

Аппроксимация переходных резонансных напряжений и токов в обмотках силовых трансформаторов для определения собственных частот колебаний и коэффициентов затухания

ЛАРИН В.С.,

ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия;

МАТВЕЕВ Д.А.

НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Переходное взаимодействие между силовыми трансформаторами и питающими кабельными линиями может привести к возникновению резонансных перенапряжений в первичных обмотках трансформаторов. Для разработки мер защиты от резонансных перенапряжений и проектирования трансформаторов, устойчивых к резонансным перенапряжениям, необходимо знать собственные частоты обмоток трансформатора. В последние годы все более широкое применение в проектной практике находят высокочастотные модели обмоток трансформаторов. Однако математические модели, пришедшие из расчетов импульсных перенапряжений в обмотках, недостаточно точно воспроизводят частотные зависимости потерь и затухания на собственных частотах. Для верификации и совершенствования математического аппарата, используемого для моделирования высокочастотных процессов в обмотках трансформаторов, необходимо иметь достаточные экспериментальные данные о значениях собственных частот и коэффициентов затухания. Рассмотрены методы экспериментального определения значений собственных частот и коэффициентов затухания обмоток силовых трансформаторов. Приведены теоретические сведения и аналитические выражения для переходных напряжений и токов, полученные для упрощенных схем замещения обмоток с сосредоточенными параметрами. Предложен подход, основанный на разделении переходных напряжений и токов в обмотке на установившуюся и свободную составляющие и последующей аппроксимацией свободной составляющей с использованием теоретических выражений, полученных для схем замещения обмоток. Приведены результаты применения подхода к аппроксимации переходного напряжения в средней точке и тока в нейтрали обмотки высшего напряжения сухого трансформатора.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, резонансные перенапряжения, обмотки, переходные процессы, свободные колебания, собственные частоты, коэффициент затухания

В последнее время в связи с расширением применения кабельных линий все чаще отмечаются случаи повреждения первичных обмоток подключенных к этим линиям силовых трансформаторов, вызванных высокочастотными резонансными перенапряжениями внутри обмоток [1–9].

Обмотки силовых трансформаторов представляют собой сложные колебательные контуры, собственные частоты которых составляют от единиц до сотен кГц, и при совпадении частоты колебаний напряжения на входных зажимах с одной из собственных частот колебаний обмоток в них возможно развитие резонансных перенапряжений. Эти перенапряжения не могут быть сдержаны установкой нелинейных ограничителей на входных зажимах трансформатора и при неблагоприятных условиях могут представлять реальную угрозу для внутренней изоляции трансформатора. Можно выделить две группы трансформаторов, характеризующиеся частыми воздействиями высокочастотных напря-

жений и связанным с этим высоким риском повреждений от резонансных перенапряжений — это распределительные трансформаторы 6–35 кВ (в особенности, сухие трансформаторы [3]) и генераторные трансформаторы до 500 кВ включительно, коммутируемые совместно с кабельными линиями.

В [10] были затронуты ключевые вопросы, связанные с оценкой возможности развития и степени опасности резонансных напряжений в обмотках трансформаторов, рассмотрены влияние типа обмотки трансформатора и подходы к оценке воздействий на внутреннюю изоляцию обмоток трансформаторов в условиях резонансных перенапряжений.

Одним из решений проблемы резонансных перенапряжений является отстройка частоты переходных высокочастотных колебаний напряжения в сети от собственных частот колебаний обмоток трансформаторов, связанных с этой сетью. Для

практической реализации такого решения необходимо, чтобы разработчики трансформаторного оборудования предоставили проектировщикам электрических сетей информацию о значениях собственной частоты колебаний обмоток силовых трансформаторов. Для этого необходимо, чтобы в арсенале завода-изготовителя имелись соответствующие методы расчетного и экспериментального определения значений собственной частоты колебаний обмоток трансформаторов [11].

Другим решением проблемы является координация внутренней изоляции обмоток трансформаторов с эксплуатационными воздействиями, для чего необходимо наличие в арсенале завода-изготовителя высокочастотных математических моделей трансформаторов, обеспечивающих на стадии проектирования приемлемую точность оценки воздействий на внутреннюю изоляцию обмоток в условиях резонансов. Степень достоверности численного моделирования резонансных процессов в обмотках определяется тем, насколько точно модель воспроизводит собственные частоты и затухания свободных колебаний в обмотках.

В последнее время высокочастотные модели обмоток трансформаторов получили бурное развитие, в том числе благодаря работе международной рабочей группы A2.52 Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ), ведущей свою работу с 2015 г. К сожалению, применяемые на практике математические модели, пришедшие из расчетов импульсных перенапряжений в обмотках силовых трансформаторов, недостаточно точно воспроизводят частотные зависимости потерь и затуханий на собственных частотах, поскольку для расчета импульсных перенапряжений их неточный учет не является критичным. Для верификации и совершенствования математического аппарата, используемого для моделирования высокочастотных процессов в обмотках трансформаторов, необходимо иметь достаточные экспериментальные данные о значениях собственных частот и коэффициентов затухания.

Приближенные значения собственной частоты колебаний обмоток могут быть найдены экспериментально [11] при измерении:

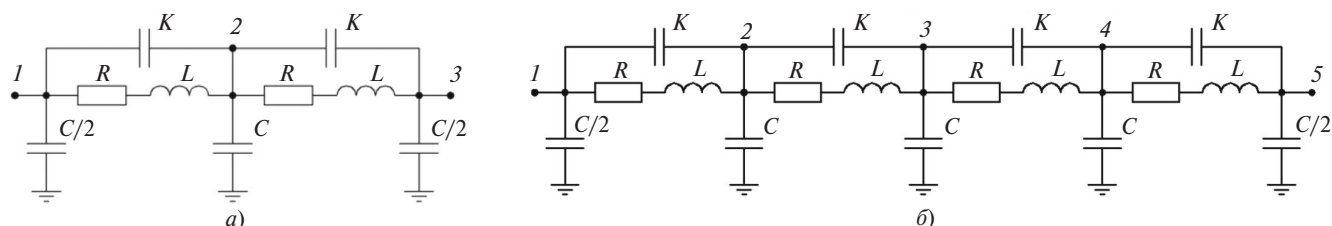


Рис. 1. Упрощенные схемы замещения $2 \times RLC$ (а) и $4 \times RLC$ (б)

передаточных характеристик напряжений внутренних узлов и значений частоты, соответствующих локальным максимумам напряжения;

частотной зависимости входной проводимости обмотки и значений частоты, соответствующих локальным максимумам активной составляющей входной проводимости (требуется применение векторных частотных анализаторов, что не всегда доступно на практике);

частотной характеристики по методу частотных характеристик (МЧХ); в зарубежной терминологии Frequency Response Analysis (FRA) [12] с последующим вычислением проводимости обмотки и определением значений частоты, соответствующих локальным максимумам ее активной составляющей [11].

Следует отметить, что в последнее время МЧХ находит все большее применение для диагностирования состояния трансформаторов. Измерения частотных характеристик проводят как в условиях завода-изготовителя, так и в эксплуатации. Таким образом, значения собственной частоты могут быть получены как побочный продукт диагностических измерений, выполняемых для оценки состояния обмоток силовых трансформаторов. Вместе с тем, данный способ по сути своей является приближенным, не пригодным для прецизионной оценки собственных частот колебаний, что является его недостатком.

В статье представлен подход к оценке значений собственной частоты и коэффициентов затухания на основе аппроксимации переходных напряжений и токов в обмотках трансформаторов, который является дальнейшим развитием подхода к аппроксимации переходных напряжений [11].

Теоретические сведения. Рассмотрим основные соотношения при резонансе для упрощенных схем замещения обмотки трансформатора (рис. 1), содержащих два и четыре расчетных элемента (Π-звена) с сосредоточенными параметрами (далее – схемы $2 \times RLC$ и $4 \times RLC$ соответственно). На рис. 1: $C = C_r / N$ – емкость расчетного элемента на землю; C_r – полная емкость обмотки на землю; N – число расчетных элементов; $K = K_r N$ – продольная емкость элемента; K_r – полная продольная емкость

обмотки; $L = L_r / N$ и $R = R_r / N$ – индуктивность и активное сопротивление расчетного элемента; L_r и R_r – полные индуктивность и активное сопротивление. Для упрощения в рассматриваемой схеме замещения исключены из рассмотрения взаимные индуктивности расчетных элементов.

Рассмотрим относительно простую схему замещения $2 \times RLC$. При нахождении выражения для переходного напряжения U_2 в средней точке этой схемы воспользуемся операторным методом. Для случая включения схемы на источник единичного синусоидального напряжения выражение для напряжения U_2 в операторной форме может быть записано в виде:

$$U_2(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{p^2 LK + pRK + 1}{p^2 L(C + 2K) + pR(C + 2K) + 2}. \quad (1)$$

Знаменатель выражения (1) имеет четыре корня:

$$p_{1,2} = \pm j\omega; \\ p_{3,4} = -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{2}{L(C+2K)} - \frac{R^2}{4L^2}} = -\gamma_1 \pm \omega_1,$$

где γ_1 – коэффициент затухания; ω_1 – собственная частота колебаний.

Выражение для напряжения в узле 2 во временной области может быть получено с использованием теоремы разложения:

$$u_2(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t} = A_1 e^{j\omega t} + A_2 e^{-j\omega t} + \\ + A_3 e^{j\omega_1 t} e^{-\gamma_1 t} + A_4 e^{-j\omega_1 t} e^{-\gamma_1 t} = \\ = A_1 (\cos \omega t + j \sin \omega t) + A_2 (\cos \omega t - j \sin \omega t) + \\ + A_3 (\cos \omega_1 t + j \sin \omega_1 t) e^{-\gamma_1 t} + A_4 (\cos \omega_1 t - j \sin \omega_1 t) e^{-\gamma_1 t}.$$

Это выражение может быть записано в виде:

$$u_2(t) = B_1 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t + (B_3 \sin \omega_1 t + \\ + B_4 \cos \omega_1 t) e^{-\gamma_1 t}, \quad (2)$$

где $B_1 = j(A_1 - A_2)$ и $B_2 = A_1 + A_2$ – амплитуды вынужденных колебаний; $B_3 = j(A_3 - A_4)$ и $B_4 = A_3 + A_4$ – амплитуды свободных колебаний с частотой, равной собственной частоте колебаний схемы.

Выходной ток схемы $2 \times RLC$ при заземлении узла 3 можно выразить как

$$I_N(p) = \frac{U_2(p)}{Z} = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \times$$

$$\times \frac{(p^2 LK + pRK + 1)^2}{(p^2 LC_{\Sigma} + pRC_{\Sigma} + 2)(R + pL)}. \quad (3)$$

Из выражений (1) и (3) видно, что знаменатель выражения тока нейтрали содержит те же корни, что и знаменатель напряжения в средней точке рассматриваемой схемы замещения. Кроме того, знаменатель выражения тока I_N имеет дополнительный множитель $(R + pL)$, который дает дополнительный корень: $p_0 = -R/L = -2\gamma_1$.

Выражение для тока в нейтрали во временной области может быть получено с использованием теоремы разложения и представлено в виде:

$$i_N(t) = D_1 \sin \omega t + D_2 \cos \omega t + \\ + (D_3 \sin \omega_1 t + D_4 \cos \omega_1 t) e^{-\gamma_1 t} + D_0 e^{-2\gamma_1 t}. \quad (4)$$

Рассмотрим переходные процессы в более сложной схеме замещения, состоящей из четырех П-звеньев ($4 \times RLC$). Эта схема имеет три независимых узла и, соответственно, три собственных частоты колебаний.

Выражения для напряжений в узлах 2–4 при заземлении узла 5 в операторной форме могут быть записаны в виде:

$$U_2(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(Z/Z_0 + 3)(Z/Z_0 + 1)}{(Z/Z_0 + 4)(Z/Z_0 + 1)^2 + Z/Z_0};$$

$$U_3(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{Z/Z_0 + 2}{(Z/Z_0 + 4)(Z/Z_0 + 1)^2 + Z/Z_0};$$

$$U_4(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{1}{(Z/Z_0 + 4)(Z/Z_0 + 1)^2 + Z/Z_0},$$

$$\text{где } Z_0 = \frac{1}{pC}; \quad Z = \frac{(R + pL) \frac{1}{pK}}{R + pL + \frac{1}{pK}}.$$

Ток на выходе рассматриваемой схемы (ток в нейтрали) при заземлении узла 5 можно выразить:

$$I_N(p) = \frac{U_4(p)}{Z} = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \times \\ \times \frac{1}{[(Z/Z_0 + 4)(Z/Z_0 + 1)^2 + Z/Z_0]Z}.$$

С помощью подстановки $\frac{Z}{Z_0} = \frac{pC(R + pL)}{1 + pK(R + pL)}$ получим выражения для напряжения U_4 и тока нейтрали I_N :

$$U_4(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(pK(R+pL)+1)^3}{F_3(p)}; \quad (5)$$

$$I_N(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(pK(R+pL)+1)^4}{F_3(p)(R+pL)}. \quad (6)$$

Выражения для напряжений в узлах 2 и 3 могут быть получены аналогичным образом. Выражение $F_3(p)$ в знаменателе выражений (5) и (6) в операторной форме имеет вид:

$$F_3(p) = (p(K+C)(R+pL)+1)^2 (p(4K+C)(R+pL)+4) + pC(R+pL)(pK(R+pL)+1)^2.$$

В общем случае корнями этого многочлена шестого порядка являются три пары комплексно сопряженных чисел, которые можно представить в виде $p_{(2i-1)(2i)} = -\gamma_i \pm j\omega_i$. Тогда корни знаменателя напряжения U_4 можно представить в виде набора значений: $p_{1,2} = \pm j\omega$; $p_{(2i+1)(2i+2)} = -\gamma_i \pm j\omega_i$.

С использованием теоремы разложения выражения для напряжения $u_4(t)$ и тока в нейтрали $I_N(t)$ во временной области могут быть представлены в виде:

$$u_4(t) = B_1 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t + \sum_{j=1}^3 (B_{2j+1} \sin \omega_i t + B_{2j+2} \cos \omega_i t) e^{-\gamma_j t}; \quad (7)$$

$$I_N(t) = D_1 \sin \omega t + D_2 \cos \omega t + \sum_{j=1}^3 (D_{2j+1} \sin \omega_i t + D_{2j+2} \cos \omega_i t) e^{-\gamma_j t} + D_0 e^{-2\gamma_0 t}. \quad (8)$$

Из выражений (2) и (7) следует важный практический вывод о возможности определения значений собственной частоты колебаний и постоянных затухания из свободной составляющей напряжений внутренних точек обмоток.

Для развития колебаний в обмотке на некоторой собственной частоте необходимо, чтобы частота источника была сопоставима с ней. В свободных колебаниях участвует набор собственных частот, которых у обмотки трансформатора может быть достаточно много. Из аналитического решения переходного процесса для схемы замещения $2 \times RLC$ можно показать, что амплитуда свободных колебаний сильно зависит от частоты вынужденных колебаний (в связи с ограничениями по объему статьи соответствующие формулы и расчетные зависимости не приводятся).

Для схемы $4 \times RLC$ ввиду высокого порядка многочленов в числителе и знаменателе уравнений (5)

и (6) выражения для коэффициентов B_k и D_k получаются достаточно громоздкими, а их непосредственный вывод в значительной степени трудоемок. Вместо непосредственного вывода выражений для коэффициентов B_k и D_k для практических целей можно воспользоваться их вычислением с использованием теоремы разложения и вышеприведенных формул. На рис. 2 приведен пример расчетных зависимостей коэффициентов B_k ($k=3..8$), полученных при $N=4$, $R_r=200$ Ом, $L_r=40$ мГн, $K_r=1$ нФ и $C_r=25$ нФ ($\alpha=5$). Серыми пунктирными вертикальными линиями 4 отмечены собственные частоты колебаний схемы.

Из рис. 2 видно, что на резонансных частотах, примерно равных собственным частотам колебаний, достигают максимальных значений четные коэффициенты B_k (множители при \cos). При частоте источника, примерно равной первой собственной частоте, амплитуды свободных колебаний высших гармоник много меньше соответствующих амплитуд на первой собственной частоте. Напротив, при частоте источника, близкой ко второй и третьей собственным частотам, амплитуды свободных колебаний на первой собственной частоте могут быть сопоставимы с амплитудами на второй и третьей частотах. Можно показать, что для тока нейтрали будет иметь место схожая картина, за тем

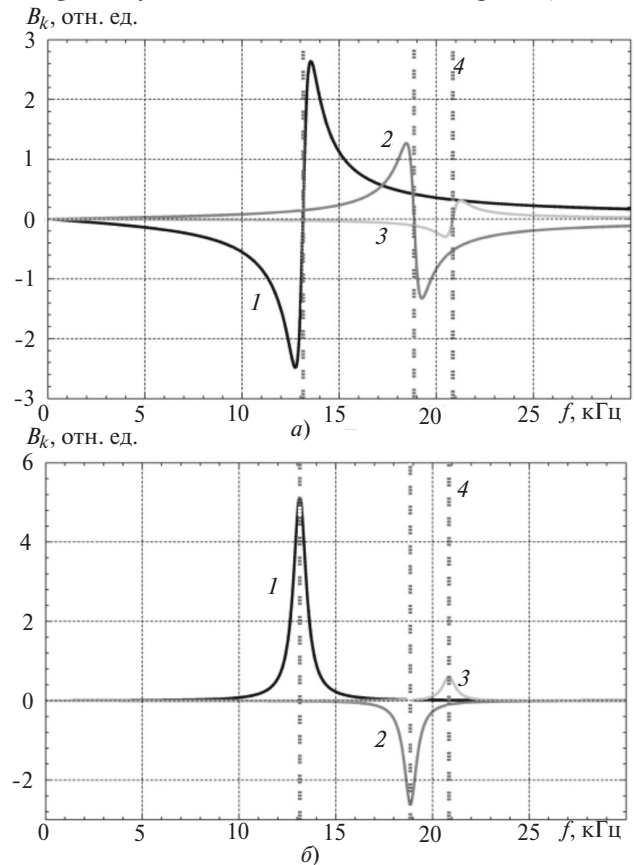


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов B_k : а – B_3 (1), B_5 (2) и B_7 (3); б – B_4 (1), B_6 (2) и B_8 (3)

исключением, что максимальных значений достигают нечетные коэффициенты D_k (множители при \sin).

Отдельно следует отметить, что знаменатель выражения для тока нейтрали (6) для схемы замещения $4 \times RLC$ содержит те же корни, что и знаменатели выражений напряжений на внутренних узлах схемы (5), аналогично формулам (1) и (3). Можно показать, что это справедливо для любой степени дискретизации рассматриваемой схемы замещения. В общем виде для схемы $N \times RLC$ при $N \rightarrow \infty$ выражения для напряжения на крайнем расчетном элементе и токе в нейтрали могут быть представлены:

$$U_N(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \rightarrow I_N(p) = \frac{U_N(p)}{Z(p)} = \frac{F_1(p)(1+pK(R+pL))}{F_2(p)(R+pL)}$$

Из этого следует важный практический вывод о возможности получения значений собственных частот колебаний и постоянных затухания из свободной составляющей тока в нейтрали.

Аппроксимация переходного напряжения в обмотках силовых трансформаторов. При наличии доступа к внутренним точкам обмотки силового трансформатора может быть выполнено осциллографирование переходных напряжений в обмотке при ее включении на источник незатухающего синусоидального напряжения интересующей частоты.

На основе представления переходного напряжения в обмотке в виде принужденной и свободной составляющих измеренное переходное напряжение может быть аппроксимировано с использованием выражения (7). В общем случае, в зависимости от частоты источника в свободных колебаниях может участвовать несколько собственных частот. При этом для практических целей удобно ограничить рассмотрение двумя собственными частотами с наибольшими амплитудами, вносящими определяющий вклад в переходное напряжение.

Аппроксимация переходного напряжения $u(t)$ в обмотке может быть выполнена с помощью следующей последовательности действий.

1. Определение частот вынужденных колебаний f_0 и соответствующих амплитуд B_1 и B_2 по той части осциллограммы, которая соответствует установившемуся напряжению. Эта задача может быть решена путем нахождения частоты напряжения источника, амплитуды установившегося напряжения в обмотке и фазового угла между напряжением в обмотке и напряжением источника. Альтернативно задача может быть решена с помощью метода наименьших квадратов (МНК) путем нахождения зна-

чений параметров f_0 , B_1 и B_2 , которые дают наиболее точную аппроксимацию установившегося напряжения. Использование второго подхода представляется более предпочтительным из-за меньшей чувствительности результатов к влиянию высокочастотных помех, наложенных на полезный сигнал.

2. Вычисление аппроксимации установившегося напряжения с использованием полученных значений f_0 , B_1 и B_2 для всего диапазона времени регистрации переходного напряжения t :

$$u_{уст}(t) = B_1 \sin(2\pi f_0 t) + B_2 \cos(2\pi f_0 t).$$

3. Вычисление свободной составляющей напряжения:

$$u_{своб}(t) = u(t) - u_{уст}(t).$$

4. Разложение в спектр свободной составляющей напряжения $u_{своб}(t)$ с использованием быстрого преобразования Фурье и определение доминирующих собственных частот по локальным максимумам частотного спектра.

5. Нахождение с использованием МНК значений параметров f_1 , f_2 , B_3 , B_4 , B_5 , B_6 , γ_1 и γ_2 , обеспечивающих наилучшую аппроксимацию свободной составляющей выражением вида:

$$u_{своб}(t) = (B_3 \sin \omega_1 t + B_4 \cos \omega_1 t) e^{-\gamma_1 t} + (B_5 \sin \omega_2 t + B_6 \cos \omega_2 t) e^{-\gamma_2 t},$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$ и $\omega_2 = 2\pi f_2$. В качестве начальных приближений f_1 и f_2 могут быть использованы собственные частоты с наибольшими амплитудами в спектре свободной составляющей напряжения.

Таким образом, из разложения в спектр свободной составляющей переходного напряжения могут быть получены наиболее явно выраженные собственные частоты, которые затем могут быть уточнены путем аппроксимации свободной составляющей во временной области. Амплитуды спектра свободной составляющей для отдельных собственных частот будут выражены более или менее явно в зависимости от того, насколько частота источника близка к той или иной собственной частоте (рис. 2). С учетом этого для регистрации переходных процессов целесообразно выбрать несколько значений частоты источника, примерно равных предполагаемым значениям собственных частот, а также их промежуточным значениям.

На рис. 3 приведен пример осциллограмм напряжения в средней точке фазы B обмотки высшего напряжения (ВН) сухого трансформатора мощностью 1600 кВ·А класса напряжения 10 кВ [13]

при частотах источника 186 и 214 кГц, а также результатов аппроксимации по вышеприведенному алгоритму. На рис. 3, *д* и *е* приведены спектры свободной составляющей напряжения (показаны черным) и спектр напряжения источника (серым).

Частоты 186 и 214 кГц примерно равны первой и третьей собственным частотам колебаний обмотки ВН. Переходные напряжения приведены в относительных единицах, за базисное принято амплитудное значение напряжения источника (5 В).

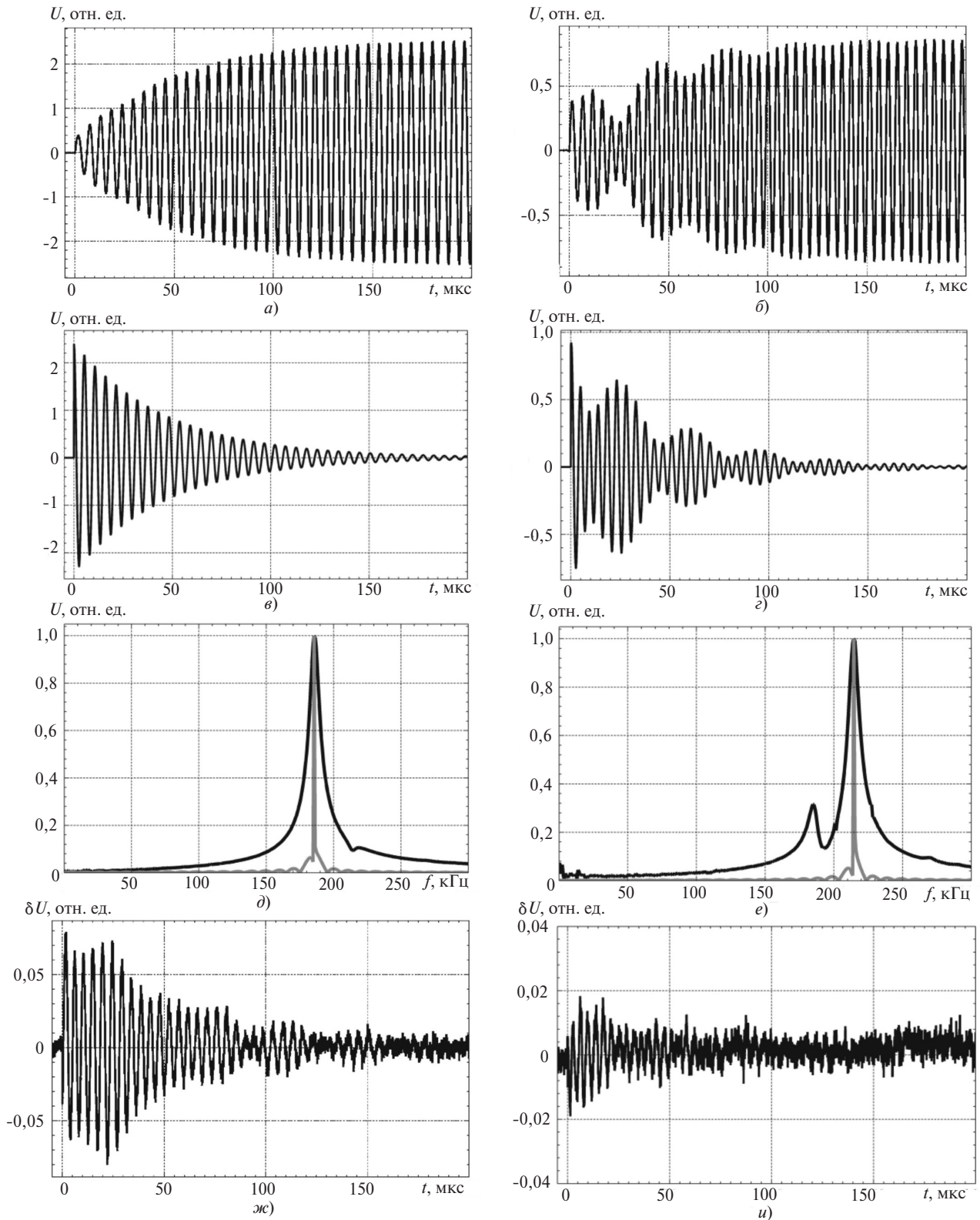


Рис. 3. Переходное напряжение (*а*, *б*), аппроксимация (*в*, *г*), частотный спектр (*д*, *е*) и абсолютная погрешность аппроксимации (*ж*, *и*) свободной составляющей напряжения при частоте источника 186 кГц (*а*, *в*, *д*, *ж*) и 214 кГц (*б*, *г*, *е*, *и*)

В рассматриваемом примере аппроксимация свободной составляющей переходного напряжения выполнена с использованием двух частот (f_1 и f_2). Из рис. 3 видно, что в рассмотренных случаях, где

свободная составляющая напряжения содержит одну и две наиболее выраженные собственные частоты, погрешность аппроксимации не превышает 5%. Очевидно, что при наличии в спектре сво-

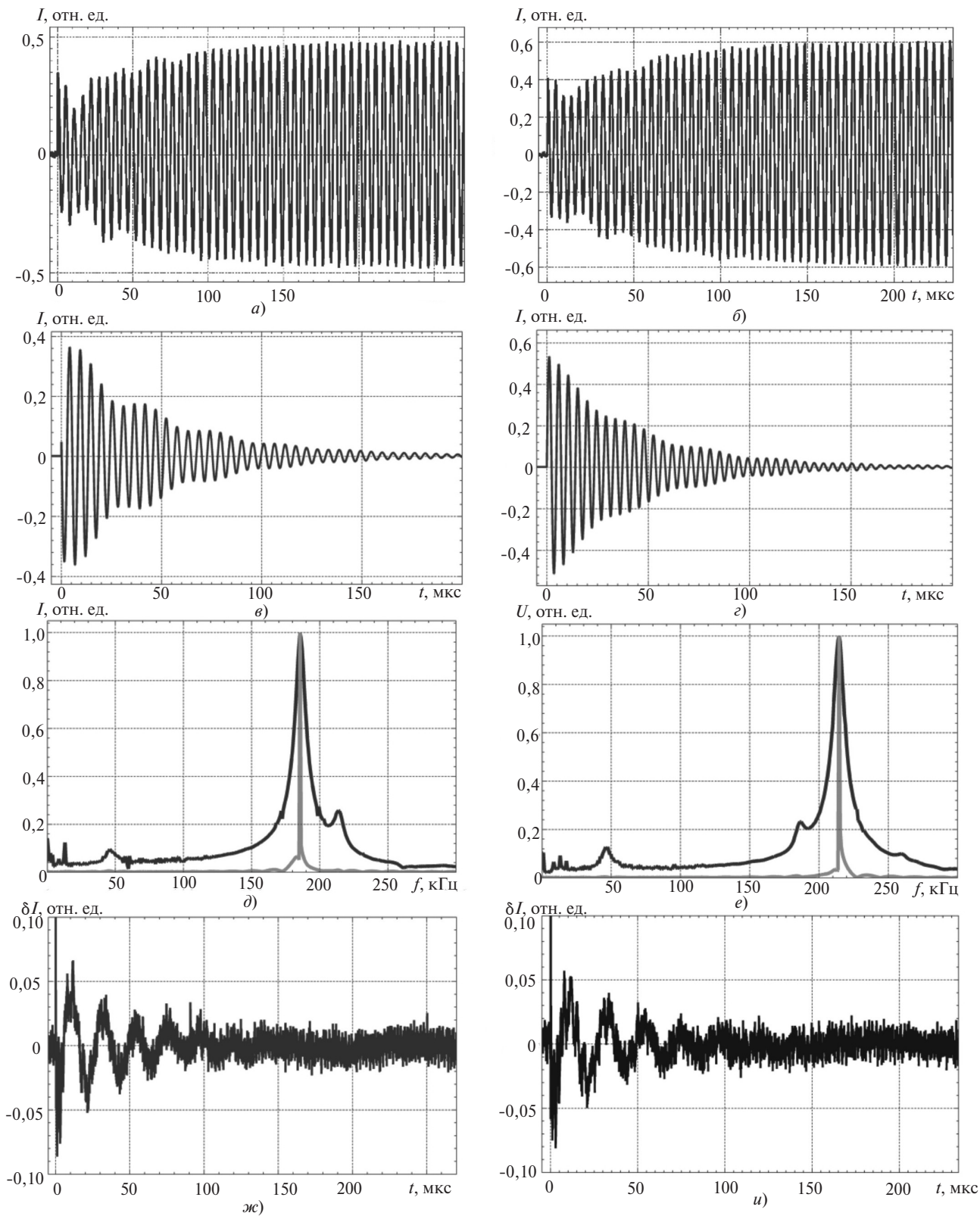


Рис. 4. Переходный ток в нейтрали (а, б), аппроксимация (в, з), частотный спектр (д, е) и абсолютная погрешность аппроксимации (ж, и) свободной составляющей тока на частотах 186 кГц (а, в, д, ж) и 214 кГц (б, з, е, и)

бодной составляющей большего количества равнозначных по амплитуде собственных частот возможна большая погрешность, связанная с учетом отдельных собственных частот. В таком случае можно прибегнуть к аппроксимации свободной составляющей более чем двумя собственными частотами.

Работа приведенного выше алгоритма основана на выделении установившейся составляющей напряжения. Для этой цели длительность регистрации переходного напряжения должна быть достаточной для выхода напряжения на установившийся уровень. Необходимое время регистрации переходного процесса можно оценить, используя характерные значения постоянных затухания колебаний в обмотках. Для обмоток силовых трансформаторов отношение коэффициента затухания γ_i к собственной круговой частоте ω_i обычно составляет $\gamma_i / \omega_i = 0,012 \div 0,032$ [14–16], чему соответствует отношение постоянной затухания τ_i к периоду собственных колебаний T_i около $5 \div 14$. Тогда с определенным запасом время регистрации может быть выбрано не менее $50 \div 100$ периодов первой собственной частоты (или его предполагаемого значения).

Следует отметить, что на практике внутренние точки обмотки не всегда доступны для измерений. Такой доступ возможен в случае проведения импульсного обмера в заводских условиях, который обычно выполняют применительно к мощным силовым трансформаторам новых серий. Также на практике возможны измерения на выводах обмоток, подключенных к переключающим устройствам типа ПБВ и РПН, в особенности сухих трансформаторов [10].

Аппроксимация переходного тока в нейтрали обмоток силовых трансформаторов. Поскольку не всегда возможно выполнить регистрацию переходного напряжения внутри обмоток трансформаторов, особый интерес представляют альтернативные способы определения собственных частот и коэффициентов затухания.

Выше было показано, что переходный ток в нейтрали содержит свободную составляющую с теми же собственными частотами, что и напряжения на внутренних узлах схемы замещения обмотки, а также аperiodическую составляющую.

С учетом этого для аппроксимации тока в нейтрали и нахождения искомых величин может быть использован приведенный выше алгоритм. При этом следует внести уточнение в формулу для аппроксимации свободной составляющей, добавив в нее аperiodическую составляющую:

$$u_{\text{своб}}(t) = (D_3 \sin \omega_1 t + D_4 \cos \omega_1 t) e^{-\gamma_1 t} +$$

$$+(D_5 \sin \omega_2 t + D_6 \cos \omega_2 t) e^{-\gamma_2 t} + D_0 e^{-2\gamma_0 t}.$$

Для регистрации тока в нейтрали обмоток может быть использован токовый шунт в виде согласующего сопротивления 50 Ом. При измерениях следует иметь в виду, что значение тока в нейтрали обмоток на высоких частотах при напряжении питания 5–10 В составляет порядка единиц мА, а потому результаты измерений тока в нейтрали силовых трансформаторов подвержены влиянию помех в большей степени, чем результаты измерений переходных напряжений в обмотках.

На рис. 4 приведены осциллограммы тока в нейтрали обмотки ВН указанного выше трансформатора при частотах источника 186 и 214 кГц и результаты обработки осциллограмм. На рис. 4, д и е приведены спектры свободной составляющей тока (показаны черным) и результирующего тока в нейтрали (серым). Переходные токи приведены в относительных единицах, за базисное значение принято значение 5 мА, отнесенное к амплитудному напряжению источника 5 В.

На рис. 4 видно, что ток нейтрали содержит составляющую с частотой около 45 кГц. Эта частота соответствует частоте колебаний между обмотками низшего и высшего напряжения (НН и ВН соответственно). Важно отметить, что колебания с этой частотой не выражены в спектре свободной составляющей напряжения в средней точке обмотки ВН. Неучет колебательной составляющей этой частоты при аппроксимации тока привел к погрешности порядка 10–20%. Однако для оценки частот и коэффициентов затухания собственных колебаний исследуемой обмотки учет составляющей межобмоточных колебаний не имеет большого значения.

Также из рис. 4, ж и и видно, что в токе нейтрали также присутствует высокочастотный шум, что связано с тем, что измеряемый ток в рассматриваемых примерах был сравнительно мал – не более $0,6 \cdot 5 = 3$ мА.

Полученные значения собственных частот и коэффициентов затухания приведены в таблице, где также приведены значения собственных частот, полученные из частотных характеристик обмотки ВН по методике [11].

Параметры	Значения для собственных частот с номерами	
	1	3
Значение собственной частоты, кГц: из аппроксимации переходного напряжения из аппроксимации тока в нейтрали из активной проводимости [11]	185,8	214,4
	186,1	214,9
	186,7	214,3

Коэффициенты затухания, 1/мс: из аппроксимации переходного напряжения из аппроксимации тока в нейтрали	21,48	23,08
	21,10	23,89
Отношение τ/T : из аппроксимации переходного напряжения из аппроксимации тока в нейтрали	8,65	9,29
	8,80	8,97

Из таблицы видно, что значения собственных частот, полученные из аппроксимации тока в нейтрали, хорошо согласуются со значениями, полученными из аппроксимации переходного напряжения в обмотке ВН. Последние могут быть приняты в качестве достаточно точных значений ввиду более низкого уровня шума и высокой точности аппроксимации измеренных осциллограмм. Значения собственных частот, полученные из активной проводимости обмотки ВН по методике приближенной оценки [11] также хорошо совпали с полученными из аппроксимаций значениями. Также из таблицы видно, что расхождение значений коэффициентов затухания, полученных из аппроксимации напряжения и тока, не превышает 5%. Таким образом, неучет составляющей межобмоточного взаимодействия в токе нейтрали не повлиял существенно на точность оценки коэффициентов затуханий из аппроксимации тока нейтрали.

Приведенные выше результаты позволяют сделать вывод о том, что подходы на основе аппроксимации переходных напряжений в обмотке и тока в нейтрали обеспечивают приемлемую точность оценки значений собственных частот и коэффициентов затухания свободных колебаний в силовых трансформаторах. Подход на основе аппроксимации переходных напряжений характеризуется большей точностью за счет лучшего соотношения сигнал – шум, но имеет ограничения по применению в связи с необходимостью доступа к внутренним точкам измеряемой обмотки, что не всегда возможно на практике. Подход на основе аппроксимации переходного тока в нейтрали характеризуется сравнительно худшим соотношением сигнал – шум и наличием в токе составляющих, связанных с межобмоточными колебаниями, но при этом не требует доступа к внутренним точкам обмотки, что является его несомненным преимуществом.

Выводы. Развитие методов экспериментального определения собственных частот колебаний и коэффициентов затухания обмоток силовых трансформаторов играет важную роль в решении проблемы резонансных перенапряжений и совершенствовании высокочастотных математических моделей обмоток трансформаторов, пригодных для моделирования резонансных перенапряжений.

Значения собственных частот и коэффициентов затухания могут быть получены с помощью предложенного подхода, состоящего в выделении свободной составляющей колебаний переходных напряжений и токов в обмотках и в последующем спектральном анализе и аппроксимации во временной области.

Наиболее точно значения собственных частот и коэффициентов затухания могут быть определены из аппроксимации переходных напряжений на внутренних точках обмоток силовых трансформаторов.

В случаях, когда регистрация напряжений на внутренних точках обмотки невозможна, может быть использован подход на основе аппроксимации переходного тока в нейтрали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дмитриев М.В.** Переходный резонанс в схемах с кабелями 6–500 кВ. – Электроэнергия: передача и распределение, 2017, №1 (40), с. 18–23.
2. **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.
3. **Шейко П.А.** Трансформаторы высокого напряжения. Повреждения вследствие коммутационных перенапряжений. – Новости Электротехники, 2013, №1 (79) [Электрон. ресурс] <http://news.elteh.ru/arh/2013/79/05.php> (Дата обращения 10.11.2020).
4. **Зильберман В.А.** Предотвращение повреждений трансформаторов на электростанциях с укрупненными энергоблоками, подключенными к комплектному распределительному устройству через высоковольтные кабели. – Электричество, 2017, №10, с. 47–54.
5. **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.
6. **CIGRE Brochure 577A** «Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System – Part 1: Expertise». Joint Working Group A2/C4.39, April 2014, 126 p.
7. **CIGRE Brochure 577B** “Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System – Part 2: Case Studies”, April 2014.
8. **Soloot A.H., Huidalen H.K., Gustavsen B.** Upon the improvement of the winding design of wind turbine transformers for safer performance within resonant overvoltages. – CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, 2013/9, pp. 8–14.
9. **Furgai J., Kuniewski M., PajNek P.** Analysis of Internal Overvoltages in Transformer Windings during Transients in Electrical Networks. Energies, 2020, No.13, p. 2644 [Электрон. ресурс] <https://doi.org/10.3390/en13102644> (Дата обращения 10.11.2020).
10. **Ларин В.С., Матвеев Д.А.** Оценка воздействий на внутреннюю изоляцию обмоток силовых трансформаторов при резонансных перенапряжениях. – Электричество, 2020, № 4, с. 16–24.
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. IEC 60076-18:2012 Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response. ISBN 978-2-83220-222-7.

13. Ларин В.С. Использование передаточных функций для оценки воздействий на изоляцию обмоток трансформаторов при резонансных перенапряжениях. – Электричество, 2019, №1, с. 23–29.

14. 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.

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

16. Gustavsen B., Martin C., Portillo A. 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.

[19.08.2020]



Авторы: Ларин Василий Серафимович – кандидат техн. наук, начальник отдела трансформаторов Всероссийского электротехнического института (ВЕИ) – филиала ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), почетный член СИГ-РЭ, диссертацию защитил в 2007 г.



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

Electrichestvo, 2020, No. 12, pp. 44–54

DOI:10.24160/0013-5380-2020-12-44-54

Approximation of Transient Resonant Voltages and Currents in the Power Transformer Windings to Determine the Natural Frequencies and Damping Factors

LARIN Vasily S. (VEI – branch of FSUE «RFNC-VNIITF», Moscow, Russia) – Head of the transformer Department, Cand. Sci. (Eng.)

MATVEEV Daniil A. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Scientific Employee (Eng.)

Transient interaction between power transformers and power cable lines may give rise to resonance overvoltages in the transformer primary windings. To develop protection measures against resonance overvoltages and to design transformers resistant to resonance overvoltages, it is necessary to know the natural frequencies of the transformer windings. Recent years have seen very rapid development of transformer windings high-frequency models. However, the mathematical models used in practice, which came from calculations of impulse overvoltages in transformer windings, reproduce the frequency dependences of losses and damping at natural frequencies with insufficient accuracy. To verify and improve the mathematical models used for analyzing high-frequency processes in transformer windings, it is necessary to have sufficient experimental data on the values of natural frequencies and damping factors. Methods for experimentally determining the natural frequencies and damping factors of power transformer windings are considered. Theoretical principles and analytical expressions for transient voltages and currents obtained for simplified equivalent circuits of windings with lumped parameters are given. An approach is proposed, according to which the transient voltages and currents in the winding are represented as the sum of steady-state and free components. The free component is then approximated using the theoretical expressions obtained for the equivalent circuits of the windings. The results of applying the approach to approximating the transient voltage at the midpoint and the current in the neutral of a dry-type transformer's high-voltage winding are presented.

Key words: power transformers, resonance overvoltages, windings, transients, free oscillations, natural frequencies, damping factor

REFERENCES

1. Dmitriev M.V. *Elektroenergiya: peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electricity: transmission and distribution)*, 2017, No.1 (40), pp. 18–23.
2. Brilinskij A.S., Evdokunin G.A., Ponomaryov T.A. *Izvestiya NTC Edinoj energeticheskoy sistemy – in Russ. (STC of Unified Power System Proceedings)*, 2018, No. 1(78), pp. 130–141.
3. Shejko P.A. *Novosti Elektrotehniki – in Russ. (Electrical Engineering News)*, 2013, No.1 (79) [Electron Resource]

<http://news.elteh.ru/arh/2013/79/05.php> (Date of appeal 10.11.2020).

4. Zil'berman V.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No.10, pp. 47–54.

5. Larin V.S., Matveev D.A., Maksimov B.K. *Energetik – in Russ. (Energetik)*, 2019, No. 4, pp. 12–16.

6. CIGRE Brochure 577A «Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System – Part 1: Expertise». Joint Working Group A2/C4.39, April 2014, 126 p.

7. **CIGRE Brochure 577B** «Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System – Part 2: Case Studies», April 2014.
8. **Soloot A.H., Humidalen H.K., Gustavsen B.** Upon the improvement of the winding design of wind turbine transformers for safer performance within resonant overvoltages. – CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, 2013/9, pp. 8–14.
9. **Furgai J., Kuniewski M., PajNek P.** Analysis of Internal Overvoltages in Transformer Windings during Transients in Electrical Networks. *Energies*, 2020, No.13, p. 2644 [Electron Resource] <https://doi.org/10.3390/en13102644> (Date of appeal 10.11.2020).
10. **Larin V.S., Matveev D.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 4, pp. 16–24
11. **Larin V.S., Volkov A.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 12, pp. 20-25.
12. **IEC 60076-18:2012** Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response. ISBN 978-2-83220-222-7.
13. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 1, pp. 23–29.
14. **Beleckij Z.M., Bunin A.G., Gorbuncov A.F., Kontorovich L.N.** *Raschet impul'snyh vozdeystvij v obmotkah transformatorov s primeneniem EVM* (Calculation of pulse effects in transformer windings using a computer). M.: Inforelektro, 1978, 79 p.
15. **Fergestad P.I., Henriksen T.** Transient Oscillations in Multiwinding Transformers. – *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1974, vol. 93, No. 2, pp. 500-509.
16. **Gustavsen B., Martin C., Portillo A.** 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.

[19.08.2020]