

Определение собственных частот и коэффициентов затухания по измеренным передаточным функциям напряжения обмоток силовых трансформаторов

ЛАРИН В.С., ЗЕНЕНКО А.С., РЫДКИН М.А.

ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия

Проблема повреждения силовых трансформаторов в результате высокочастотных коммутационных перенапряжений в электрических сетях 6–35 кВ решается применением защитных RC-цепей и отстройкой собственных частот колебаний обмоток от частот переходных колебаний сетевого напряжения. Выбор оптимальных параметров RC-цепей требует моделирования переходных процессов в кабельной сети совместно с первичной обмоткой трансформатора. Для этого необходима достоверная высокочастотная модель трансформатора, верификация которой проводится на основе измерения собственных частот и коэффициентов затухания свободных колебаний. Для отстройки собственных частот колебаний обмоток трансформаторов требуется измерение их значений, а также измерение кратности резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора, чтобы оценить опасные для трансформатора диапазоны частот переходных колебаний сетевого напряжения. В статье предложен подход к оценке собственных частот и коэффициентов затухания на основе измерений и анализа передаточных функций напряжения в доступных промежуточных точках обмоток силовых трансформаторов. Приведен практический пример оценки собственных частот и коэффициентов затуханий свободных колебаний в обмотке высшего напряжения сухого трансформатора с помощью предложенного подхода, а также аппроксимацией переходных напряжений и путем анализа частотных характеристик первичной обмотки силового трансформатора.

К л ю ч е в ы е с л о в а: силовые трансформаторы, резонансные процессы, обмотки, частотная характеристика, передаточная функция, собственные колебания, собственная частота, коэффициент затухания

В последние годы в электрических сетях 6–35 кВ в сочетании с вакуумными или элегазовыми выключателями все шире применяются силовые кабели из сшитого полиэтилена. В кабельных сетях 6–35 кВ отмечаются случаи повреждений силовых трансформаторов в результате высокочастотных коммутационных перенапряжений [1–15], которые сопровождаются пробоем продольной изоляции (витковыми и/или межкатушечными замыканиями), перекрытиями изоляции отводов и выводов регулировочной части обмотки высшего напряжения (ВН), перекрытиями изоляции переключающих устройств регулирования под напряжением (РПН).

Можно выделить две потенциально опасные коммутации – отключение выключателем трансформатора в режиме малой индуктивной нагрузки (холостого хода) и его включение совместно с протяженной кабельной линией. В первом случае характер переходного процесса и перенапряжения в значительной степени определяется параметрами выключателя. Например, вакуумные выключатели отличаются способностью отключать ток сравнительно большой частоты, что определяет возможность многократных погасаний и повторных

зажиганий дуги между контактами выключателя и «частокोल» импульсов перенапряжений, воздействующих на изоляцию коммутируемых трансформаторов. Во втором случае, при включении протяженных кабельных линий, изоляционная среда и характеристики выключателя уходят на второй план, поскольку высокочастотный переходный процесс инициируется предпробоем межконтактного промежутка между сходящимися контактами выключателя и затем определяется переотражениями волн напряжения в кабельных линиях. Переходное напряжение при этом имеет характер наложенных на сетевое напряжение высокочастотных колебаний с частотой порядка единиц – десятков кГц, которые могут спровоцировать развитие резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов.

Проблема высокочастотных перенапряжений также проявила себя в крупных ветроэлектростанциях (ВЭС) с ветроэнергетическими установками (ВЭУ) мегаваттного класса [1, 2, 16–19]. Это связано с тем, что в таких ВЭС для сбора мощности отдельных ВЭУ, как правило, используют протяженные кабельные сети напряжением 30–36 кВ, выполненные силовыми кабелями из сшитого полиэтилена. Поскольку расстояние между

соседними ВЭУ обычно составляет около 400–600 м, а на одном луче системы сбора мощности может быть подключено 5–10 ВЭУ, суммарная длина кабельных присоединений оказывается равной нескольким километрам, что определяет возможность переходных колебаний напряжения на частотах порядка десятков кГц при коммутациях в такой кабельной сети.

Сухие силовые трансформаторы имеют ряд несомненных преимуществ по сравнению с масляными трансформаторами (экологичность, взрыво- и пожаробезопасность) [20], однако они более подвержены воздействию высокочастотных перенапряжений. Это связано с конструктивными особенностями сухих трансформаторов [15] и в первую очередь с тем, что обмотки ВН этих трансформаторов обычно выполняют катушечного или дискового типа. Обмотки такого типа имеют частоты собственных колебаний порядка десятков кГц. В случае, если частоты переходных колебаний напряжений при коммутациях в кабельной сети окажутся близкими к собственным частотам колебаний обмоток, возникают условия для развития опасных резонансных колебаний в первичных обмотках трансформаторов.

Проблема высокочастотных резонансных перенапряжений в сетях 6–35 кВ решается применением защитных RC-цепей и отстройкой собственных частот колебаний обмоток от частот переходных колебаний сетевого напряжения [15].

В первом случае выбор оптимальных параметров защитных RC-цепей основан на моделировании переходных процессов в кабельной сети совместно с первичной обмоткой трансформатора. Для этого требуется достоверная высокочастотная модель трансформатора [1, 21], корректно воспроизводящая частоты и затухание собственных колебаний в первичной обмотке трансформатора. Для верификации высокочастотной модели необходимы измеренные значения собственных частот и коэффициентов затуханий колебаний обмоток [22, 23].

Во втором случае для отстройки собственных частот колебаний обмоток трансформаторов также необходима достоверная высокочастотная модель трансформатора. Альтернативно можно воспользоваться экспериментально полученными данными о собственных частотах колебаний обмоток и кратностях резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора, чтобы оценить опасные для трансформатора диапазоны частот переходных колебаний сетевого напряжения.

В [22–24] предложены подходы к оценке собственных частот и коэффициентов затухания на основе аппроксимации переходных напряжений и токов в обмотках и анализа частотных характеристик обмоток силовых трансформаторов.

Предлагается другой подход – на основе анализа передаточных функций напряжения промежуточных точек обмоток силовых трансформаторов, измеряемых в диапазоне частот от десятков Гц до единиц МГц.

Передаточная функция напряжения $H(f)$ представляет собой частотную зависимость отношения напряжения в некоторой произвольной i -й точке U_i к напряжению на входе U_1 обмотки силового трансформатора:

$$H(f) = U_i(f)/U_1(f),$$

где f – частота напряжения источника.

Определение собственных частот из передаточных функций. Передаточная характеристика $H(f)$ представляет собой напряжение в некотором i -м узле обмотки при ее питании единичным периодическим напряжением.

В [22] на примере упрощенных схем замещения обмотки трансформатора, содержащих два и четыре П-звена, было показано, что переходное напряжение в промежуточном i -м узле резонансной схемы при ее питании единичным синусоидальным напряжением может быть представлено в виде:

$$u_i(t) = B_1 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t + \sum_{j=1}^N (B_{2j+1} \sin \omega_j t + B_{2j+2} \cos \omega_j t) e^{-\gamma_j t}, \quad (1)$$

где B_1 и B_2 – амплитуды вынужденных колебаний; B_{2j+1} и B_{2j+2} – амплитуды свободных колебаний с частотой, равной j -й собственной частоте колебаний схемы; ω_j – j -я собственная круговая частота; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота напряжения источника; γ_j – коэффициент затухания собственных колебаний j -й собственной частоты; N – число собственных частот резонансной схемы.

Напряжение в i -м узле схемы можно разделить на вынужденные колебания

$$u_{2\text{вынужд}}(t) = B_1 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t$$

и свободные колебания

$$u_{2\text{своб}}(t) = \sum_{j=1}^N (B_{2j+1} \sin \omega_j t + B_{2j+2} \cos \omega_j t) e^{-\gamma_j t}.$$

Из общей теории колебаний известно, что амплитуда вынужденных колебаний простой колебательной системы обратно пропорциональна разности квадратов частоты вынужденных колебаний ω и собственных колебаний ω_j и при малом затухании ($\gamma_j \ll \omega_j$) достигает максимума на частоте, близкой к собственной частоте колебаний ω_j [28]. При этом в условиях резонанса фазовый сдвиг между напряжением источника и напряжением в резонансной схеме при малом затухании ($\gamma_j \ll \omega_j$) примерно равен $\pi/2$. Аналогичные результаты были получены на примере упрощенных схем замещения обмотки [29].

Напряжение в i -м узле резонансной схемы в установившемся режиме может быть представлено в виде суммы активной и реактивной составляющих: $\dot{U}_i(f) = B_1(f) + jB_2(f)$. При этом реактивная составляющая напряжения $\text{Im}(\dot{U}_i(f)) = B_2(f)$ имеет явно выраженные мак-

суммы на собственных частотах колебаний обмотки [22, 29]. Тогда по определению передаточной функции имеем: $H(f) = \dot{U}_1(f)$ и $\text{Im}(H(f)) = B_2(f)$.

Из выражения (1) при $t = 0$ получим, что

$$B_2(f) = -\sum_{j=1}^N B_{2j+2}(f).$$

Это означает, что в резонансной схеме частотная зависимость реактивной составляющей установившегося напряжения $B_2(f)$ содержит те же резонансные частоты, что и амплитуды собственных колебаний $B_{2j+2}(f)$. Из этого следует практическая возможность определения собственных частот колебаний по резонансным пикам частотной зависимости реактивной составляющей установившегося напряжения в резонансной схеме.

Определение коэффициентов затухания собственных колебаний из передаточных функций. Из теоретических основ электротехники известно [30–34], что остроту резонансной кривой входной проводимости, напряжения или тока резонансного контура удобно характеризовать ее шириной $\Delta\omega$ на уровне $1/\sqrt{2}$ максимального значения (минус 3 дБ). В [23] на примере упрощенной схемы замещения обмотки трансформатора, содержащей два П-звена, были получены соотношения между шириной $\Delta\omega$ резонансных пиков передаточных функций и коэффициентом затухания γ , а именно:

для модуля напряжения на внутренних точках обмотки $\gamma \approx \Delta\omega/2$;

для реактивной составляющей напряжения на внутренних точках обмотки

$$\gamma \approx \Delta\omega / 2\sqrt{\sqrt{2}-1} \approx \Delta\omega / 1,3. \quad (2)$$

Вычисление $\Delta\omega$ и γ может быть выполнено по алгоритму, изложенному в [24].

В [23, 24] показано, что корректная оценка коэффициента затухания γ по ширине резонансных пиков $\Delta\omega$ возможна, хотя далеко не во всех случаях. Практическая возможность определения $\Delta\omega$ и корректность оценки γ зависит от того, как явно выражены резонансные пики анализируемых частотных зависимостей и насколько разнесены друг от друга собственные частоты колебаний обмотки. В случае близкого расположения соседних собственных частот колебаний возможно наложение соседних резонансных пиков и, как результат, некорректная оценка $\Delta\omega$ и γ .

Подключение к внутренним точкам обмоток. В сухих трансформаторах с регулированием напряжения без возбуждения (ПБВ) или регулированием под напряжением с помощью устройства РПН такая возможность имеется, поскольку есть доступ к регулирующим секциям обмоток ВН.

У масляных трансформаторов доступ к интересующим промежуточным точкам обмоток, как правило, затруднен. Измерения на трансформаторе без масла

аналогично импульсному обмеру могут давать расхождения по сравнению с измерениями на трансформаторе, заполненном маслом, поскольку емкости обмоток оказывают сильное влияние на резонансные частоты и кратность резонансных перенапряжений.

Наиболее подходящий способ измерений может быть выбран в зависимости от конструкции трансформатора. Например, при наличии ПБВ в средней части обмотки ВН измерения могут быть выполнены путем подключения к выводам устройства ПБВ. В случае небольших по размерам масляных трансформаторов измерения могут быть выполнены при размещении активной части в собственном баке или специальном технологическом баке с маслом с установкой временных подключений (отпаяк, иглодок) в отдельных точках обмотки. Применительно к мощным трансформаторам удобнее выполнить измерения без масла, однако это требует последующего пересчета результатов измерений к состоянию, когда трансформатор заполнен маслом. Такой пересчет может быть выполнен с использованием высокочастотной модели трансформатора в состоянии с маслом и без него.

Середине высоты обмотки соответствует пучность пространственного распределения напряжения на нечетных собственных частотах [20, 25–27]. Поэтому при наличии выводов ПБВ или РПН в середине высоты обмотки можно легко получить требуемые значения собственных частот для первой и третьей собственных частот.

Четные частоты, наоборот, имеют узел пространственного распределения напряжения в середине высоты обмотки, и потому из измерений в середине обмотки сложно получить искомые характеристики для четных собственных частот. Для наилучшего определения характеристик на четных собственных частотах нужен доступ к точкам обмотки на удалении 1/4 и 3/4 от начала обмотки или вывод последней катушки, которые, как правило, редко доступны для измерений на реальных трансформаторах. Альтернативой является использование доступных выводов ПБВ или РПН, максимально удаленных от середины высоты измеряемой обмотки трансформатора.

Практический пример. Проиллюстрируем описываемый подход на примере измерений силового трансформатора мощностью 630 кВ·А с ВН 35 кВ и НН 6 кВ обмоток. Схема и группа соединения обмоток – Ун/Д-11. Способ и диапазон регулирования напряжения – ПБВ, $\pm 2 \times 2,5$ %. Обмотка ВН трансформатора выполнена с литой изоляцией и имеет в средней части выводы для переключения ответвлений без возбуждения. Это делает возможным измерение передаточных функций и осциллографирование переходных напряжений в промежуточных точках обмотки, соответствующих электрической длине обмотки в диапазоне 0,45–0,55 (0,5 $\pm 2 \times 0,025$).

На рис. 1 приведены частотные характеристики фазы A обмотки ВН, измеренные по сквозной схеме

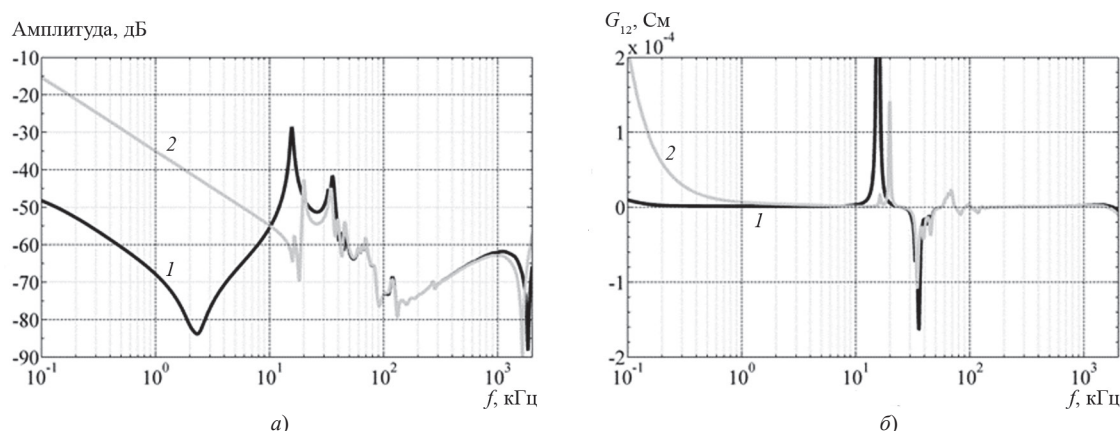


Рис. 1. Частотные характеристики (а) и активные проводимости (б) фазы А обмотки ВН при разомкнутой (1) и закороченной (2) обмотке НН

Fig. 1. Frequency responses (a) and active admittances (б) of HV winding (phase A) with open-circuited (1) and short-circuited (2) LV winding

согласно ГОСТ Р 59239 [35], и соответствующие им частотные зависимости активной проводимости G_{12} .

На рис. 1, б видно, что хорошее совпадение зависимостей G_{12} для разомкнутой и закороченной обмотки НН начинается на частотах свыше 30 кГц, что говорит о том, что именно в этом диапазоне лежат первые собственные частоты колебаний обмотки ВН [36].

По резонансным пикам активной проводимости G_{12} видно, что первая собственная частота колебаний обмотки ВН составляет около 35 кГц, вторая – около 65 кГц, а третья – около 85 кГц.

На рис. 2 приведены измеренные передаточные функции напряжения регулировочных выводов обмотки ВН. Для измерений использованы методика [25], прибор для измерений частотных характеристик обмоток Megger FRAX-101, активный пробник и высокочастотный осциллографический щуп с входной емкостью 8 пФ и входным сопротивлением 10 МОм. Измерения выполнены на отпайках обмотки ВН, соответствующих относительной электрической длине обмотки $x = 0,45, 0,5$ и $0,55$ от начала обмотки (на рис. 2 кривые 1, 2 и 3), в положении ПБВ, соответствующем максимальному числу витков этой обмотки.

На рис. 2 видно, что в средней точке обмотки (кривая 2) явно выражены первая и третья собственные частоты. При этом вторая собственная частота неразличима, поскольку, как отмечалось выше, в середине обмотки ($x = 0,5$) имеет место узел пространственного распределения напряжения на этой частоте. При этом в точках $x = 0,45$ и $0,55$ отчетливо проявились не только первая и третья, но также вторая и четвертая собственные частоты.

Также из рис. 2 видно, что на рассматриваемом сухом трансформаторе, имеющем дисковую обмотку ВН с литой изоляцией, наибольшие резонансные перенапряжения в средней части обмотки относительно земли достигаются на первой собственной частоте. Максимальные значения модуля передаточных функций напряжения в средней точке фаз А, В и С обмотки ВН составили 6,58, 5,76 и 6,24. По отношению к напряжению на частоте 50 Гц кратность резонансного повышения напряжения составила 13,2, 11,5 и 12,5 соответственно. Отличия между фазами связаны с взаимным влиянием фаз из-за межфазной емкостной связи и соединением вторичной обмотки в треугольник.

Поскольку локальные максимумы напряжения на второй собственной частоте достигаются в точках об-

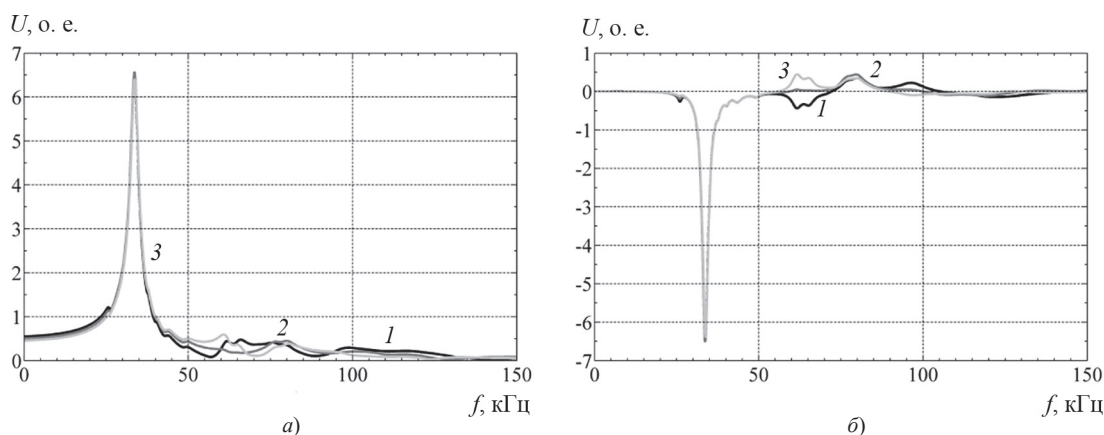


Рис. 2. Модуль (а) и реактивная составляющая (б) передаточной функции напряжения фазы А обмотки ВН

Fig. 2. Module (a) and reactive component (б) of voltage transfer function of HV winding (phase A)

мотки $x \approx 1/4$ и $3/4$, в рассматриваемом примере измерения на выводах ПБВ не позволили в явном виде оценить кратности резонансных повышений напряжения на второй собственной частоте. Однако такая оценка возможна на высокочастотной модели обмоток данного трансформатора, которая для этой цели должна быть верифицирована путем сравнения результатов расчетов и измерений напряжения в доступных точках обмотки.

В табл. 1 представлены результаты оценки первых собственных частот колебаний обмотки ВН, полученные аппроксимацией переходного напряжения в средней точке обмотки [22], по резонансным кривым активной составляющей тока нейтрали [24] и по реактивной составляющей передаточных функций напряжения на выводе ПБВ обмотки ВН, соответствующем относительной длине $x = 0,45$.

Из табл. 1 видно, что рассматриваемый подход на основе передаточных функций дает достаточно хорошее совпадение с результатами из аппроксимации переходного напряжения, которые априори являются более точными. Значения, полученные по методике [24]

из резонансной кривой активной составляющей тока нейтрали, имеют некоторые отличия, что связано с погрешностью из-за наложения близко расположенных резонансных частот.

В табл. 2 приведены результаты вычисления отношения постоянной времени затухания собственных колебаний τ к периоду собственных колебаний T для первых трех собственных частот колебаний обмотки ВН, полученные по вышеуказанным трем способам.

Из табл. 2 видно, что для первой собственной частоты получено достаточно точное совпадение значений τ/T , определенных из передаточных функций и аппроксимации переходных напряжений. На второй и третьей собственных частотах присутствует наложение близких резонансных частот как в передаточных функциях, так и в активной составляющей тока нейтрали, поэтому результаты оценки для этих частот имеют очень приближенный характер.

Выводы. Определение значений собственных частот и коэффициентов затухания колебаний обмоток силовых трансформаторов может быть выполнено измерением передаточных функций напряжений на до-

Таблица 1

Собственные частоты колебаний обмотки ВН
Natural frequencies of HV winding

Способ получения	Фаза обмотки ВН	Значения для собственных частот с номерами, кГц		
		1	2	3
Аппроксимации переходного напряжения [22] (по двум доминирующим частотам)	A	33,9	61,2	—
	B	31,1	—	—
	C	33,9	—	—
Оценка по резонансной кривой активной составляющей тока нейтрали [24]	A	35,6	68,9	82,9
	B	33,8	68,9	82,9
	C	35,6	68,9	82,9
Оценка по формуле (2) для реактивной составляющей передаточной функции напряжения в средней точке обмотки	A	33,7	61,6	79,9
	B	31,2	59,7	76,5
	C	33,8	61,8	80,5

Таблица 2

Значения τ/T
Values of τ/T

Способ получения	Фаза обмотки ВН	Значения для собственных частот с номерами, кГц		
		1	2	3
Аппроксимации переходного напряжения [22] (по двум доминирующим частотам)	A	4,82	3,89	—
	B	4,90	—	—
	C	4,82	—	—
Оценка по резонансной кривой активной составляющей тока нейтрали [24]	A	4,93	2,34	3,96
	B	5,11	5,76	5,44
	C	4,96	2,36	—
Оценка по формуле (2) для реактивной составляющей передаточной функции напряжения в средней точке обмотки	A	4,83	2,24	2,81
	B	4,84	5,33	4,67
	C	4,77	1,99	2,58

ступных внутренних точках обмоток, например на выводах ПБВ или РПН.

Оценка собственных частот колебаний может быть выполнена путем определения резонансных частот реактивной составляющей передаточных функций напряжения. Коэффициенты затухания собственных колебаний обмоток могут быть определены с помощью анализа реактивной составляющей передаточных функций напряжения в промежуточных точках обмотки путем вычисления ширины $\Delta\omega$ резонансных пиков и использования соотношения $\gamma \approx \Delta\omega / (2\sqrt{\sqrt{2}-1}) \approx \Delta\omega / 1,3$.

Корректность оценки коэффициентов затухания определяется тем, насколько явно выражены отдельные резонансные пики в передаточных функциях и насколько разнесены друг от друга собственные частоты колебаний обмотки. Поскольку при наложении резонансных пиков соседних собственных частот обмоток возможна некорректная оценка значений коэффициентов затухания, при использовании данного подхода следует оценивать степень достоверности получаемых результатов исходя из того, насколько выражены те или иные резонансные пики. Для повышения достоверности целесообразно сопоставлять между собой результаты оценки значений коэффициентов затухания по разным фазам исследуемой обмотки трансформатора и разным методам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CIGRE Brochure 577A. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 1: Expertise. Joint Working Group A2/C4.39, April 2014.
2. CIGRE Brochure 577B. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 2: Case Studies. Joint Working Group A2/C4.39, April 2014.
3. IEEE Std C57.142-2010 IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformers, Switching Device, and System Interaction. 27 April 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5759579. ISBN: 978-0-7381-6519-6.
4. Shipp D.D. et al. Transformer Failure Due to Circuit-Breaker-Induced Switching Transients. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, vol. 47, No. 2, pp. 707–718, DOI: 10.1109/TIA.2010.2101996.
5. Mardegan C.S. et al. The Experience Acquired Sizing Snubbers to Mitigate Switching Transients in Industrial Power Systems. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, vol. 52, No. 5, pp. 3644–3654, DOI: 10.1109/TIA.2016.2563392.
6. Florkowski M. et al. Overvoltage Impact on Internal Insulation Systems of Transformers in Electrical Networks with Vacuum Circuit Breakers. – Energies, 2020, vol. 13 (23), 6380, DOI: 10.3390/en13236380.
7. Yang Q. et al. Field Experiments on Overvoltage Caused by 12-kV Vacuum Circuit Breakers Switching Shunt Reactors. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, vol. 31, No. 2, pp. 657–664, DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2475397.
8. Sutherland P.E. Snubber Circuit Design for Transformers in an Urban High-Rise Office Building. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, vol. 51, No. 6, pp. 4347–4356, DOI: 10.1109/TIA.2015.2440357.
9. Sutherland P.E., Valdes M.E., Fox G.H. Snubber Design for Transformer Protection. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, vol. 52, No. 1, pp. 692–700, DOI: 10.1109/TIA.2015.2473137.
10. Buehler S.H. et al. Evaluation of a Unique Transient Hardened Transformer Designed to Withstand Primary Switching Transients: Simulation, Lab Tests and Analysis. – IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2019, DOI: 10.1109/ICPS.2019.8733377.
11. Popov M. et al. Experimental and Theoretical Analysis of Vacuum Circuit Breaker Prestrike Effect on a Transformer. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, vol. 24, No. 3, pp. 1266–1274, DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2013383.
12. Дмитриев М.В. Повреждения силовых трансформаторов при коммутациях кабелей 6–35 кВ. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2016, № 2 (35), с. 86–91.
13. Брилинский А.С., Евдокунин Г.А., Пономарёв Т.А. Исследование причин нарушения электрической прочности изоляции устройства РПН трансформатора с сухой изоляцией. – Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2018, № 1 (78), с. 130–141.
14. Брилинский А.С. и др. Исследование причин нарушения электрической прочности изоляции трансформатора с сухой изоляцией при замыканиях на землю. – Энергоэксперт, 2019, № 1, с. 28–33.
15. Ларин В.С., Матвеев Д.А., Максимов Б.К. Особенности высокочастотных резонансных перенапряжений в обмотках распределительных трансформаторов 6-35 кВ. – Энергетик, 2019, № 4, с. 12–16.
16. Serensen H.C., Hansen L.K., Larsen J.H.M. Middelgrunden 40 MW Offshore Wind Farm Denmark – Lessons Learned. – Realities of Offshore Wind Technologies, Case: Middelgrunden, Orkney, October 2002.
17. Larssen J. et al. Experiences from Middelgrunden 40 MW Offshore Wind Farm. – Copenhagen Offshore Wind, 26-28 October 2005, Copenhagen, Denmark.
18. Larsen J., Sagoo R.S. Replacement of Transformers on Middelgrunden Offshore Wind Farm. – European Offshore Wind 2009 Conference & Exhibition, 14-16 September 2009, Stockholm, Sweden.
19. King R. et al. Switching Transients in Offshore Wind Farms – Impact on the Offshore and Onshore Networks. – International Conference on Power Systems Transients, 2011.
20. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под. ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004, 616 с.
21. 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. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2847725.
22. 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.
23. Ларин В.С., Матвеев Д.А. Определение коэффициентов затухания по измеренным частотным характеристикам обмоток силовых трансформаторов. Ч. 1. Теоретическое рассмотрение. – Электричество, 2021, № 1, с. 13–22.
24. Ларин В.С., Матвеев Д.А. Определение коэффициентов затухания по измеренным частотным характеристикам обмоток силовых трансформаторов. Ч. 2. Анализ результатов измерений. – Электричество, 2021, № 2, с. 22–28.
25. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.3. Измерение напряжения в обмотках на резонансных частотах. – Электричество, 2016, № 1, с. 20–24.
26. Soloot A.H., Høidalen H.K., Gustavsen B. Influence of the Winding Design of Wind Turbine Transformers for Resonant Overvoltage Vulnerability. – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, vol. 22, No. 2, pp. 1250–1257, DOI: 10.1109/TDEI.2015.7076828.

27. Soloot A.H. Resonant Overvoltages in Offshore Wind Farms: Analysis, modeling and measurement. – Theses for PhD, Norwegian University of Science and Technology, 2017, DOI:10.13140/RG.2.2.28215.11682.

28. Мандельштам Л.И. Полное собрание трудов: т. 4. Л.: Изд-во АН СССР, 1955, 512 с.

29. Ларин В.С. К развитию теории резонансных процессов в обмотках силовых трансформаторов. Ч. 1. Частотные характеристики схемы с двумя П-звеньями. – Электричество, 2021, № 8, с. 49–55.

30. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975, 752 с.

31. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996, 638 с.

32. Демирчян К.С. и др. Теоретические основы электротехники: т. 1. СПб.: Питер, 2003, 463 с.

33. Бычков Ю.А. и др. Основы теоретической электротехники. СПб.: Лань, 2008, 592 с.

34. Nilsson J.W., Riedel S. Electric Circuits. Pearson, 2019, 816 p.

35. ГОСТ Р 59239–2020 (МЭК 60076-18:2012) Трансформаторы силовые и реакторы. Метод измерения частотных характеристик. М.: Стандартинформ, 2021, 50 с.

36. Ларин В.С., Волков А.Ю. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.2. Определение резонансных частот обмоток. – Электричество, 2015, № 12, с. 20–25.

Поступила в редакцию [09.07.2022]

Принята к публикации [17.11.2022]

Авторы:



Ларин Василий Серафимович – кандидат техн. наук, начальник отдела трансформаторов Всероссийского электротехнического института (ВЭИ) – филиала ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), Москва, Россия.



Зененко Антон Сергеевич – аспирант, инженер-испытатель отдела трансформаторов ВЭИ – филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Москва, Россия.



Рыдкин Максим Алексеевич – ведущий инженер-испытатель отдела трансформаторов ВЭИ – филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Москва, Россия.

Determination of Power Transformer Winding Natural Frequencies and Damping Factors from the Measured Voltage Transfer Functions

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.).

ZENENKO Anton S. (All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC – VNIITF named after academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia) – Postgraduate Student, Test Engineer of the Transformer Dept.

RYDKIN Maxim A. (All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC – VNIITF named after academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia) – Leading Test Engineer of the Transformer Dept.

The problem of damage inflicted to power transformers by high-frequency switching overvoltages occurring in 6–35 kV electric networks is solved by using protective RC circuits and detuning the windings natural frequencies from the frequencies of network voltage transient oscillations. To select the optimal parameters of protective RC circuits, simulation of transients in the cable network together with the transformer primary winding is required. To this end, it is necessary to have a reliable high-frequency model of the transformer. For verifying this model, measured values of natural frequencies and damping factors of free oscillations are required. To detune the transformer winding natural oscillation frequencies, their values have to be measured together with measuring the resonance overvoltage ratios in the transformer windings. Based on this information, the frequency ranges of network voltage transient oscillations that are dangerous for the transformer windings can be estimated. An approach to estimating the natural frequencies and damping factors based on measurements and analysis of voltage transfer functions at accessible intermediate points of power transformers windings is proposed. The article gives a practical example of estimating the natural

frequencies and damping factors of free oscillations in the high-voltage winding of a dry transformer using the proposed approach, as well as by approximating transient voltages and analyzing the power transformer primary winding frequency responses.

Key words: power transformers, resonant processes, windings, frequency response, transfer function, natural oscillations, natural frequency, damping factor

REFERENCES

1. **CIGRE Brochure 577A.** Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 1: Expertise. Joint Working Group A2/C4.39, April 2014.
2. **CIGRE Brochure 577B.** Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 2: Case Studies. Joint Working Group A2/C4.39, April 2014.
3. **IEEE Std C57.142-2010** IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformers, Switching Device, and System Interaction. 27 April 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5759579. ISBN: 978-0-7381-6519-6.
4. **Shipp D.D. et al.** Transformer Failure Due to Circuit-Breaker-Induced Switching Transients. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, vol. 47, No. 2, pp. 707–718, DOI: 10.1109/TIA.2010.2101996.
5. **Mardegan C.S. et al.** The Experience Acquired Sizing Snubbers to Mitigate Switching Transients in Industrial Power Systems. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, vol. 52, No. 5, pp. 3644–3654, DOI: 10.1109/TIA.2016.2563392.
6. **Florkowski M. et al.** Overvoltage Impact on Internal Insulation Systems of Transformers in Electrical Networks with Vacuum Circuit Breakers. – Energies, 2020, vol. 13 (23), 6380, DOI: 10.3390/en13236380.
7. **Yang Q. et al.** Field Experiments on Overvoltage Caused by 12-kV Vacuum Circuit Breakers Switching Shunt Reactors. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, vol. 31, No. 2, pp. 657–664, DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2475397.
8. **Sutherland P.E.** Snubber Circuit Design for Transformers in an Urban High-Rise Office Building. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, vol. 51, No. 6, pp. 4347–4356, DOI: 10.1109/TIA.2015.2440357.
9. **Sutherland P.E., Valdes M.E., Fox G.H.** Snubber Design for Transformer Protection. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, vol. 52, No. 1, pp. 692–700, DOI: 10.1109/TIA.2015.2473137.
10. **Buehler S.H. et al.** Evaluation of a Unique Transient Hardened Transformer Designed to Withstand Primary Switching Transients: Simulation, Lab Tests and Analysis. – IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2019, DOI: 10.1109/ICPS.2019.8733377.
11. **Popov M. et al.** Experimental and Theoretical Analysis of Vacuum Circuit Breaker Prestrike Effect on a Transformer. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, vol. 24, No. 3, pp. 1266–1274, DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2013383.
12. **Dmitriev M.V.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electricity. Transmission and Distribution)*, 2016, No. 2 (35), pp. 86–91.
13. **Brilinskiy A.S., Evdokunin G.A., Ponomaryov T.A.** *Izvestiya NTTS Edinoy energeticheskoy sistemy – in Russ. (News of the STC of the Unified Energy System)*, 2018, No. 1 (78), pp. 130–141.
14. **Brilinskiy A.S. et al.** *Energoekspert – in Russ. (Energoexpert)*, 2019, No. 1, pp. 28–33.
15. **Larin V.S., Matveev D.A., Maksimov B.K.** *Energetik – in Russ. (Power Engineer)*, 2019, No. 4, pp. 12–16.
16. **Serensen H.C., Hansen L.K., Larsen J.H.M.** Middelgrunden 40 MW Offshore Wind Farm Denmark – Lessons Learned. – Realities of Offshore Wind Technologies, Case: Middelgrunden, Orkney, October 2002.
17. **Larssen J. et al.** Experiences from Middelgrunden 40 MW Offshore Wind Farm. – Copenhagen Offshore Wind, 26–28 October 2005, Copenhagen, Denmark.
18. **Larsen J., Sagoo R.S.** Replacement of Transformers on Middelgrunden Offshore Wind Farm. – European Offshore Wind 2009 Conference & Exhibition, 14–16 September 2009, Stockholm, Sweden.
19. **King R. et al.** Switching Transients in Offshore Wind Farms – Impact on the Offshore and Onshore Networks. – International Conference on Power Systems Transients, 2011.
20. **Silovye transformatory. Spravochnaya kniga** (Power Transformers. Reference Book) / Under ed. S.D. Lizunov, A.K. Lokhanin. M.: Energoizdat, 2004, 616 p.
21. **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, DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2847725.
22. **Larin V.S., Matveev D.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 12, pp. 44–54.
23. **Larin V.S., Matveev D.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 1, pp. 13–22.
24. **Larin V.S., Matveev D.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 2, pp. 22–28.
25. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 1, pp. 20–24.
26. **Soloot A.H., Hoidalén H.K., Gustavsen B.** Influence of the Winding Design of Wind Turbine Transformers for Resonant Overvoltage Vulnerability. – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, vol. 22, No. 2, pp. 1250–1257, DOI: 10.1109/TDEI.2015.7076828.
27. **Soloot A.H.** Resonant Overvoltages in Offshore Wind Farms: Analysis, modeling and measurement. – Theses for PhD, Norwegian University of Science and Technology, 2017, DOI:10.13140/RG.2.2.28215.11682.
28. **Mandel'shtam L.I.** *Polnoe sobranie trudov* (The Complete Works): vol. 4. L.: Izd-vo AN SSSR, 1955, 512 p.
29. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 8, pp. 49–55.
30. **Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V.** *Osnovy teorii tsepey* (Fundamentals of Circuit Theory). M.: Energiya, 1975, 752 p.
31. **Bessonov L.A.** *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits). M.: Vysshaya shkola, 1996, 638 p.
32. **Demirchyan K.S. et al.** *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering): vol. 1. SPb.: Piter, 2003, 463 p.
33. **Bychkov Yu.A. et al.** *Osnovy teoreticheskoy elektrotehniki* (Fundamentals of Theoretical Electrical Engineering). SPb.: Lan', 2008, 592 p.
34. **Nilsson J.W., Riedel S.** *Electric Circuits*. Pearson, 2019, 816 p.
35. **GOST R 59239–2020** (IEC 60076-18:2012) *Transformatory silovye i reaktory. Metod izmereniya chastotnykh harakteristik* (Power Transformers and Reactors. Method for Frequency Response Measurement). M.: Standartinform, 2021, 50 p.
36. **Larin V.S., Volkov A.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 12, pp. 20–25.

Received [09.07.2022]

Accepted [17.11.2022]