Д.А.

НИУ «МЭИ», Москва, Россия

В первой части статьи по итогам теоретических исследований, выполненных для упрощенной схемы замещения обмотки трансформатора, было показано, что оценка коэффициента затухания может быть выполнена по ширине резонансных пиков частотных зависимостей модуля и реактивной составляющей напряжения в средней точке схемы замещения, а также активной составляющей входной проводимости и тока в нейтрали рассматриваемой резонансной схемы. В данной части статьи рассмотрена возможность практического использования полученных теоретических соотношений между коэффициентом затухания и шириной резонансных пиков применительно к частотным зависимостям обмоток силовых трансформаторов. Представлены результаты вычислений коэффициента затухания (на примере двух силовых трансформаторов), выполненных с помощью аппроксимации свободной составляющей переходных напряжений, а также путем определения ширины резонансных пиков активной составляющей тока нейтрали обмотки и передаточной функции напряжения промежуточных точек обмотки. Показано, что оценка значений коэффициента затухания обмоток может быть выполнена с использованием доступных измерительных систем совместно с диагностированием состояния трансформатора по методу частотных характеристик.

К л ю ч е в ы е с л о в а: силовые трансформаторы, резонансные перенапряжения, обмотка, частотная характеристика, свободные колебания, коэффициент затухания

В [1] для упрощенной схемы замещения обмотки трансформатора были получены аналитические выражения частотных зависимостей напряжения в средней точке, активных составляющих входной проводимости и тока нейтрали, а также соотношения между шириной резонансных пиков $\Delta\omega$ этих частотных зависимостей и коэффициентом затухания γ , а именно: $\gamma \approx \Delta\omega/2$ для модуля напряжения и $\gamma \approx \Delta\omega/2\sqrt{\sqrt{2}-1}$ для активных составляющих входной проводимости и тока нейтрали, а также реактивной составляющей напряжения.

Использование полученных соотношений между γ и $\Delta\omega$ дает возможность экспериментальной оценки значений γ по результатам измерений вышеуказанных частотных зависимостей. Экспериментально полученные значения коэффициента затухания γ необходимы для повышения точности высокочастотных моделей трансформаторов [2] и моделирования резонансных перенапряжений в их обмотках. Однако применимость для обмоток силовых трансформаторов соотношений между $\Delta\omega$ и

γ , полученных на упрощенной схеме замещения, требует отдельного рассмотрения.

Вычисление ширины резонансных кривых. В общем случае, рассматриваемые частотные зависимости активных составляющих входной проводимости и тока нейтрали и реактивной составляющей напряжения в обмотке весьма сложны. Резонансные пики этих кривых могут быть как положительными, так и отрицательными. Для вычисления ширины отдельных резонансных пиков удобно отбросить информацию об их полярности и анализировать абсолютные значения. Тогда в промежутках между резонансными пиками будет иметь место U-образный характер изменения рассматриваемых зависимостей.

Для определения ширины отдельных резонансных пиков исходная резонансная кривая может быть разделена на последовательные части, каждая из которых содержит один резонансный пик и ограничена слева и справа частотами локальных минимумов U-образных участков, прилегающих к резонансному пику.

Вычисление ширины некоторой резонансной кривой может быть выполнено в следующей последовательности:

1. Определение резонансных частот f_i ($i=1...n$) приближенно по аналитическим формулам или локальным максимумам резонансной кривой.

2. Определение частот $f_{\min i}$ ($i=1...n+1$), соответствующих локальным минимумам кривой в диапазонах частот $(0; f_1)$, $(f_1; f_2), \dots, (f_{n-1}; f_n)$.

3. Определение локальных максимумов резонансной кривой $A_{\max i}$ в диапазонах частот $(f_{\min i}; f_{\min(i+1)})$.

4. Определение частот $f_{\text{леви}}$ и $f_{\text{прави}}$, в пределах которых значение резонансной кривой превышает $A_{\max i} / \sqrt{2}$.

5. Вычисление ширины резонансной кривой:

$$\Delta\omega_{\text{леви}} = 2\pi(f_{\text{леви}} - f_1);$$

$$\Delta\omega_{\text{прави}} = 2\pi(f_{\text{прави}} - f_1);$$

$$\Delta\omega_i = \Delta\omega_{\text{прави}} - \Delta\omega_{\text{леви}}.$$

Результаты сопоставительных измерений на силовых трансформаторах и их обсуждение. Рассмотрим применимость полученных в [1] аналитических соотношений между шириной резонансных кривых $\Delta\omega$ и коэффициентом затухания γ на примере сухих трансформаторов класса напряжения 10 кВ мощностью 1600 кВ·А [3] и 630 кВ·А [4].

Указанные сухие трансформаторы имеют обмотки высшего напряжения (ВН) с литой изоляцией, в средней части которых расположены выводы для переключения ответвлений без возбуждения. Это делает возможным измерение передаточных функций и осциллографирование переходных напряжений в средней точке обмотки, и как результат – сопоставление разных подходов к оценке коэффициентов затухания [3].

Силовой трансформатор 1600 кВ·А. Передаточные функции напряжения в средней точке обмотки ВН этого трансформатора приведены в [5]. Результаты вычисления коэффициентов затухания путем аппроксимации свободной составляющей переходного напряжения в средней точке и тока нейтрали обмотки ВН этого трансформатора приведены в [3]. Этот метод можно рассматривать как достаточно точный, и соответствующие результаты оценки коэффициентов затухания могут быть приняты в качестве референсных.

На рис. 1,а приведены измеренные по «сквозной» схеме [6–10] частотные характеристики фазы В обмотки ВН при разомкнутой и закороченной обмотке низшего напряжения (НН), а на рис. 1,б – соответствующие им активные проводимости G_{12} ,

вычисленные согласно [10, 11]. На рис. 1,б видно, что хорошее совпадение зависимостей G_{12} для разомкнутой и закороченной обмотки НН начинается на частотах около 200 кГц, что говорит о том, что именно там лежат первые собственные частоты колебаний обмотки ВН [11].

Рассмотрим далее частотные зависимости модуля и активной составляющей тока нейтрали I_N обмотки ВН. Для удобства эти зависимости могут быть представлены в виде отношения тока нейтрали I_N к напряжению источника U_1 (рис. 2), которое можно получить из измеренных частотных характеристик обмоток путем деления их амплитуды, выраженной в относительных единицах, на $Z=50$ Ом.

На рис. 2 видно, что резонансные пики в активной составляющей тока I_N более выражены, чем в модуле тока нейтрали. По резонансным пикам активной составляющей I_N видно, что первая собственная частота колебаний обмотки ВН составляет около 186 кГц, вторая – около 200 кГц, а третья – около 214 кГц. При этом в частотной зависимости G_{12} фазы В первая оказалась более выражена, чем в фазах А и С, а вторая частота – никак не проявилась. Для фаз А и С из-за близких значений первой и второй собственных частот резонансные пики на

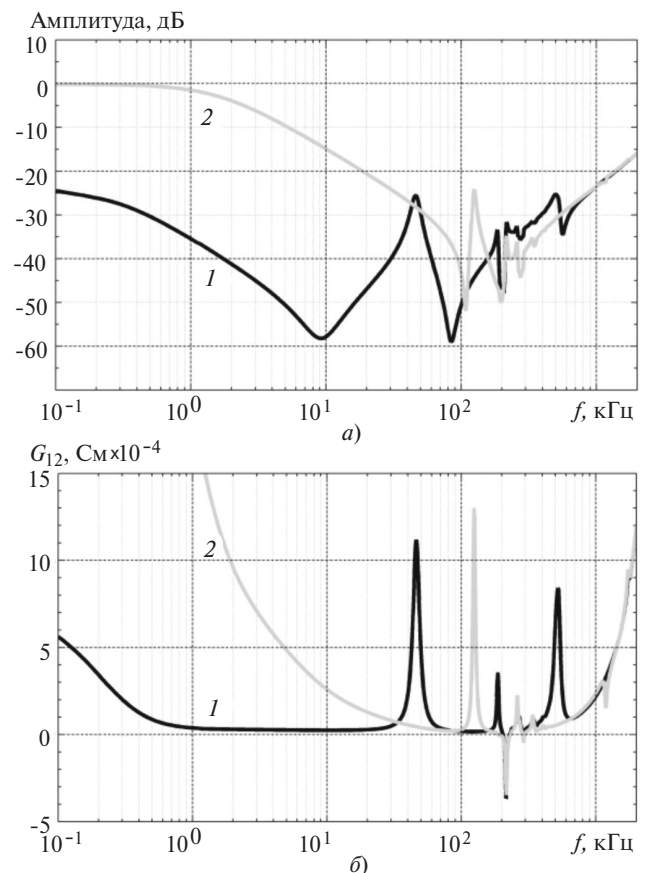


Рис. 1. Частотные характеристики (а) и активные проводимости (б) обмотки ВН сухого трансформатора 1600 кВ·А при разомкнутой (1) и закороченной (2) обмотке НН

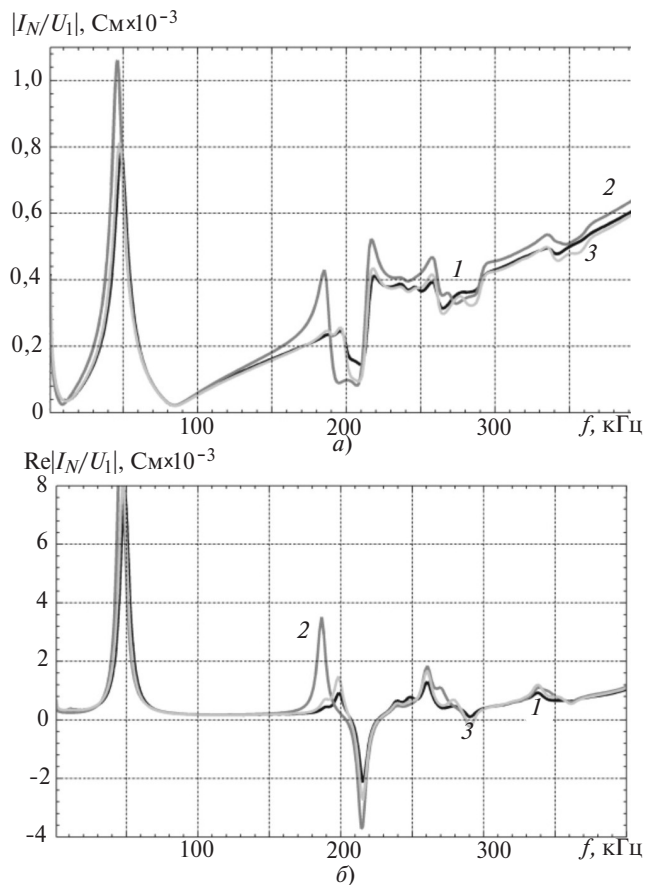


Рис. 2. Модуль (а) и активная составляющая (б) отношения I_N/U_1 для обмотки ВН при разомкнутой обмотке НН: 1, 2 и 3 – фазы А, В и С соответственно

первой собственной частоте оказались слабо выражены в частотной зависимости G_{12} . Эти отличия можно связать с конструктивными особенностями обмоток рассматриваемого трансформатора и влиянием обмотки НН, соединенной в звезду. Измерения приведенных выше частотных характеристик фазы В обмотки ВН выполнены для схемы с разомкнутой обмоткой НН. Фаза В обмотки НН электрически связана с фазами А и С обмотки НН, которые в свою очередь имеют связь с фазами А и С обмотки ВН. В результате этого при измерениях частотных характеристик одной из фаз обмотки ВН при разомкнутой обмотке НН можно ожидать влияния обмотки НН и обмоток соседних фаз, которые можно снизить путем закорачивания и заземления обмотки НН [12]. Однако применительно к задаче резонансных перенапряжений представляют интерес частотные характеристики обмотки ВН при ненагруженной обмотке НН, поскольку именно в этом случае следует ожидать наибольших резонансных перенапряжений. Именно в этом режиме выполнено осциллографирование напряжений в обмотке ВН [3]. Поэтому далее рассматриваются частотные характеристики обмотки ВН при незакороченной обмотке НН.

На практике вместо коэффициента затухания γ удобно оперировать отношением постоянной затухания $\tau=1/\gamma$ к периоду резонансной частоты $T=1/f_{\text{рез}}$, которое наглядно показывает скорость затухания свободных колебаний на собственных частотах колебаний обмоток. Используя полученные выше соотношения между $\Delta\omega$ и γ , можно получить выражение для приближенного вычисления τ/T по измеренным частотным зависимостям:

$$\frac{\tau}{T} = \frac{f_{\text{рез}}}{\gamma} \approx \frac{f_{\text{рез}}}{\Delta\omega} K_{\gamma}, \quad (1)$$

где $K_{\gamma}=2$ – при использовании частотной зависимости модуля входной проводимости и модуля напряжения на внутренних точках обмотки; $K_{\gamma}=2\sqrt{\sqrt{2}-1}$ – при использовании частотной зависимости активной составляющей входной проводимости, реактивной составляющей напряжения на внутренних точках обмотки или активной составляющей тока нейтрали.

В табл. 1 представлены результаты оценки значений τ/T для первых трех собственных частот колебаний обмотки ВН, полученных путем аппроксимации переходного напряжения в средней точке обмотки ВН [3] и путем вычисления по формуле (1) из частотных зависимостей активной составляющей тока нейтрали и модуля напряжения в средней точке обмотки ВН.

Из табл. 1 видно, что для фазы В, у которой частотная зависимость $\text{Re}(I_N/U_1)$ имеет явно выраженные резонансные пики на первой и третьей собственных частотах колебаний обмотки ВН, получено достаточно хорошее совпадение результатов оценки отношения τ/T по формуле (1) с более точным решением по методике [3]. При этом для фаз А и С значения τ/T , полученные из ширины резонансной кривой $\text{Re}(I_N/U_1)$ по вышеприведенному алгоритму, сильно отличаются от значений, полученных путем аппроксимации переходного напряжения. Это связано с тем, что кривая $\text{Re}(I_N/U_1)$ (рис. 2, б) ввиду близкого расположения первой и второй собственных частот пересекает значение $A_{\text{max}1}/\sqrt{2}$ только после второй собственной частоты, что приводит к некорректным оценкам значений $\Delta\omega$ и γ . Аналогичный результат получен при вычислении отношения τ/T по передаточной функции напряжения в средней точке обмотки, что также связано с наложением соседних резонансных пиков из-за близких значений первой и второй собственных частот (см. рис. 1 в [5]). При этом для третьей собственной частоты, вблизи которой зависимости $\text{Re}(I_N/U_1)$ всех трех фаз обмотки ВН рассматриваемого трансформатора имеют явно выраженный резонансный пик (рис. 2, б), оценка τ/T по форму-

Таблица 1

Значения τ/T для трансформатора 1600 кВ·А

Способ получения	Фаза обмотки ВН	Значения для собственных частот с номерами		
		1	2	3
Аппроксимации переходного напряжения [2] (по двум доминирующим частотам)	A	8,46	9,28	—
	B	8,65	—	9,29
	C	8,45	9,37	—
Оценка по формуле (1) для кривой $\text{Re}(I_N/U_1)$	A	2,07	7,66	10,27
	B	8,37	—	9,59
	C	2,28	8,25	10,05
Оценка по формуле (1) для передаточной функции напряжения в средней точке обмотки	A	6,72	8,07	10,71
	B	8,04	—	10,44
	C	6,58	8,66	10,14

ле (1) также хорошо согласуется с более точным результатом из аппроксимации переходного напряжения.

Сравним полученные значения τ/T с результатами, приводимыми в [13–15].

В [13] для вычисления отношения γ/ω предложено использовать формулы (3a) и (3b), которые представляют собой аппроксимацию экспериментальных данных [14]. Для собственных частот 185,8, 198,5 и 214,4 кГц значения круговой частоты ω составляют $1,167 \cdot 10^6$, $1,247 \cdot 10^6$ и $1,347 \cdot 10^6$ рад/с. Поскольку все значения ω больше граничного $0,5 \cdot 10^6$ рад/с, по формуле (3b) [13] получаем отношение $\gamma/\omega = 0,05$. Это дает значение $\tau/T = 3,18$, которое почти в три раза меньше экспериментально полученного для рассматриваемого трансформатора.

Такое расхождение можно объяснить отличием конструкции обмотки ВН рассматриваемого сухого трансформатора от силовых трансформаторов, исследованных около полувека назад в работе [14]. Также следует отметить, что наибольшее значение ω для экспериментальных данных, приведенных на рис. 3 [14], не превышает $0,57 \cdot 10^6$ рад/с (90,7 кГц). Таким образом, применение формулы (3b) [13] к рассматриваемому трансформатору означает экстраполяцию далеко за пределами экспериментальных данных.

Оценка по формуле (1) [15] дает диапазон значений $\tau/T = 4,97 \div 13,26$. Полученные для рассматриваемого трансформатора значения τ/T (табл. 1) действительно лежат в этом диапазоне, из чего можно сделать вывод о более корректной оценке τ/T по формуле (1) [15], чем по формулам (3a) и (3b) [13]. Вместе с тем, для практических целей получить возможный диапазон τ/T недостаточно, важно получить фактическое значение этого параметра в каждом конкретном случае.

Силовой трансформатор 630 кВ·А. Краткая информация по этому трансформатору, измеренные

передаточные функции и характерные осциллограммы напряжений на внутренних переходах обмотки ВН трансформатора 630 кВ·А приведены в [4]. На этом трансформаторе было выполнено осциллографирование напряжений на фазе A, поэтому далее более подробно анализируется именно эта фаза обмотки ВН.

На рис. 3 приведены измеренные по «сквозной» схеме частотные характеристики фазы A обмотки ВН и соответствующие им частотные зависимости активной проводимости G_{12} . На рис. 3,б видно, что

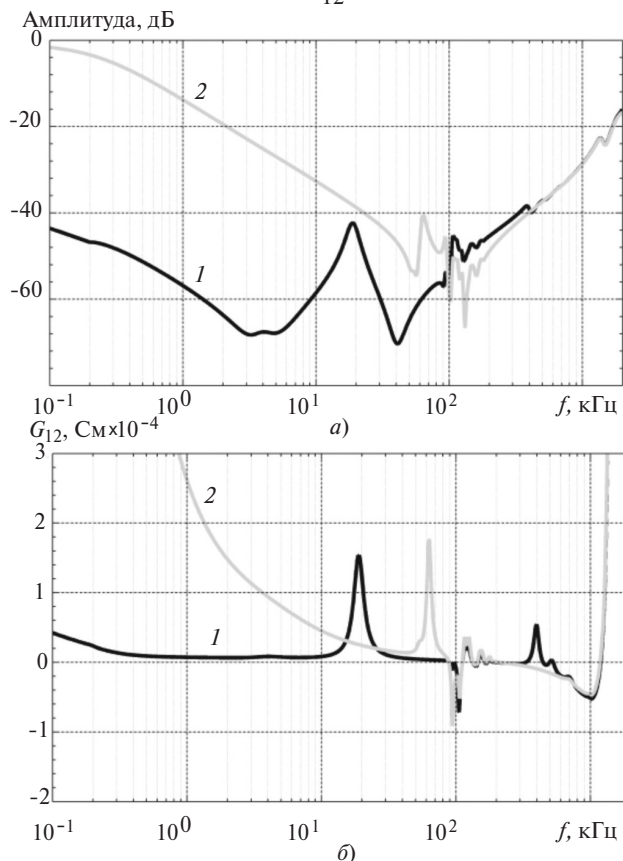


Рис. 3. Частотные характеристики (a) и активные проводимости (б) обмотки ВН сухого трансформатора 630 кВ·А при разомкнутой (1) и замкнутой (2) обмотке НН

совпадение зависимостей G_{12} для разомкнутой и замкнутой обмотки ВН наблюдается на частотах около 90 кГц, т.е. начиная с этой частоты лежат первые собственные частоты колебаний обмотки ВН.

На рис. 4 приведены частотные зависимости модуля и активной составляющей отношения тока нейтрали I_N обмотки ВН для фаз A , B и C и напряжения источника U_1 , полученные из измеренных частотных характеристик путем деления их амплитуды на $Z=50$ Ом.

Из частотной зависимости активной составляющей отношения I_N/U_1 для этого трансформатора видно, что первая собственная частота колебаний обмотки ВН составляет около 94 кГц, вторая – около 106 кГц, а третья – около 115 кГц. Эти значения почти в два раза меньше, чем были получены для трансформатора 1600 кВ·А, что связано с конструктивными отличиями обмоток ВН этих двух трансформаторов. Ключевые отличия – разное число витков ввиду различия в схемах соединения (треугольник в 630 кВ·А и звезда в 1600 кВ·А), разных диаметров стержня магнитопровода (в 1600 кВ·А диаметр стержня больше), и как результат разная электрическая длина обмотки ВН.

Результаты оценки значений τ/T для первых трех собственных частот колебаний обмотки ВН представлены в табл. 2.

Полученные для трансформатора 630 кВ·А результаты в целом подтверждают сделанные выше выводы. Для явно выраженных резонансных пиков в кривых активной составляющей тока нейтрали $\text{Re}(I_N/U_1)$ и модуля напряжения в средней точке обмотки ВН оценка отношения τ/T по формуле (1) хорошо согласуется с полученными из аппроксимации значениями. С учетом этого целесообразно сопоставлять между собой результаты оценки значений γ по разным резонансным кривым, например, частотным зависимостям напряжений в обмотке и тока в нейтрали обмотки.

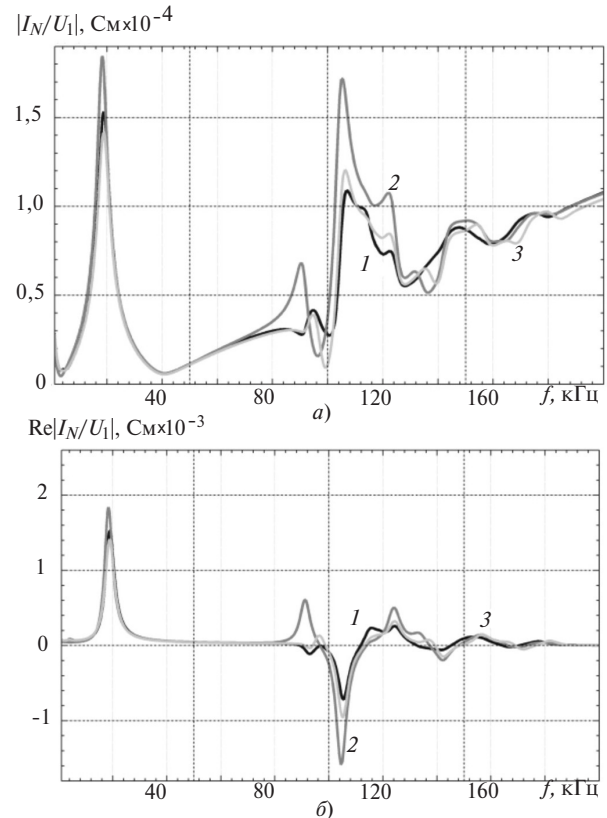


Рис. 4. Модуль (а) и активная составляющая (б) отношения I_N/U_1 для обмотки ВН при разомкнутой обмотке НН: 1, 2 и 3 – фазы A , B и C

В случае трехфазного трансформатора для проверки получаемых значений γ также можно использовать сравнение между фазами измеряемой обмотки трансформатора. Как правило, серийно выпускаемые силовые трансформаторы имеют во всех трех фазах практически идентичные обмотки, что определяет практически идентичные значения коэффициента затухания во всех трех фазах трансформатора.

Для этого трансформатора получены значения собственных частот 93,0, 105,6 и 115,8 кГц, чему соответствуют значения круговой частоты

Таблица 2

Значения τ/T для трансформатора 630 кВ·А

Способ получения	Фаза обмотки ВН	Значения для собственных частот с номерами		
		1	2	3
Аппроксимации переходного напряжения [2] (по двум доминирующим частотам)	A^*	6,44	8,52	4,32
Оценка по формуле (15) для кривой $\text{Re}(I_N/U_1)$	A	7,63	7,04	–
	B	6,40	7,09	–
	C	–	7,08	–
Оценка по формуле (15) для передаточной функции напряжения в средней точке обмотки	A	6,05	–	–
	B	6,16	7,69	–
	C	5,69	–	–

*) Осциллографирование выполнено только на фазе A обмотки ВН.

$0,584 \cdot 10^6$, $0,663 \cdot 10^6$ и $0,727 \cdot 10^6$ рад/с. Все эти значения ω больше граничного $0,5 \cdot 10^6$ рад/с, и из формулы (3b) [13] получаем $\gamma/\omega=0,05$ и $\tau/T=3,18$. В этом случае оценка по формулам [13] также оказалась далека от экспериментально полученных значений.

Рассмотренные примеры наглядно показывают, что использование эмпирических формул для коэффициентов затухания без учета специфики исследуемых обмоток трансформаторов может приводить к существенным ошибкам в оценках значений коэффициентов затухания. При использовании эмпирических формул для коэффициентов затухания важно знать, для каких конструкций обмоток, материала и типов проводов были получены экспериментальные данные. Ввиду большого разнообразия конструкций обмоток трансформаторов предпочтительна экспериментальная оценка коэффициентов затухания путем измерений на трансформаторах идентичной или близкой конструкции.

В заключение необходимо отметить, что измерительный импеданс 50 Ом, используемый при измерениях частотных характеристик обмоток, в отдельных случаях может быть сопоставим с волновым сопротивлением измеряемой обмотки и может оказывать влияние на затухания на собственных частотах колебаний в обмотке. Проверка влияния измерительного импеданса и достоверности значений коэффициента затухания, получаемых из частотных зависимостей тока нейтрали, при необходимости может быть выполнена путем моделирования частотных характеристик с использованием высокочастотных моделей обмоток трансформаторов с учетом полученных коэффициентов затухания.

Выводы. 1. Оценка значений коэффициентов затухания γ на собственных частотах колебаний обмоток силовых трансформаторов может быть выполнена на основе частотных зависимостей модуля напряжения в промежуточных точках обмотки путем вычисления ширины резонансных пиков $\Delta\omega$ с использованием соотношения $\gamma \approx \Delta\omega/2$.

2. Для активной составляющей тока нейтрали оценка значений коэффициентов затухания может быть выполнена с использованием соотношения $\gamma \approx \Delta\omega\sqrt{\sqrt{2}-1} \approx \Delta\omega/1,3$.

3. Корректность оценки γ по вышеуказанным соотношениям зависит от того, насколько явно выражены отдельные резонансные пики в анализируемых частотных зависимостях и как разнесены друг от друга собственные частоты колебаний обмотки. Так как при наложении резонансных пиков соседних собственных частот обмоток возможна некорректная оценка значений γ , в случае использования данного подхода следует оценивать степень достоверности получаемых результатов исходя из того, насколько выражены те или иные резонансные пики. Для повышения достоверности це-

лесообразно сопоставлять результаты оценки значений γ по разным фазам исследуемой обмотки трансформатора и разным резонансным кривым, например, частотным зависимостям напряжений в обмотке и тока в нейтрали обмотки.

4. Частотные зависимости тока нейтрали обмотки трансформатора могут быть получены из частотных характеристик, снимаемых при оценке состояния обмоток трансформатора по методу частотных характеристик (FRA). Таким образом, оценка значений коэффициентов затухания обмоток может быть выполнена с использованием коммерчески доступных измерительных систем вместе с диагностированием состояния трансформатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин В.С., Матвеев Д.А. Определение коэффициентов затухания по измеренным частотным характеристикам обмоток силовых трансформаторов. Ч. 1. Теоретическое обоснование. — Электричество, 2021, №1, с. 13–22.
2. B. Gustavsen, C. Martin, A. Portillo. Time-Domain Implementation of Damping Factor White-Box Transformer Model for Inclusion in EMT Simulation Programs. — IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, vol. 35, No. 2, pp. 464–472.
3. Ларин В.С., Матвеев Д.А. Аппроксимация переходных резонансных напряжений и токов в обмотках силовых трансформаторов для определения собственных частот колебаний и коэффициентов затухания. — Электричество, 2020, №12, с. 44–54.
4. Ларин В.С., Матвеев Д.А. Оценка воздействий на внутреннюю изоляцию обмоток силовых трансформаторов при резонансных перенапряжениях. — Электричество, 2020, № 4, с. 16–24.
5. Ларин В.С. Использование передаточных функций для оценки воздействий на изоляцию обмоток трансформаторов при резонансных перенапряжениях. — Электричество, 2019, №1, с. 23–29.
6. IEC 60076-18:2012. Power transformers. Part 18: Measurement of frequency response.
7. IEEE C57.149-2012. IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, 2013 [Электрон. ресурс] URL: https://standards.ieee.org/standard/C57_149-2012.html (Дата обращения 25.12.2020).
8. ГОСТ Р 59239–2020 (МЭК 60076-18:2012) Трансформаторы силовые и реакторы. Метод измерения частотных характеристик. М.: Стандартинформ, 2020.
9. CIGRE Technical Brochure 342 «Mechanical-condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)». Working Group A2.26, April 2008, 67 p.
10. CIGRE Technical Brochure 812 «Advances in the Interpretation of Transformer Frequency Response Analysis (FRA)». Working Group A2.53, September 2020, 108 p.
11. Ларин В.С., Волков А.Ю. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.2. Определение резонансных частот обмоток. — Электричество, 2015, № 12, с. 20–25.
12. Ларин В.С., Матвеев Д.А., Волков А.Ю. Интерпретация частотных характеристик силовых трансформаторов с применением матрицы проводимостей обмоток. — Электричество, 2020, № 5, с. 19–25.
13. Gustavsen B., Portillo A. A Damping Factor-Based White-Box Transformer Model for Network Studies. — IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, vol. 33, No. 6, pp. 2956–2964.

14. Fergestad P.I., Henriksen T. Transient Oscillations in Multiwinding Transformers. — IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1974, vol. 93, No. 2, pp. 500–509.

15. Белецкий З.М., Бунин А.Г., Горбунцов А.Ф., Конторович Л.Н. Расчет импульсных воздействий в обмотках трансформаторов с применением ЭВМ. М.: Информэлектро, 1978, 79 с.



[29.08.2020]

Авторы: **Ларин Василий Серафимович** — кандидат техн. наук, начальник отдела трансформаторов Всерос-

сийского электротехнического института (ВЭИ) — филиала ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забыхина» (РФЯЦ-ВНИИТФ).



Матвеев Даниил Анатольевич — научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ».

Electrichestvo, 2021, No. 2, pp. 22–28

DOI:10.24160/0013-5380-2021-2-22-28

Determination of Damping Factors Based on the Measured Frequency Responses of Power Transformer Windings. Part 2. Analysis of Measurement Results

LARIN Vasily S. (*All-Russian Electrotechnical Institute — Branch of FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Moscow, Russia*) — Head of the transformer Dept., Cand. Sci. (Eng.)

MATVEEV Daniil A. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia*) — Research Scientist (Eng.)

In the first part of the article, based on the results of theoretical studies performed for a simplified transformer winding equivalent scheme, it was shown that the damping factors can be estimated from the width of the resonant peaks of the frequency responses of the module and the reactive component of the voltage at the midpoint of the equivalent scheme, as well as the active component of the input admittance and neutral current of the considered resonant scheme. In this part of the article, the practical possibility of applying the obtained theoretical relations between the damping factors and the width of resonant peaks in relation to the frequency responses of power transformer windings is considered. The results of calculations of the damping factors at the two power transformers made by using the fitting of the free component of transient voltage and by determining the width of the resonance peaks of the active component of winding neutral current and the voltage transfer function, corresponding to intermediate points of the winding. It is shown that the evaluation of the values of the winding damping factors can be performed as a byproduct of transformer condition assessment by frequency response analysis (FRA).

К е у в о р д с: power transformers, resonance overvoltages, winding, frequency response, free oscillations, damping factor

REFERENCES

1. Larin V.S., Matveev D.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 1, pp. 13–22.
2. B. Gustavsen, C. Martin, A. Portillo. Time-Domain Implementation of Damping Factor White-Box Transformer Model for Inclusion in EMT Simulation Programs. — IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, vol. 35, No. 2, pp. 464–472.
3. Larin V.S., Matveev D.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 12, pp. 44–54.
4. Larin V.S., Matveev D.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 4, pp. 16–24.
5. Larin V.S. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2019, No.1, pp. 23–29.
6. IEC 60076-18:2012. Power transformers. Part 18: Measurement of frequency response.
7. IEEE C57.149-2012. IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, 2013 [Electron Resource] URL: https://standards.ieee.org/standard/C57_149-2012.html (Date of appeal 25.12.2020).
8. GOST R 59239–2020 (IEC 60076-18:2012) *Transformatory silovye i reaktory. Metod izmereniya chastotnykh harakteristik* (Power

transformers and reactors. Frequency response measurement method). М.: Standartinform, 2020.

9. CIGRE Technical Brochure 342 «Mechanical-condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)». Working Group A2.26, April 2008, 67 p.

10. CIGRE Technical Brochure 812 «Advances in the Interpretation of Transformer Frequency Response Analysis (FRA)». Working Group A2.53, September 2020, 108 p.

11. Larin V.S., Volkov A.Yu. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 12, pp. 20–25.

12. Larin V.S., Matveev D.A., Volkov A.Yu. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 5, pp. 19–25.

13. Gustavsen B., Portillo A. A Damping Factor-Based White-Box Transformer Model for Network Studies. — IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, vol. 33, No. 6, pp. 2956 – 2964.

14. Fergestad P.I., Henriksen T. Transient Oscillations in Multiwinding Transformers. — IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1974, vol. 93, No. 2, pp. 500–509.

15. Beletskiy Z.M., Bunin A.G., Gorbuntsov A.F., Kontorovich L.N. *Raschet impul'snykh vozdeystviy v obmotkakh transformatorov s primeneniem EVM* (Calculation of impulse influences in transformer windings using a computer). М.: Informelektro, 1978, 79 p.

[29.08.2020]