

Оценка воздействий на внутреннюю изоляцию обмоток силовых трансформаторов при резонансных перенапряжениях

ЛАРИН В.С., МАТВЕЕВ Д.А.

Обмотки силовых трансформаторов высокого напряжения представляют собой сложные колебательные контуры с собственными частотами колебаний от единиц до сотен кГц. Известно, что если частота колебаний напряжений на входных зажимах трансформатора близка к одной из собственных частот колебаний обмотки, то такие колебания могут инициировать развитие высокочастотных резонансных перенапряжений внутри обмоток, что создает потенциальную опасность для внутренней изоляции трансформатора. Наиболее распространенной причиной появления колебаний напряжения на зажимах трансформатора с частотами от десятков до сотен кГц является многократное отражение электромагнитных волн на концах питающих кабельных линий длиной от десятков до сотен метров. С увеличением номинальных напряжений кабельных линий и с ростом их применения в последние годы наблюдается все больше случаев повреждения внутренней изоляции трансформатора из-за высокочастотных резонансных перенапряжений внутри обмоток. Для обеспечения способности трансформаторов выдерживать высокочастотные напряжения важно оценить напряжения, воздействующие на их внутреннюю изоляцию. В последнее время получили большое развитие высокочастотные модели трансформаторов (так называемые модели «белого ящика»). Их использование позволяет оценить резонансные частоты и получить качественную картину развития резонансных процессов в обмотках трансформаторов. Однако ограничения этих моделей, а именно отсутствие частотно-зависимых потерь, не позволяют получить достоверную оценку амплитуд резонансных перенапряжений внутри обмоток. Для более точного определения напряжений на участках изоляции обмоток предпочтительно использовать прямые измерения напряжений в обмотках и передаточные функции в широком диапазоне частот. Рассмотрены вопросы применения расчетно-экспериментальной оценки напряжений, воздействующих на внутреннюю изоляцию обмотки, на основе результатов моделирования и измерений. Также рассмотрены задачи верификации и повышения точности расчетных моделей путем использования доступных на практике измерений

К л ю ч е в ы е с л о в а: силовые трансформаторы обмотки, внутренняя изоляция, резонансные перенапряжения

Обмотки силовых трансформаторов высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжений представляют собой сложные колебательные контуры, собственная частота которых составляет от единиц до сотен кГц. Хорошо известно, что если частота колебаний напряжения на входных зажимах трансформатора близка к одной из собственных частот колебаний обмотки, то такие колебания могут инициировать развитие резонансных перенапряжений внутри обмоток, что создает потенциальную опасность для внутренней изоляции трансформатора.

Наиболее распространенной причиной появления колебаний напряжения на зажимах трансформатора с частотой от десятков до сотен кГц является многократное отражение электромагнитных волн на концах питающих кабельных линий длиной от десятков до сотен метров. С увеличением номинальных напряжений кабельных линий и с

ростом их применения в последние годы наблюдается все больше случаев повреждения внутренней изоляции трансформатора из-за высокочастотных резонансных перенапряжений внутри обмоток.

В период с 2008 г. по 2013 г. по линии СИГРЭ вела свою работу международная рабочая группа (РГ) А2/С4.39 «Электрические переходные взаимодействия между трансформатором и электрической системой». Итогом ее работы стала публикация технической брошюры в двух частях, в которой описаны множественные случаи повреждений трансформаторов в результате переходного взаимодействия, произошедшие в разных странах мира [1, 2]. В период с 2014 по 2020 г. работу вела РГ А2/С4.52 «Высокочастотные модели трансформаторов и реакторов для исследования переходных процессов в электрических сетях», являющаяся логическим продолжением РГ А2/С4.39; итогом рабо-

ты этой РГ стало развитие подходов к моделированию трансформаторов, в частности так называемых моделей «черного ящика» и «белого ящика» [1]. С 2019 г. начала работу новая РГ А2.63 «Импульсные испытания», сфера деятельности которой охватывает моделирование высокочастотных переходных процессов в обмотках и оценку воздействий на внутреннюю изоляцию трансформаторов.

Резонансные процессы в обмотках силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов несут в себе потенциальную опасность для их внутренней изоляции. Так, при ненагруженных вторичных обмотках трансформаторов резонансные явления в первичных обмотках могут сопровождаться значительными перенапряжениями на внутренней изоляции, при которых напряжение на отдельных частях изоляции обмоток сопоставимо либо превышает напряжение на его входных зажимах. Внешние ограничители перенапряжений (ОПН), устанавливаемые на входных зажимах трансформатора, не способны в принципе ограничить перенапряжения, возникающие внутри обмоток трансформатора при резонансных процессах.

Существует несколько комбинаций типовых электрических схем и коммутационных операций, вызывающих высокочастотные колебания напряжения в системе «кабель—трансформатор» с частотой, сопоставимой с собственными частотами обмоток трансформатора, в том числе включение под напряжение системы «кабель—трансформатор» и замыкание на землю одной из фаз в начале кабеля.

В общем случае, для оценки возможности развития резонансных напряжений в обмотках трансформаторов и оценки степени их опасности для внутренней изоляции необходимо решение следующих задач:

- 1) определение доминирующих частот колебаний напряжения в сети;
- 2) определение собственных частот колебаний обмоток трансформаторов;
- 3) определение напряжений, воздействующих на отдельные участки изоляции трансформаторов при резонансных перенапряжениях;
- 4) оценка электрической прочности изоляции трансформаторов при воздействии колебательных напряжений, вызванных резонансными перенапряжениями.

Краткие сведения по решению первой задачи приведены в [3]. Решение второй задачи достаточно подробно рассмотрено в [4], а подходы к решению четвертой задачи — в [1].

Далее рассмотрены влияние типа обмотки на резонансные процессы и подход к оценке воздей-

ствий на внутреннюю изоляцию обмоток при резонансных перенапряжениях.

Влияние типа обмотки трансформатора на резонансные перенапряжения. Резонансным перенапряжениям подвержены практически все типы обмоток высшего напряжения (ВН) силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов. В наибольшей степени резонансным перенапряжениям подвержены непрерывные катушечные обмотки [5], поскольку эти обмотки характеризуются более неравномерным начальным распределением напряжения и большими амплитудами собственных колебаний. Переплетенные обмотки, а также непрерывные обмотки со сложными схемами соединения холостых витков, характеризующиеся более равномерным начальным распределением напряжения, в меньшей степени подвержены воздействию резонансных перенапряжений. Комбинированные обмотки и непрерывные обмотки с холостыми витками, связывающими соседние пары катушек, занимают промежуточное положение. К особенностям переплетенных обмоток можно отнести также сравнительно низкие значения собственных частот колебаний, которые примерно в 2 раза ниже, чем значения частот непрерывных обмоток при прочих равных условиях.

В последние годы развитие конструкции и технологий изготовления трансформаторного оборудования с одной стороны и совершенствование схемно-технических решений при проектировании энергообъектов и применение новых видов оборудования с другой привели к сближению частот переходных колебаний напряжения в сети и собственных частот колебаний обмоток силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов.

Ранее в трансформаторах напряжением свыше 330 кВ обмотки ВН преимущественно выполнялись полностью переплетенными; на подстанциях напряжением свыше 330 кВ применялись главным образом открытые распределительные устройства (ОРУ) и воздушные выключатели, а для связи трансформаторов с ОРУ использовались воздушные ошиновки. Эти решения отличались низкими собственными частотами колебаний обмоток и сравнительно высокой частотой переходных колебаний в системе «ошиновка—трансформатор» (рис. 1,а).

В современных трансформаторах напряжением свыше 330 кВ обмотки ВН по технологическим соображениям, как правило, выполняются комбинированными или непрерывными с холостыми витками. На ОРУ подстанций напряжением свыше 330 кВ воздушные выключатели повсеместно вытесняются элегазовыми выключателями, и все чаще на новых энергообъектах отмечается приме-

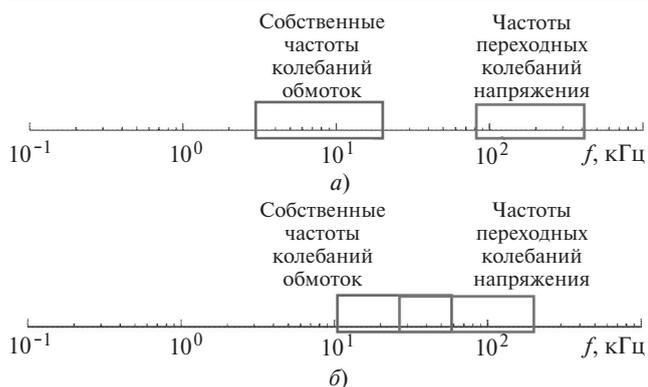


Рис. 1. Характерные частотные диапазоны собственных частот колебаний обмоток и переходных колебаний напряжения в сети

нение гибридных КРУЭ. Для связи силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов с распределительными устройствами нередко используют кабельные линии с применением силовых кабелей из сшитого полиэтилена [6, 7], отличающиеся значительной емкостью и существенно меньшей скоростью распространения электромагнитных волн по сравнению с традиционными воздушными ошиновками. Такая совокупность технических решений отличается достаточно близкими значениями частоты переходных колебаний в системе «ошиновка–трансформатор» и собственных частот колебаний обмоток (рис. 1, б).

Повреждения обмоток ВН также отмечают в распределительных трансформаторах 6–35 кВ, в том числе в сухих трансформаторах. В контексте резонансных перенапряжений можно выделить следующие особенности трансформаторов 6–35 кВ [8].

1. Трансформаторы 6–35 кВ – это, в первую очередь, распределительные трансформаторы, имеющие мощность порядка сотен кВ·А – единиц МВ·А. Это определяет небольшие размеры активной части трансформаторов, небольшую электрическую длину обмотки ВН и сравнительно высокие собственные частоты колебаний обмотки ВН (порядка десятков–сотен кГц). Поэтому развитие резонансных перенапряжений в обмотках ВН оказывается возможным при меньшей длине питающих кабельных линий. При малой длине кабелей входное сопротивление (входная емкость) трансформаторов оказывает сильное влияние на основную частоту колебаний напряжения в системе «кабель – трансформатор», что проявляется в значительном ее снижении, особенно в случае соединения в треугольник первичной обмотки трансформатора [3].

2. В масляных трансформаторах обмотки ВН классов напряжения 6–35 кВ обычно выполняют многослойными цилиндрическими. По подверженности к развитию резонансных перенапряжений

данный тип обмоток занимает промежуточное положение между непрерывными катушечными обмотками (наиболее резонирующие) и полностью переплетенными обмотками (менее резонирующие).

3. Трансформаторы 6–35 кВ характеризуются сравнительно небольшими значениями испытательного напряжения и могут быть изготовлены в сухом исполнении. В сухих трансформаторах с воздушно-барьерной главной изоляцией, как правило, применяются непрерывные катушечные обмотки (трансформаторы с открытыми обмотками) и дисковые обмотки (трансформаторы с литыми обмотками). Их конструктивные отличия проявляются следующим образом. Во-первых, катушечные обмотки по сравнению со слоевыми обмотками имеют меньшую продольную емкость, что определяет более неоднородное распределение напряжения на высокой частоте и большую амплитуду колебаний напряжений в обмотках при резонансных процессах. Во-вторых, сухие трансформаторы, как правило, имеют меньшие запасы электрической прочности по сравнению с масляными трансформаторами, особенно для классов напряжения 20–35 кВ. В-третьих, твердая изоляция (в противоположность бумажно-масляной и маслобарьерной) не обладает способностью к «самозалечиванию», поэтому начальные частичные разряды в микроскопических дефектах способствуют постепенному их росту, увеличению интенсивности разрядов и последующему пробою; это определяет возможность кумулятивного эффекта при воздействии многократно повторяющихся резонансных перенапряжений в обмотках. Следствием этих факторов является большая подверженность сухих трансформаторов 6–35 кВ повреждениям при воздействии резонансных перенапряжений.

4. В сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью высокочастотные процессы, протекающие в одной фазе сети, воздействуют более чем на одну фазу питаемой обмотки ВН. С другой стороны, при соединении первичной обмотки в треугольник, начала и концы обмоток каждой из фаз подключены к разным фазам сети, что определяет возможность наложения переходных процессов в обмотках разных фаз.

Подход к оценке воздействий на внутреннюю изоляцию обмоток трансформаторов. 1. Оценка напряжений на продольной изоляции обмоток путем аппроксимации измеренного пространственного распределения напряжения. В [9] был рассмотрен вопрос измерений пространственных распределений напряжений внутри обмоток в спектре частот. Пространственное распределение напряжения в

обмотке может быть получено при измерении передаточных функций отдельных точек обмотки и последующей «склейки» передаточных функций в трехмерный график. Для измерений передаточных функций могут быть использованы частотные анализаторы, а также измерительные системы FRA, в которых входное сопротивление 50 Ом на канале отклика заменено высокоомным пробником с входной емкостью не более 20 пФ.

При достаточно большом числе доступных для измерений внутренних точек обмотки, включая входные части обмоток, из пространственного распределения могут быть достаточно точно получены градиенты – напряжения, воздействующие на элементы продольной изоляции (витки, слои, катушки) на резонансных частотах. Однако такое не всегда возможно на реальных обмотках трансформаторов даже в условиях завода-изготовителя из-за сложностей с подключением к внутренним точкам обмоток.

При проектировании изоляции обмоток необходимо знать воздействие не только на межслоевую или межкатушечную изоляцию, но также и на витковую изоляцию обмотки. При этом практически измерения резонансных напряжений на витковой изоляции затруднены из-за большого числа витков с одной стороны и возможного сильного влияния вспомогательных измерительных отводов с промежуточных выводов обмотки, длина и емкость которых сопоставима с длиной и емкостью одного витка обмотки.

Для оценки воздействий на межслоевую и витковую изоляцию можно прибегнуть к аппроксимации значений напряжения, измеренных в отдельных точках обмотки, и нахождению производной аппроксимирующей функции [10].

В общем случае, пространственные распределения напряжения в обмотке на первых собственных частотах представляют собой непрерывные, достаточно гладкие кривые, и в качестве аппроксимирующей функции могут быть использованы кубические сплайны. Вместе с тем, в условиях ограниченного числа доступных для измерений точек обмотки нельзя исключать наличия существенных отклонений сплайн-интерполяции от фактического пространственного распределения напряжения в обмотке в промежутке между измеренными точками. В качестве альтернативы сплайн-интерполяции могут быть использованы аппроксимирующие функции в виде выражений, получаемых из теоретического решения дифференциальных уравнений переходных процессов в обмотках.

Для однородной обмотки установившееся напряжение $U(x,t)$ при воздействии переменного на-

пряжения с частотой, равной i -й собственной частоте колебаний (гармонике) обмотки, пренебрегая составляющими с высшими гармониками, может быть приближенно выражено [5]:

$$U(x,t) \approx u(x,0) \sin \omega_i t + A_i \sin i\pi x \times \left(\frac{1}{4} \sin \omega_i t + \frac{\omega_i}{2\gamma_i} \cos \omega_i t \right), \quad (1)$$

где x – относительная координата точки обмотки; $u(x,0)$ – начальное распределение напряжения в обмотке; A_i , ω_i и γ_i – амплитуда свободных колебаний, круговая частота и коэффициент затухания i -й гармоники.

Выражение (1) может быть представлено в упрощенном виде [10]:

$$U(x,t) \approx u(x,0) \sin \omega_i t + A_i \sin i\pi x K_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (2)$$

где K_i – кратность резонансного повышения напряжения (добротность колебательного контура); φ_i – фазовый сдвиг напряжения в обмотке относительно напряжения источника.

В (1) и (2) множитель $\sin i\pi x$ описывает пространственное распределение напряжения для случая однородной обмотки без учета взаимной индукции между частями обмотки. При учете взаимной индукции между частями обмотки, выражение (2) для однородной обмотки может быть записано в виде:

$$U(x,t) \approx u(x,0) \sin \omega_i t + [A_i \sin \alpha_1 x + B_i \cos \alpha_1 x + C_i \operatorname{ch} \alpha_2 x + D_i \operatorname{sh} \alpha_2 x] K_i \sin(\omega_i t + \varphi_i). \quad (3)$$

Применяя граничные условия $U(0,0)=1$ и $U(1,0)=0$, коэффициенты C_i и D_i могут быть выражены как $C_i = -B_i$; $D_i = -(A_i \sin \alpha_1 x + B_i \cos \alpha_1 x - B_i \operatorname{ch} \alpha_2 x) / \operatorname{sh} \alpha_2 x$.

Выражения (2) и (3), а также измеренные установившиеся значения напряжения в промежуточных точках обмоток можно представить комплексными числами, в результате для каждой доступной точки обмотки могут быть записаны два уравнения, отдельно для вещественной и мнимой части напряжения. При достаточном числе доступных для измерений точек обмотки коэффициенты аппроксимирующих функций могут быть найдены с помощью метода наименьших квадратов.

Для примера далее представлены результаты измерений передаточных функций и пространственного распределения напряжения на сухом трансформаторе мощностью 630 кВ·А напряжением 10/0,4 кВ. Обмотки высшего напряжения (ВН) с литой изоляцией состоят из восьми дисков. Для удобства измерений начала и концы каждого диска выведены на поверхность обмотки ВН.

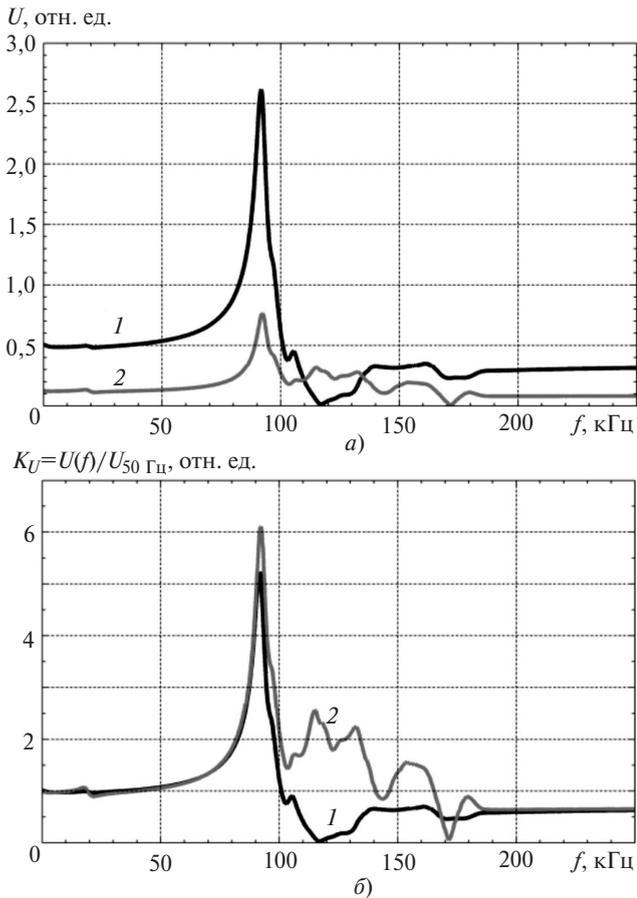


Рис. 2. Передаточные функции напряжений переходов № 5 (1) и № 8 (2): а – относительно входного напряжения; б – относительно напряжения перехода на частоте 50 Гц

На рис. 2 приведены измеренные передаточные функции обмотки ВН для переходов № 5 и 8, которым соответствует относительная электрическая длина обмотки от точки подачи напряжения $x=1/2$ и $7/8$.

Из рис. 2 хорошо видна особенность дисковых обмоток с литой изоляцией сухих трансформаторов, имеющих сравнительно большую продольную емкость и малую емкость на землю: собственные частоты, начиная со второй, близко расположены к первой собственной частоте; резонансные повышения напряжения в обмотке на первой собственной частоте значительно превосходят повышения напряжения на высших собственных частотах, потому для таких обмоток практический интерес представляет в первую очередь первая собственная частота.

На рис. 3 и 4 приведены пространственные распределения напряжения в обмотке ВН, полученные путем измерения передаточных функций отдельных переходов обмотки ВН в широком диапазоне частот. На рис. 3 значения частоты 92 и 115 кГц примерно соответствуют первой и второй собственным частотам обмотки ВН, а частота

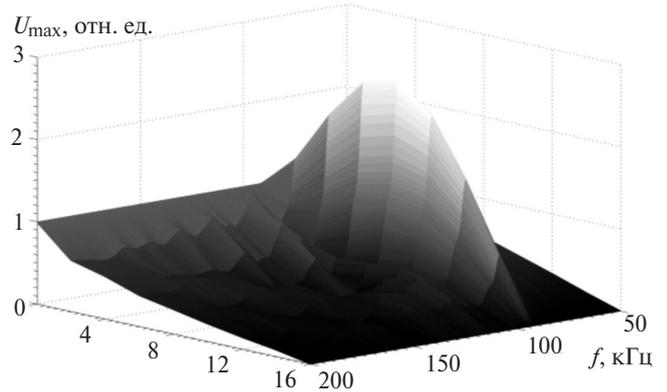


Рис. 3. Пространственно-частотное распределение напряжения в обмотке

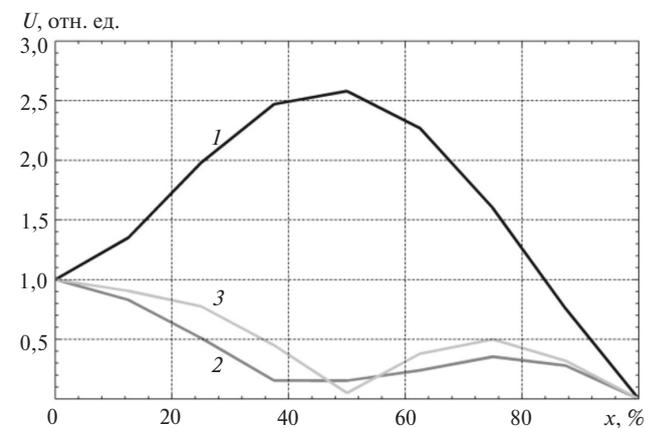


Рис. 4. Пространственное распределение напряжения в обмотке: 1 – на частоте 92 кГц; 2 – 106 кГц; 3 – 115 кГц

106 кГц – промежуточная, приведенная для сравнения.

На рис. 5 приведены результаты аппроксимации пространственного распределения напряжения на первой собственной частоте, определенные с помощью метода наименьших квадратов, где точками показаны измеренные значения.

Как видно из рис. 5, аппроксимация по выражению (3) дает лучшую сходимость аппроксимации с измеренным распределением напряжения, что важно для последующего определения градиентов напряжения на участках продольной изоляции обмотки. Вместе с тем, аппроксимация по более простому выражению (2) в рассматриваемом примере дисковой обмотки, характеризующейся меньшей по сравнению со слоевыми обмотками магнитной связью между электрически не связанными витками, также вполне приемлема.

На рис. 6 представлены кривые градиентов, полученные путем дифференцирования аппроксимирующей функции по выражениям (2) и (3) (кривые 2 и 3), а также оценка значений градиента измеренных напряжений (кривая 1), определенная

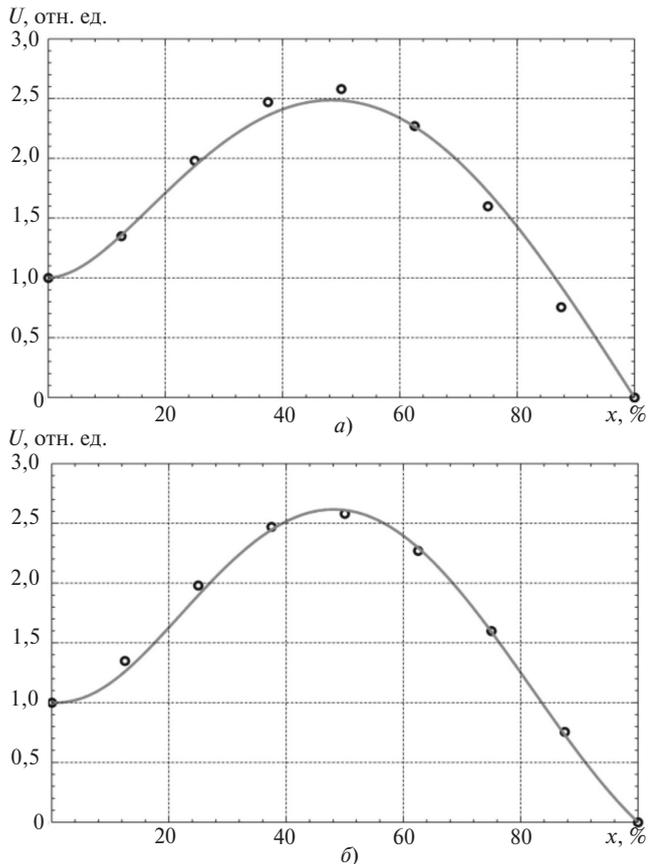


Рис. 5. Результаты аппроксимации измеренного распределения напряжения: а – по выражению (2); б – по (3)

как относительная разность измеренных напряжений соседних точек.

Аппроксимация по выражению (3) дает более точный результат. Аппроксимация по выражению (2) дает несколько завышенные значения градиентов в начале и конце обмотки. Вместе с тем, для максимальных значений градиентов обе аппроксимации хорошо согласуются с измерениями: оценка по измеренным напряжениям – 6,86; аппроксимация по выражению (2) – 7,62; по выражению (3) – 7,0.

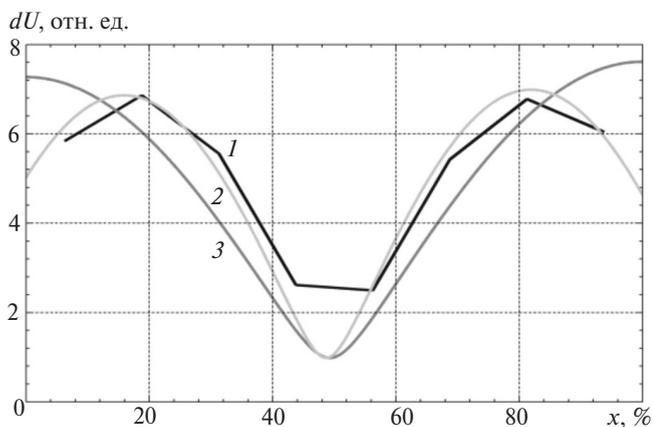


Рис. 6. Кривые градиентов напряжения в обмотке на частоте 91 кГц

2. Оценка напряжений на продольной изоляции обмоток по результатам осциллографирования напряжений в доступных точках. Ранее были представлены результаты измерений на обмотке ВН трансформатора, в которой имеется большое число доступных для измерений промежуточных точек. Но для серийно выпускаемых обмоток сухих трансформаторов с литой изоляцией имеется доступ только к регулировочным выводам ПБВ.

Наиболее часто регулировочную часть выполняют в середине высоты обмотки ВН, где имеет место максимум пространственного распределения на первой собственной частоте, что делает возможным непосредственное измерение резонансного повышения напряжения на первой собственной частоте. При этом в середине обмотки ВН имеет место минимум пространственного распределения на второй собственной частоте, в результате чего измерения напряжения в средней точке обмотки оказываются малоинформативными для оценки резонансного повышения напряжения на второй собственной частоте.

Помимо измерений передаточных функций в доступных для измерений точках может быть выполнено осциллографирование переходного процесса резонансного повышения напряжения на резонансных частотах при питании обмотки от источника незатухающего синусоидального напряжения. Такое осциллографирование позволяет исследовать динамику процесса резонансного повышения напряжения, получить соответствующие постоянные времени, а также проанализировать доминирующие собственные частоты колебаний.

На рис. 7 приведены измеренные осциллограммы напряжения в средней точке обмотки ВН при частоте питающего напряжения 91 и 114 кГц. Важно отметить, что в результате переходного процесса максимальное напряжение на частоте 91 кГц соответствует установившемуся значению напряжения, в то время как на частоте 114 кГц максимальное значение напряжения в первый момент времени значительно превышает установившееся значение напряжения. Таким образом, оценка воздействий по передаточным функциям, характеризующим установившиеся значения напряжения, в общем случае может приводить к несколько заниженным результатам на промежуточных частотах. Однако на резонансных частотах, характеризующихся наибольшей кратностью повышения напряжения, оценка напряжений на продольной изоляции обмотки по передаточным функциям приемлема.

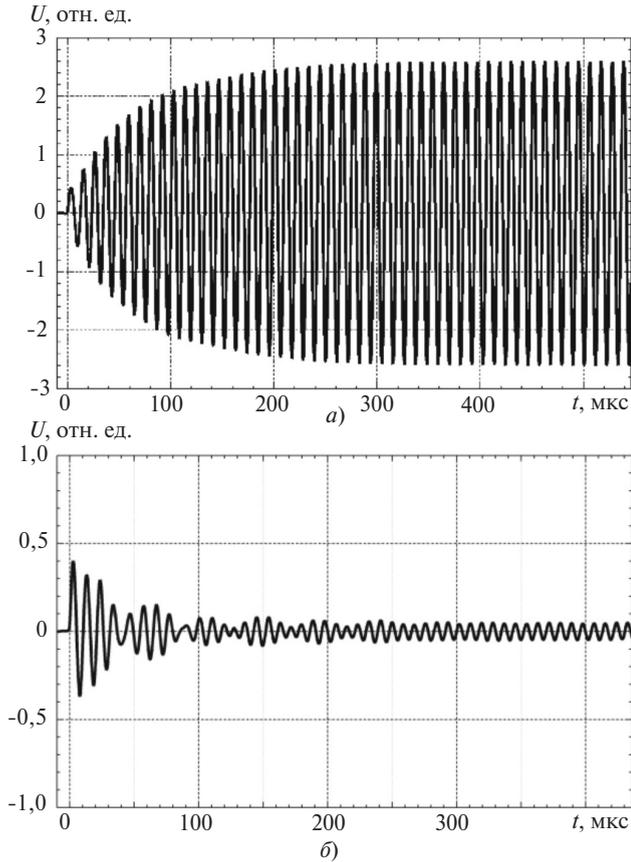


Рис. 7. Измеренные осциллограммы напряжения в средней точке обмотки ВН: а – на частоте 91 кГц; б – 114 кГц

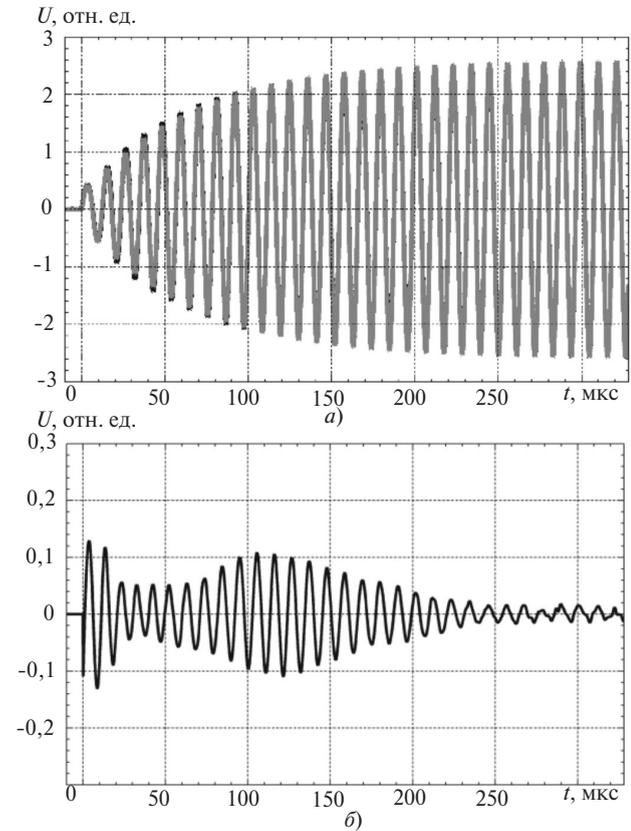


Рис. 8. Аппроксимация осциллограммы напряжения в средней точке обмотки ВН на частоте 91 кГц (а) и ее отклонение от измеренной осциллограммы (б)

Осциллограмма напряжения на первой собственной частоте может быть аппроксимирована выражением вида:

$$U(t) = u(0) \sin \omega_1 t + A_1 K_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) (1 - \exp(-\gamma t)). \quad (4)$$

Коэффициенты $u(0)$, $A_1 K_1$, φ_1 и γ_1 могут быть выражены следующим образом:

$$\gamma = \frac{\ln\left(1 - \frac{U(nT)}{B_1}\right)}{nT}; \quad u(0) = B_2 - \frac{B_2 - U(T/4)}{e^{-\gamma T/4}};$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{B_1}{B_2 - u(0)}\right); \quad A_1 K_1 = \frac{B_1}{\sin \varphi},$$

где T – период колебаний питающего напряжения; n – целое число; B_1 и B_2 – мнимая и действительная часть установившегося напряжения:

$$B_1 = \text{Im}(U(t \rightarrow \infty)); \quad B_2 = \text{Re}(U(t \rightarrow \infty)).$$

Следует отметить, что выражение (4) не учитывает возможные небольшие отличия частоты питающего напряжения от собственной частоты колебаний, а также колебания на высших гармониках, что может приводить к некоторым отличиям измеренной осциллограммы и ее аппроксимации на первых периодах. Для повышения точности аппроксимации параметр n может быть выбран равным «5» и более.

В рассматриваемом примере коэффициенты аппроксимации составили: $u(0) = 0,37$; $A_1 K_1 = 2,48$; $\varphi_1 = -75,4^\circ$; $\gamma_1 = 0,0156$. Полученная аппроксимация достаточно хорошо воспроизводит измеренную осциллограмму (рис. 9).

С использованием значений коэффициентов аппроксимации по выражению (4) может быть найдена аппроксимация пространственного распре-

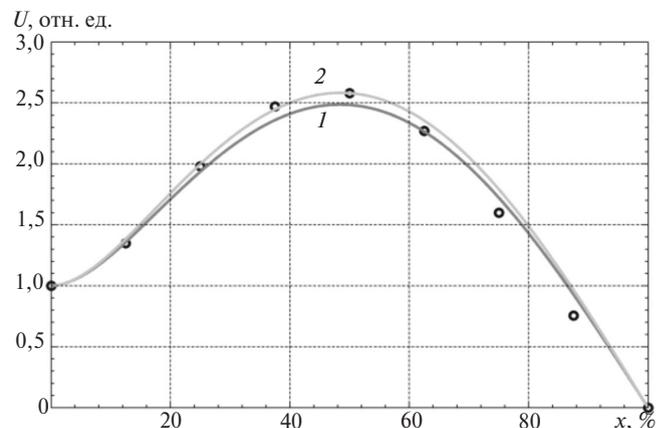


Рис. 9. Сравнение аппроксимаций пространственного распределения напряжения: 1 – по выражению (2); 2 – (4)

ления напряжения (2) и градиенты напряжения на продольной изоляции обмотки (рис. 9). В рассматриваемом примере из аппроксимации по выражению (3) максимальное значение градиента равно 7,92, что отличается от оценки градиента по измеренным напряжениям примерно на 15%.

Таким образом, из осциллографирования переходного напряжения в средней точке обмотки при питании незатухающим синусоидальным напряжением может быть получена приемлемая для выбора продольной изоляции обмотки оценка предельной кратности резонансных перенапряжений на первой собственной частоте колебаний.

Выводы. 1. При проектировании новых трансформаторов и разработке мероприятий по их защите от резонансных перенапряжений следует принимать во внимание конструктивные отличия обмоток трансформаторов и возможное усиление колебаний в первичных обмотках.

2. Оценка напряжений, действующих на внутреннюю изоляцию обмоток трансформаторов при резонансных перенапряжениях, может быть выполнена при измерении и последующей интерполяции пространственного распределения напряжения в обмотке на резонансных частотах. С приемлемой точностью такая интерполяция может быть выполнена с использованием выражений, получаемых путем теоретического решения дифференциальных уравнений переходных процессов в обмотках.

3. Наибольшую точность аппроксимации дает использование выражения теоретического решения для пространственного распределения с гиперболическими синусом и косинусом. Вместе с тем, теоретическое решение с одной синусоидой также приемлемо для катушечных обмоток, которые имеют сравнительно слабую связь между электрически удаленными витками.

4. Коэффициенты аппроксимации пространственного распределения напряжения на первой соб-

ственной частоте колебаний могут быть получены при осциллографировании переходного напряжения в средней точке обмотки при ее питании незатухающим синусоидальным напряжением.

СПИСОК ЛИТЕРАКТУРЫ

1. **CIGRE Brochure 577A.** Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 1: Expertise. Joint Working Group A2/C4.39, April 2014. ISBN: 978-2-85873272-2.
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. ISBN: 978-2-85873272-2.
3. **Ларин В.С.** Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.4. Определение частоты колебаний напряжения в системе «питающий кабель-трансформатор». — Электричество, 2018, № 9, с. 22–28.
4. **Ларин В.С., Волков А.Ю.** Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.2. Определение резонансных частот обмоток. — Электричество, 2015. № 12, с. 20–25.
5. **Геллер Б., Веверка А.** Импульсные процессы в электрических машинах/Пер. с англ. М.: Энергия, 1973, 440 с.
6. **Дмитриев М.В.** Переходный резонанс в схемах с кабелями 6–500 кВ. — «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ: передача и распределение», 2017, № 1 (40), с. 18–23.
7. **Дмитриев М.В.** Переходный резонанс в схемах, выполненных кабелями 6–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. — Энергетик, 2018, № 3, с. 22–26.
8. **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.
9. **Ларин В.С.** Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.3. Измерения напряжения в обмотках на резонансных частотах. — Электричество, 2016, № 1, с. 20–24.
10. **Ларин В.С., Матвеев Д.А.** Расчетно-экспериментальная оценка напряжений на продольной изоляции обмоток трансформаторов отбора мощности при резонансных перенапряжениях. — Электротехника, 2019, № 8, с. 40–46.

[20.01.2020]

А в т о р ы: **Ларин Василий Серафимович** — кандидат техн. наук, начальник отдела трансформаторов ВЭИ — филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТ, почетный член СИГРЭ, диссертацию защитил в 2007 г.

Матвеев Даниил Анатольевич — научный сотрудник НИУ «МЭИ».

Assessment of Stresses on Power Transformer Winding Internal Insulation Under Resonant Overvoltages

LARIN Vasily S. (All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of RFNC-VNIITF, Moscow, Russia Head of Transformer Dept. Cand. Sci. (Eng.) CIGRE Distinguished Member

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

Windings of high voltage power transformers are complex oscillatory circuits, the natural frequencies of which are from a few up to several hundreds of kHz. It is well known that if the frequency of voltage oscillations at the input terminals of a transformer is close to one of the winding natural frequencies, such oscillations, can initiate the development of high-frequency resonant overvoltages inside the windings, which poses a potential danger to the internal insulation of the transformer. The most common reason for the appearance of voltage oscillations at the transformer terminals with frequencies from tens to hundreds of kHz is the multiple reflection of electromagnetic waves at the ends of the supply cable lines having a length from tens to hundreds of meters. With the increase of the cable lines rated voltages and with their growing application in recent years, there have been more and more cases of damages of the transformer internal insulation due to high-frequency resonant overvoltage inside the windings. In order to ensure the ability of transformers to withstand high-frequency stresses, it is important to evaluate the voltages affecting their internal insulation. Recently, the high-frequency white-box models of transformers have received great development. These models make it possible to quantitatively estimate resonant frequencies of transformers and to make qualitative analysis of resonant phenomena development in transformer windings. However, the limitations of these models, namely the omitting of frequency dependence of losses, do not allow them to provide a reliable assessment of the resonant-overvoltage magnitudes inside the windings. For a more accurate determination of the voltages at the sections of the windings, insulation, it is preferable to use direct measurements of voltages in the windings and transfer functions in a wide range frequency. The paper discusses the application of computational and experimental evaluation of voltages affecting the winding internal insulation by combination of results obtained by modeling and from available measurements

Key words: *transformer windings resonance overvoltages, voltage oscillation frequencies, interaction between transformer and external network power, internal insulation, resonant*

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. ISBN: 978-2-85873272-2.
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. ISBN: 978-2-85873272-2.
3. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 9, pp. 22–28.
4. **Larin V.S., Volkov A.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 12, pp. 20–25.
5. **Gueller B., Veverka A.** *Impul'snyye protsessy v elektricheskikh mashinakh/Trans. from English*, 1973, 440 p.
6. **Dmitriyev M.V.** *ELEKTROENERGIYA: peredacha i raspredeleniye – in Russ. (Electric Power: Transmission and Distribution)*, 2017, No. 1(40), pp. 18–23.
7. **Dmitriyev M.V.** *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2018, No. 3, pp. 22-26.
8. **Larin V.S., Matveyev D.A., Maksimov N.K.** *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2019, No. 4, pp. 12–16.
9. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 1, pp. 20–24.
10. **Larin V.S., Matveyev D.A.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2019, pp. 40–46.

[20.01.2020]