

## Использование передаточных функций для оценки воздействий на изоляцию обмоток трансформаторов при резонансных перенапряжениях

ЛАРИН В.С.

*В последние годы все чаще отмечаются случаи повреждений по причине резонансных перенапряжений изоляции обмоток трансформаторов, работающих совместно с кабельными линиями или протяженными ошиновками. Для проверки способности трансформаторов выдерживать в эксплуатации воздействия высокочастотных переходных колебательных напряжений необходимо определить воздействия на главную и продольную изоляцию обмоток в условиях резонансных перенапряжений. Эта задача может быть решена путем измерения в широком диапазоне частот передаточных функций напряжений внутренних узлов обмоток. В статье рассмотрены некоторые практические вопросы, связанные с использованием передаточных функций для оценки воздействий на изоляцию обмоток трансформаторов.*

*Ключевые слова: трансформаторы, обмотки, резонансные перенапряжения, резонансные частоты обмоток, изоляция обмоток, передаточные функции*

Обмотки силовых трансформаторов представляют собой сложные колебательные контуры, характеризующиеся набором собственных частот колебаний. При воздействии на зажимы трансформатора колебательного напряжения возможно развитие резонансных перенапряжений в его обмотках. В зависимости от того, на каких частотах возбуждаются колебания в обмотках, возможны два нежелательных явления:

резонансные перенапряжения в первичных обмотках (большие напряжения на главной и продольной изоляции питаемых обмоток);

наведенные перенапряжения (большие напряжения на главной изоляции и на выводах ненагруженных вторичных обмоток).

В последние годы все чаще фиксируются случаи повреждений трансформаторов, работающих совместно с кабельными линиями или протяженными ошиновками. Причем повреждения отмечаются не только в трансформаторах сверхвысокого напряжения, но и на трансформаторах более низких классов напряжений, включая распределительные трансформаторы и трансформаторы для ветряных турбин [1–6].

«Проблема» резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов сама по себе не нова, о ней известно достаточно давно. Но в последние годы совершенствование конструкций и технологий изготовления трансформаторного оборудования, с одной стороны, и совершенствование схемно-технических решений при проектировании энергообъектов и применение новых видов оборудо-

ования (силовых кабелей из сшитого полиэтилена, вакуумных и элегазовых выключателей и др.), с другой — привело к сближению частот переходных колебаний напряжения в сети и собственных частот колебаний обмоток силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов [7].

Для обеспечения надежной работы трансформаторного оборудования и снижения рисков его повреждения из-за резонансных перенапряжений целесообразно применение схемно-технических и организационных мероприятий [7–9], исключающих полностью или снижающих амплитуду воздействующих на оборудование высокочастотных переходных колебательных напряжений. Альтернативно или в дополнение к этому решение задачи обеспечения надежной работы трансформаторов может быть достигнуто путем их проектирования с учетом возможности воздействия в эксплуатации высокочастотных переходных колебательных напряжений.

Для оценки опасности резонансных перенапряжений и адекватного выбора изоляции обмоток необходимо решение задачи определения напряжений, воздействующих на внутреннюю изоляцию трансформаторов.

Для определения напряжений на главной и продольной изоляции обмоток при воздействии импульсного напряжения на протяжении многих десятилетий успешно применяются импульсные обмеры и расчеты импульсных переходных процессов в обмотках. С этой целью широко используются так называемые модели «белого ящика» (white-boxmodel) [1], в которых параметры схемы

замещения (собственные и взаимные индуктивности и емкости, активные сопротивления) определяются расчетным путем для некоторой фиксированной частоты. Основанные на их использовании расчетные программы, как правило, не учитывают частотной зависимости потерь в обмотках. При расчете импульсных перенапряжений в обмотках, в общем случае, не требуется высокая точность воспроизведения затуханий переходного процесса, поскольку интерес представляют максимальные напряжения на продольной изоляции, достигаемые в первые периоды колебаний.

Совсем иначе дело обстоит при расчете резонансных процессов, где максимальные значения напряжений определяются в значительной степени потерями в обмотках. При решении таких задач недостаточно точное воспроизведение потерь в обмотках может привести к существенным отличиям расчетных напряжений от фактических и завышению расчетных воздействий на изоляции.

При отсутствии апробированных частотно-зависимых моделей обмоток с достаточно точным воспроизведением потерь единственным надежным способом определения напряжений в обмотках при резонансных условиях остаются измерения на низком напряжении, подобно тому, как это делается при импульсных обмерах трансформаторов.

Ранее в [9, 10] были рассмотрены вопросы оценки кратности наведенных и резонансных перенапряжений в обмотках частот путем измерения передаточных функций в широком диапазоне с помощью приборов для анализа частотных характеристик (FRA) трансформаторов и реакторов. В статье рассмотрены вопросы практического применения передаточных функций для оценки резонансного увеличения напряжения в обмотках трансформаторов.

**Резонансное повышение напряжения в обмотках трансформаторов.** Резонансное повышение напряжения в питаемой обмотке можно легко объяснить с использованием теории волновых процессов и режима стоячих волн. Рассмотрим для примера случай однородной обмотки, конец которой заземлен. При включении обмотки на источник переменного напряжения высокой частоты в обмотке будет иметь место переходный процесс, сопровождающийся появлением в обмотке все новых падающих волн и их последующим переотражением от заземленного конца обмотки и начала обмотки, подключенного к источнику. Напряжение в произвольной точке обмотки может быть представлено суммой напряжений падающих и отраженных волн. При частоте входного напряжения, близкого к собственной частоте колебаний обмотки, воз-

можно такая ситуация, когда максимумы напряжения падающей и отраженных волн будут достигаться в один и тот же момент времени и иметь одинаковую полярность. Сложение падающей волны с серией все новых и новых отраженных волн будет приводить к экспоненциальной раскачке напряжения внутри обмотки. При воздействии на обмотку незатухающего переменного напряжения увеличение напряжения в обмотке ограничено только потерями в ней. Чем больше потери в обмотке (например, на высокой частоте), тем быстрее напряжение в некоторой точке обмотки достигает своего максимального значения.

Для однородной обмотки установившееся напряжение  $U(x,t)$  при воздействии переменного напряжения с частотой, равной  $i$ -й собственной частоте колебаний (гармонике) обмотки, может быть приближенно выражено следующим образом [11]:

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

где  $E_m$  – амплитуда напряжения источника;  $u(x,0)$  – начальное распределение напряжения в обмотке;  $A_i$ ,  $\omega_i$  и  $\gamma_i$  – амплитуда свободных колебаний, круговая частота и коэффициент затухания  $i$ -й гармоники.

Из (1) следует, что увеличение напряжения при резонансе определяется, главным образом, амплитудой свободных колебаний  $A_i$  и коэффициентом затухания  $\gamma_i$  гармоники.

Обмотки, имеющие более неравномерное начальное распределение и, как результат, большие амплитуды гармоник ( $A_i$ ), характеризуются большим резонансным увеличением напряжения. Примером таких обмоток являются обмотки непрерывного катушечного типа, широко применяемые в масляных трансформаторах классов напряжения до 220 кВ и сухих трансформаторах с открытыми обмотками классов напряжения до 35 кВ включительно. Слоевые обмотки, переплетенные обмотки, а также непрерывные обмотки со сложными схемами соединения холостых витков характеризуются более равномерным начальным распределением напряжения, а потому они в меньшей степени подвержены воздействию резонансных перенапряжений. Комбинированные обмотки и непрерывные обмотки с холостыми витками, связывающими соседние пары катушек входной зоны, занимают промежуточное положение, уступая полностью переплетенным обмоткам.

Чем меньше затухание в обмотке, тем больше будет резонансное увеличение напряжения. Применение современных технических решений, направленных на снижение добавочных потерь в об-

мотках, таких как уменьшение сечения элементарных проводников, использование транспонированных проводов вместо традиционных прямоугольных обмоточных проводов, имеет обратную сторону в виде больших резонансных увеличений напряжения.

С ростом частоты увеличивается затухание в обмотке, а значит, снижается резонансное увеличение напряжения. По этой причине наибольшие увеличения напряжения обычно имеют место на первых трех собственных частотах.

В качестве иллюстрации далее представлены результаты измерений резонансного увеличения напряжений на примере дисковой обмотки сухого трехфазного трансформатора 10 кВ мощностью 1600 кВА. На рис. 1 представлены передаточные функции напряжения в средней точке обмотки высшего напряжения (ВН) трех фаз, полученные с использованием измерительного прибора для анализа частотных характеристик обмоток и подхода [8].

Установившееся значение напряжения в средней точке составляет около 0,5 приложенного напряжения вплоть до частот порядка 100 кГц. Далее следует острый резонансный пик, соответствующий первой собственной частоте колебаний обмотки ВН. Наибольшее напряжение имеет место в средней по расположению на магнитной системе фазе В и достигает на частоте 186 кГц около 2,6 приложенного напряжения. По отношению к установившемуся напряжению на частотах до 100 кГц кратность напряжения составляет около 5,2.

**О различии между значениями передаточной функции и кратностью максимальных напряжений.** Для измерения передаточных функций на практике удобно использовать подход [10] на основе применения измерительного прибора для анализа частотных характеристик (FRA). Вместе с тем, такая оценка воздействующих на изоляцию обмоток напряжений имеет свои «подводные камни», связан-

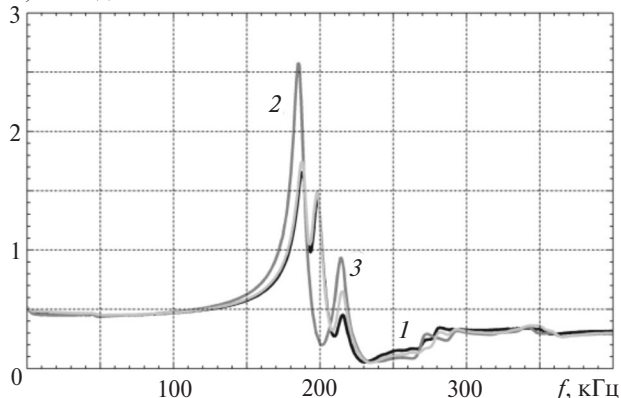


Рис. 1. Передаточные функции напряжения в середине обмотки ВН: 1, 2 и 3 – фазы А, В и С соответственно

ные с сутью передаточных функций и принципами работы соответствующих измерительных приборов.

Работа измерительного прибора для анализа частотных характеристик обмоток основана на приложении к объекту измерений переменного напряжения с последовательным изменением его частоты. Для построения частотных характеристик используются установившиеся значения напряжений, а переходное увеличение напряжения, имеющее место в начальный момент времени, исключается из рассмотрения.

На рис. 2,а представлена осциллограмма напряжения на резонансной частоте 186 кГц в средней точке обмотки ВН указанного трансформатора. В этом примере напряжение сравнительно медленно выходит на установившийся уровень – более чем 30 периодов. Постоянная времени нарастания напряжения составила  $\tau_i = 1/\gamma_i = 46,7$  мкс (~8,7 периодов колебаний). На этой частоте значение передаточной функции фазы В (рис. 1) составляет около 2,6, что соответствует максимальному значению напряжения осциллограммы рис. 2.

Осциллограмма рис. 2,б качественно отличается от осциллограммы рис. 2,а. В данном случае частота питающего напряжения отлична от собственной частоты колебаний обмотки и на ней не происходит значимого резонансного увеличения напряже-

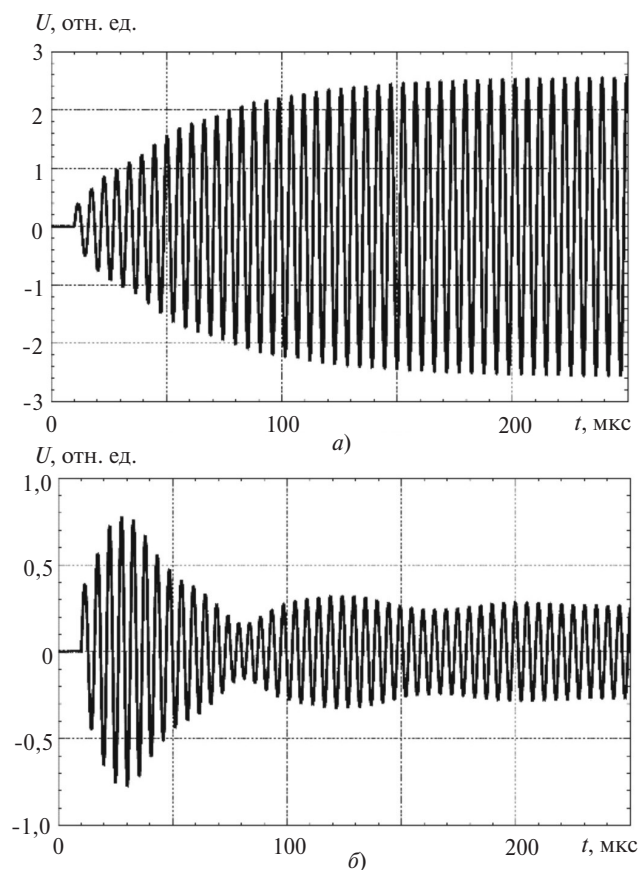


Рис. 2. Резонансное увеличение напряжения в середине обмотки ВН фазы В: а – на частоте 186 кГц; б – 198 кГц

ния. Вместо непрерывного роста напряжения в начальной части имеет место рост и последующее снижение напряжения. Установившееся значение напряжения ( $\sim 0,3$ ) меньше максимального значения ( $\sim 0,8$ ), достигаемого в начальные моменты переходного процесса. При этом на частоте 198 кГц значение передаточной функции фазы  $B$  (рис. 1) равно примерно 0,3, что соответствует установившемуся значению напряжения.

Этот пример наглядно показывает, что при использовании передаточных функций для оценки воздействий на изоляцию возможна заниженная оценка воздействующих напряжений для частоты, отличной от резонансной. На частоте, близкой к резонансным, нельзя исключать возможного переходного увеличения напряжения в первые периоды после подачи питающего напряжения. Вместе с тем, передаточные функции вполне применимы для оценки максимальных воздействий на изоляцию обмоток на резонансных частотах.

#### О необходимости учета фазового угла напряжения при определении напряжений на участках обмотки.

На резонансной частоте, соответствующей первой собственной частоте колебаний обмотки, длина волны сопоставима с электрической длиной обмотки. Помимо изменения амплитуды напряжения вдоль обмотки также имеет место изменение фазы напряжения. В связи с этим для определения напряжений на участках изоляции недостаточно измерений одних только амплитуд напряжения, требуется также проводить измерения фазовых сдвигов напряжений в измеряемых точках относительно входного напряжения.

Влияние фазы напряжения далее проиллюстрировано результатами численного моделирования резонансных процессов в обмотке высшего напряжения (ВН) трансформатора ОРЦ–417000/750/20, выполненного в программах ТТ и ЕМТЛАВ [12]. Ввиду упоминаемого выше сильного влияния точности воспроизведения потерь в обмотке на высоких частотах на максимальные значения резонансных перенапряжений приведенные результаты носят исключительно качественный характер. Вместе с тем, в отличие от прямых измерений, в которых обычно доступно ограниченное число точек обмотки, численное моделирование имеет одно важное преимущество, а именно, возможность получения более полной картины резонансных процессов в обмотке.

В рассматриваемом примере обмотка ВН – полностью переплетенная, с вводом в середину, состоит из двух полуобмоток по 62 катушки в каждой. Для наглядности далее приведены результаты для нижней половины (полуобмотки) обмотки ВН. Ну-

мерация катушек принята снизу вверх, середине обмотки соответствует катушка с номером 62.

По результатам расчетов получены значения первых трех собственных частот, равные 7,4; 13,1 и 17,6 кГц.

На рис. 3 показано расчетное спектральное распределение напряжения, построенное по значениям напряжений наружных переходов полуобмотки. Такое распределение является характерным для переплетенных обмоток – наличие явно выраженных резонансных пиков в области частот порядка 5–20 кГц и практически линейное распределение напряжения на частоте до сотен кГц. На частоте свыше нескольких сотен кГц в обмотках возможно развитие внутрикатушечных колебаний, что приводит к отклонению распределения напряжения от линейного. В статье вопросы внутрикатушечных колебаний не рассматриваются, поэтому спектры напряжений приведены в диапазоне до 100 кГц.

На рис. 4 приведено пространственное распределение амплитуды напряжений на первых трех собственных частотах, представляющее собой срезы по частоте распределения рис. 3, а на рис. 5 – фазовой сдвиг этих напряжений относительно напряжения на входе обмотки. Из рис. 4 и 5 видно, что вдоль обмотки помимо изменения амплитуды имеет место изменение фазы напряжения, особенно выраженное во входной части обмотки.

С некоторым приближением напряжение на витковой изоляции переплетенной обмотки может быть определено как половина напряжения на переплетенных парах катушек. Полученное таким образом пространственное распределение напряжения на витковой изоляции приведено на рис. 5. Это распределение характеризуется наличием на частотах, близких к первым собственным частотам колебаний, резонансных увеличений напряжения вблизи начала и конца полуобмотки. Кроме того, на частотах, близких к второй и более высоким собственным частотам, также отмечается локальное увеличение напряжения в промежуточных точ-

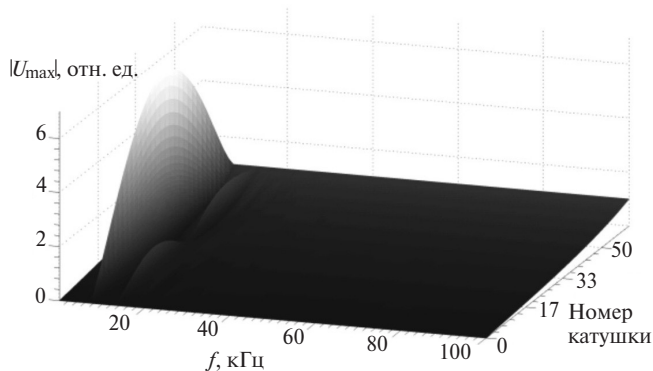


Рис. 3. Пространственное распределение напряжения в обмотке ВН



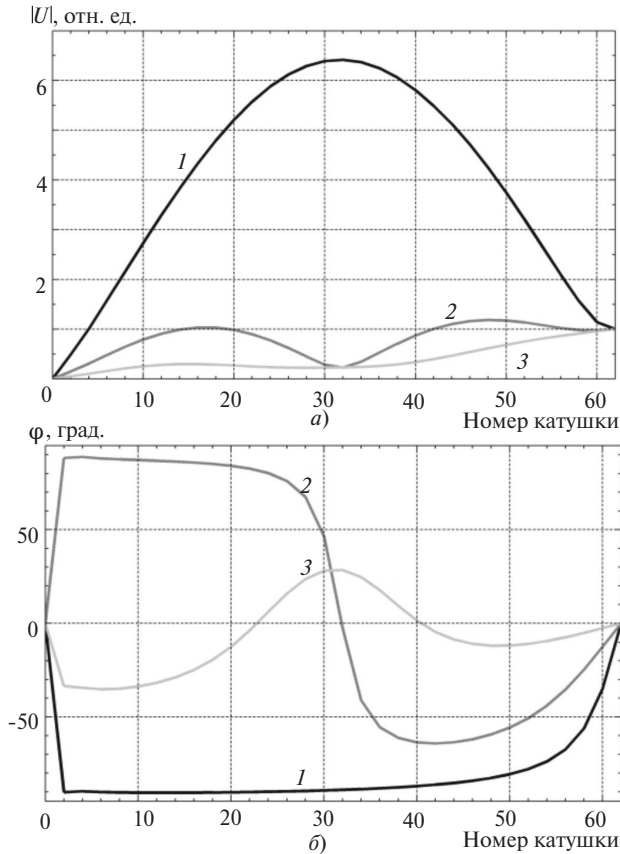


Рис. 4. Пространственные распределения амплитуды (а) и фазы (б) напряжения в полуобмотке на первой (1), второй (2) и третьей (3) собственных частотах

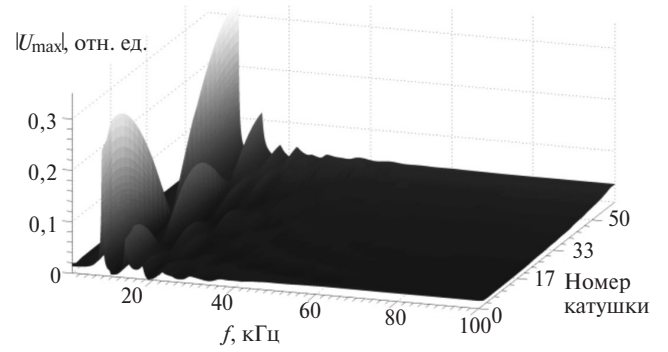


Рис. 5. Пространственное распределение напряжения на витковой изоляции обмотки ВН

ках полуобмотки, соответствующее узлам пространственного распределения напряжения. Например, на второй собственной частоте имеет место дополнительный максимум в области середины высоты полуобмотки.

Различия в оценке напряжений на участках продольной изоляции, которые возможны при учете и неучете фазовых сдвигов напряжений, показаны на рис. 6 на примере витковой изоляции переплетенных пар катушек № 61–62 и № 55–56 входной зоны полуобмотки.

Для первой пары катушек (№ 61–62), где изменение фазового сдвига наибольшее (рис. 4,б), вычисление напряжения на витковой изоляции по алгебраической разности амплитуд напряжений пере-

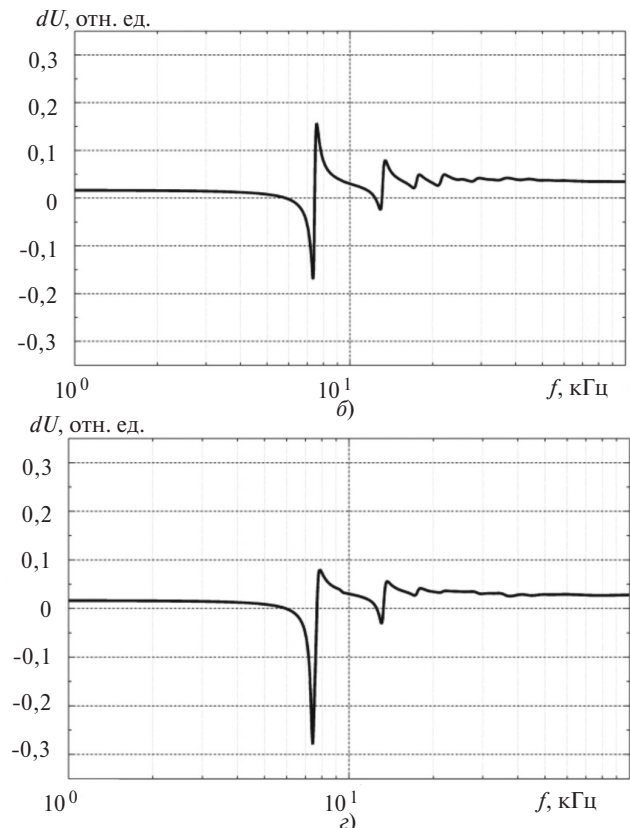
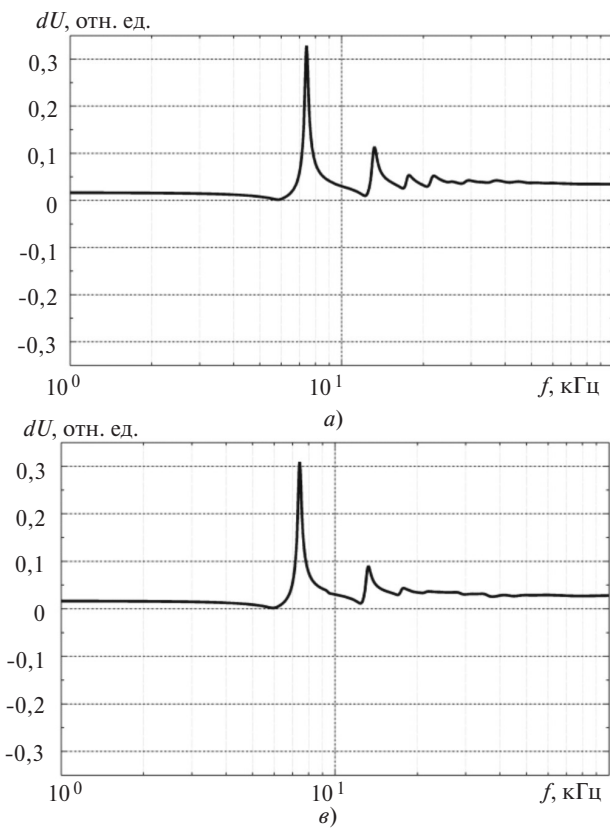


Рис. 6. Напряжения на витковой изоляции входных катушек № 61–62 (а, б) и № 55–56 (в, з) переплетенной обмотки ВН, вычисленные с учетом (а, в) и без учета (б, з) разности фаз напряжений

ходов привело к занижению воздействующего напряжения почти в 2 раза (рис. 6,а,б). Для пары катушек № 55–56, где фазовые сдвиги напряжений отличаются в меньшей степени, различия в результатах оценки напряжения на витковой изоляции также присутствуют (рис. 6,в и г), хотя и не такие большие как для катушек № 61–62.

**Выводы.** 1. Определение воздействий на главную и продольную изоляцию обмоток и оценка способности изоляции обмоток выдерживать резонансные перенапряжения на практике могут быть выполнены путем измерений передаточных функций напряжений внутренних узлов обмоток с помощью приборов для анализа частотных характеристик.

2. Передаточные функции напряжения внутренних узлов обмоток соответствуют установившимся значениям напряжения. Они не показывают возможное кратковременное переходное увеличение напряжения, и потому на частотах, отличных от резонансных, максимальная кратность напряжений может быть больше значений, определяемых по передаточным функциям. При этом передаточные функции вполне пригодны для оценки максимальных значений напряжения, достигаемых на резонансных частотах.

3. При определении воздействий на изоляцию обмоток трансформаторов и реакторов на резонансных частотах необходимо определение как амплитуды напряжений промежуточных точек обмоток, так и соответствующих фазовых сдвигов. Неучет фазового сдвига при вычислении разности потенциалов на участках изоляции обмоток может приводить к существенным ошибкам, особенно во входной зоне обмоток.

*Автор благодарит А.Ю. Волкова и К.О. Маркова за участие в измерениях, результаты которых представлены в данной статье.*

#### 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. Lapworth J.A., Jarman P.N., Breckenridge T. Transformer Internal Over-Voltages Caused By Remote Energisation. — 41th CIGRE Session, report A2-305, Paris, France, August 2006.

4. Lapworth J.A., Jarman P.N., Wang Z.D., Dragostinov S. Transformer Internal Resonant Over-voltages, Switching Surges and Special Tests. — 47th CIGRE Session, report A2-215, Paris, France, 26–31 August 2016.

5. Amir Hayati-Soloot. Resonant Overvoltages in Offshore Wind Farms: Analysis, modeling and measurement. Doctoraltheses, Norwegian University of Science and Technology, 2017.

6. Зильберман В.А. Предотвращение поврежденный трансформаторов на электростанциях с укрупненными энергоблоками, подключенными к комплектному распределительному устройству через высоковольтные кабели. — Электричество, 2017, №10, с. 47–54.

7. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках силовых трансформаторов при их взаимодействии с внешней электрической сетью. — Труды XXVII конф. «Силовые и распределительные трансформаторы. Реакторы. Системы диагностики», Москва, 5–6 июня 2018 г., доклад 2–02.

8. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.1. Условия возникновения и защитные мероприятия. — Электричество, 2015, № 11, с. 33–40.

9. Ларин В.С. Наведенные перенапряжения на холостых обмотках трансформаторов: оценка напряжений и защитные мероприятия. — Электротехника, 2015, № 7, с. 51–58.

10. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.3. Измерения напряжения в обмотках на резонансных частотах. — Электричество, 2016, № 1, с. 20–24.

11. Геллер Б. и Веверка А. Импульсные процессы в электрических машинах / Пер. с англ. М.: Энергия, 1973, 440 с.

12. Ларин В.С., Жуйков А.В., Матвеев Д.А. Подход к анализу резонансных явлений и перенапряжений, возникающих при взаимодействии силового трансформатора с электрической сетью. — Энергетик, 2013, № 12, с.21–25.

[25.07.2018]

*Автор: Ларин Василий Серафимович окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов». Начальник отдела трансформаторов ВЭИ – филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина». Регулярный член Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в комитете А2 СИГРЭ*

## The Use of Transfer Functions for Estimating the Impact on the Transformer Winding Insulation due to Resonance Overvoltages

LARIN Vasilii S. (All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia) — Head of the Department, Regular member of the CIGRE Study Committee A2 «Transformers», Cand. Sci. (Eng.)

*In recent years, damage to the winding insulation of transformers operating jointly with cable lines or extended bus work due to resonance overvoltages have been point edoutin increasingly frequent cases. For*

*checking the transformer ability to with stand the impacts of high-frequency transient oscillatory overvoltages during the iroperation, it is necessary to determine the electrical stresses applied to the winding main and longitudinal insulation under the conditions of resonance overvoltages. This problem can be solved by measuring the voltage transfer functions of the winding inner parts in a wide frequency band. The article considers some practical issuesre lating to the use of transfer functions for estimating the impacts applied to the transformer winding insulation.*

**Key words:** *transformers, windings, resonance overvoltages, winding resonance frequencies, winding insulation, transfer functions*

---

**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. **Lapworth J.A., Jarman P.N., Breckenridge T.** Transformer Internal Over-Voltages Caused By Remote Energisation. — 41th CIGRE Session, report A2-305, Paris, France, August 2006.
4. **Lapworth J.A., Jarman P.N., Wang Z.D., Dragostinov S.** Transformer Internal Resonant Over-voltages, Switching Surges and Special Tests. — 47th CIGRE Session, report A2-215, Paris, France, 26—31 August 2016.
5. **Amir Hayati-Soloot.** Resonant Overvoltages in Offshore Wind Farms: Analysis, modeling and measurement. Doctoral theses, Norwegian University of Science and Technology, 2017.
6. **Zil'berman V.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 10, pp. 47–54.
7. **Larin V.S.** *Trudy XXVII konferentsii «Silovye i raspreditel'nye transformatory. Reartory. Sistemy diagnostiki»* (Proc. of the 27th Conference «Power and Distribution Transformers. Reactors. Diagnostic Systems», Report 2—02. Moscow, 5—6 June, 2018.
8. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 11, pp. 33–40.
9. **Larin V.S.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2015, No. 7, pp. 51–58.
10. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 1, pp. 20–24.
11. **Heller B, Vyevyerka A.** *Impul'snye protsessy v elektricheskikh mashinakh* (Impulsive Processes in electric machines), 1973, 440 p.
12. **Larin V.S., Zhuikov A.V., Matveyeyev D.A.** *Energetic – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2013, No. 12, pp. 21–25.

[25.07.2018]