

## Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.4. Определение частоты колебаний напряжения в системе «питающий кабель—трансформатор»

ЛАРИН В.С.

*В переходных режимах, вызванных переключениями коммутационных аппаратов или короткими замыканиями в питающих сетях, силовые трансформаторы активно взаимодействуют с другими элементами электрических сетей, обмениваясь с ними запасенной электромагнитной энергией. Одним из проявлений такого взаимодействия является развитие высокочастотных колебаний напряжения на выводах трансформатора, питаемого через кабельную линию длиной несколько десятков – сотен метров. На примерах характерных схем и коммутаций рассмотрены переходные процессы и частота колебаний напряжения в системе «питающий кабель—трансформатор». Приведены экспериментальные результаты, показывающие влияние трансформатора на частоту колебаний напряжения в рассматриваемой системе. Предложен подход к оценке частоты колебаний напряжения в системе «питающий кабель—трансформатор» с учетом входной емкости трансформатора.*

**Ключевые слова:** обмотки трансформаторов, резонансные перенапряжения, колебания напряжения, внешняя сеть

В переходных режимах, вызванных переключениями коммутационных аппаратов или короткими замыканиями в питающих сетях, силовые трансформаторы активно взаимодействуют с другими элементами электрических сетей при обмене запасенной электромагнитной энергией. Одним из проявлений такого взаимодействия является развитие высокочастотных колебаний напряжения на выводах трансформатора, питаемого через кабельную линию длиной несколько десятков – сотен метров [1, 2]. Если частота колебаний напряжения на входных зажимах питаемого трансформатора оказывается близкой к одной из собственных частот его обмоток, то такие колебания могут инициировать развитие резонансных перенапряжений в обмотках, что представляет потенциальную опасность для внутренней изоляции трансформатора.

В период 2008–2013 гг. по линии СИГРЭ вела свою работу международная рабочая группа (РГ) А2-С4.39 «Электрические переходные взаимодействия между трансформатором и электрической системой». Итогом этой работы стала публикация технической брошюры СИГРЭ № 577 [3], где рассмотрены случаи повреждений трансформаторов в результате переходного взаимодействия, произошедших в разных странах мира. С 2015 г. начала свою работу новая РГ СИГРЭ А2-С4.52 «Высокочастотные модели трансформаторов и реакторов для исследования переходных процессов в электрических сетях», которая является логическим продолжением РГ А2-С4.39. Интерес, проявляемый по

линии СИГРЭ к вопросам переходного взаимодействия трансформаторов и резонансных перенапряжений в обмотках, не случаен, поскольку в мире продолжают фиксироваться случаи повреждений трансформаторного оборудования при воздействии высокочастотных перенапряжений. Это свидетельствует об актуальности проблемы резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов.

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

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

Краткие сведения по решению первой задачи отражены в [4]; решение второй и третьей задач достаточно подробно рассмотрено в [5, 6].

В статье более подробно рассмотрено решение первой из указанных задач – определение доминирующих частот колебаний напряжения в сети.

Следует выделить следующие случаи типовых схем энергообъектов и коммутаций [2, 7], вызывающих высокочастотные колебания напряжения в системе «питающий кабель – трансформатор»:

1) короткое замыкание (КЗ) на землю одной из фаз в начале кабельной линии; это может быть КЗ непосредственно в питающей линии, КЗ на шинах распределительного устройства (РУ), к которому подключена кабельная линия, или КЗ на соседнем кабельном присоединении на небольшом удалении от шин РУ;

2) включение под напряжение системы «питающий кабель – трансформатор» на шины, к которым подключена одна (или более) кабельная линия с идентичными параметрами примерно равной длины; такая схема широко применяется в схемах выдачи мощности гидроэлектростанций;

3) отключение холостой кабельной линии от шин, к которым подключена одна (или более) кабельная линия с идентичными параметрами и близкой по значению длиной;

4) включение под напряжение системы «питающий кабель – трансформатор» на шины, к которым подключено большое число линий с малым волновым сопротивлением.

Эти варианты имеют примерно равную частоту колебаний напряжения, которая определяется, в первую очередь, длиной линии, питающей трансформатор. Первые три случая типовых схем характеризуются воздействием на трансформатор колебательного напряжения с меньшим затуханием, чем в четвертом случае, поэтому они являются потенциально более опасными. Следует отметить характерную особенность второго случая: эта типовая схема соответствует штатной операции постановки трансформатора под напряжение; таким образом, без принятия специальных мер каждое включение трансформатора под напряжение сопровождается воздействием высокочастотных колебательных напряжений. Далее рассматриваются первые три случая типовых схем и коммутаций.

**Короткое замыкание на землю одной из фаз питающей линии.** Известно, что в случае ненагруженной кабельной линии КЗ в ее начале вызывает появление бегущей волны в линии, связанной с переходным процессом перезарядки этой линии. Бегущая волна, доходя до ненагруженного конца линии, будет отражаться с тем же знаком, а доходя до ее короткозамкнутого начала, будет отражаться с обратным знаком. Это вызовет колебания напряжения в линии с частотой  $f_{4\tau} = 1/4\tau = v/4l$ , где  $\tau$  – время пробега волны по кабелю;  $v$  – скорость пробега волны;  $l$  – длина линии.

В системе «питающий кабель–трансформатор» частота колебаний в общем случае будет отличаться

от  $f_{4\tau}$ , поскольку линия в данном случае нагружена на трансформатор.

**Схема и методика измерений.** Для изучения переходных процессов при однофазном замыкании в системе «питающий кабель–трансформатор» и определения значения доминирующей частоты колебаний были выполнены экспериментальные исследования с использованием измерительной схемы (рис. 1 и 2), содержащей следующие основные элементы:

1) источник переменного напряжения  $E$  амплитудой 10 В, частотой 50 Гц;

2) коммутатор, содержащий ключ  $K$  для выполнения замыкания на землю и токоограничивающее сопротивление  $R_3$ ;

3) кабель  $KЛ$  – высокочастотный коаксиальный марки RG-6\U; скорость распространения волны около 250 м/мкс, волновое сопротивление 75 Ом; емкость 51,5 пФ/м; коэффициент затухания на 100 м длины кабеля на частоте 10 МГц составляет 1,74 дБ (затухание в 1,22 раза);

4) «объект измерений»  $T$  – распределительный трансформатор;

5) четырехканальный цифровой осциллограф Tektronix TDS5034B: полоса пропускания 350 МГц; разрешение по вертикали 8 бит (не показан на схеме).

Исследования проведены на двух трехфазных распределительных трансформаторах (№ 1 и № 2) мощностью 1000 кВА, напряжением 10/0,4 кВ со схемой и группой соединения обмоток У/Ун-0 и Д/Ун-11 соответственно.

При измерениях использовались отрезки кабеля длиной 5, 10, 20, 40, 55, 120 и 250 м. Требуемая длина кабеля набиралась из нескольких отрезков кабеля, что позволяло варьировать общую длину кабеля с малым шагом в широком диапазоне значений. Исходя из характерных резонансных значений частоты объектов измерений, которые составляют сотни кГц, были рассмотрены значения длины кабеля  $l$  от 10 до 250 м.

Напряжение от источника синусоидального напряжения частотой 50 Гц подавалось через кабель

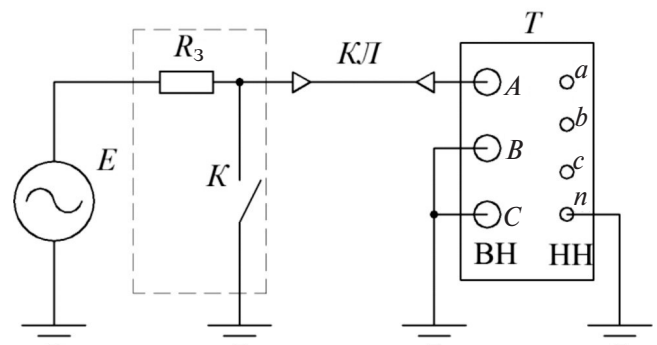


Рис. 1. Схема измерительной установки

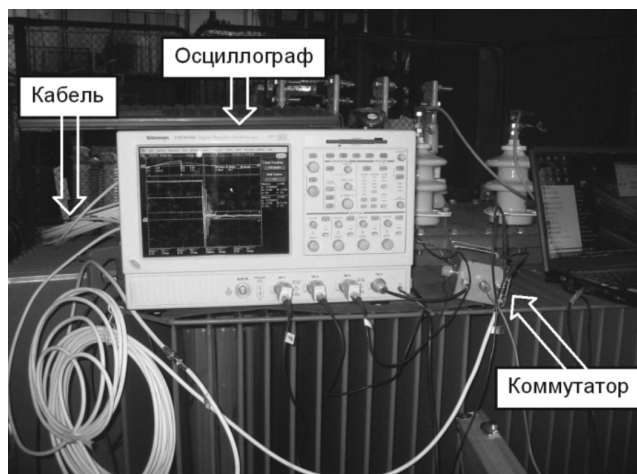


Рис. 2. Объект измерений и измерительная установка

к линейному выводу  $A$  обмотки высшего напряжения (ВН) трансформатора. При этом линейные выводы  $B$  и  $C$  обмотки ВН и вывод нейтрали  $n$  обмотки НН заземлялись.

Короткое замыкание выполнялось в начале кабеля в момент времени, когда напряжение источника было близким к амплитудному значению. В момент коммутации осциллографировались напряжения в начале кабеля, на линейном выводе  $A$  обмотки ВН и линейном выводе  $a$  обмотки низшего напряжения (НН).

**Результаты измерений и их обсуждение.** Для примера на рис. 3 приведены полученные харак-

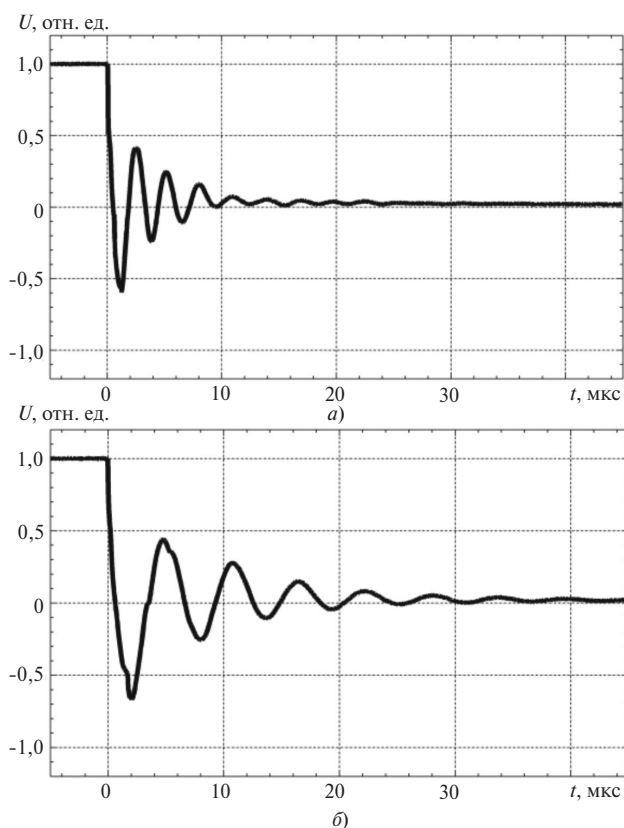


Рис. 3. Осциллограммы колебаний напряжения на стороне ВН трансформатора № 2 при длине кабеля 70 м (а) и 210 м (б)

терные осциллограммы напряжений на стороне ВН (в отн. ед. по отношению к напряжению до коммутации) трансформатора № 2 при замыкании в начале кабеля.

После обработки всех осциллограмм для рассмотренных вариантов длины кабеля  $l$  от 10 до 250 м были определены доминирующие значения частоты колебаний напряжения на стороне ВН трансформаторов № 1 и № 2. Полученные зависимости этих значений частоты от длины питающего кабеля приведены на рис. 4, где также приведена частота  $f_{4\tau}$  (кривая 3).

Доминирующие значения частоты колебаний напряжения на стороне ВН двух трансформаторов во всех случаях менее  $f_{4\tau}$ . Это различие наиболее выражено в области малых значений длины кабеля. Так, для объекта измерений № 1 при  $l=50$  м различие достигает примерно 50%, а при  $l=250$  м – около 20% по отношению к  $f_{4\tau}$ . Для объекта измерений № 2 отличия при  $l=50$  и 250 м составляют около 65 и 40% соответственно.

Нередко на практике частота колебаний в системе «питающий кабель–трансформатор» оценивается по частоте  $f_{4\tau}$ , исходя из чего длина кабеля, соответствующая «резонансной» частоте трансформатора определяется как  $l = v/4f$ . Полученные экспериментальные результаты показывают, что такая оценка может приводить к существенным погрешностям.

При значениях частоты выше нескольких килогерц входное сопротивление трансформатора имеет преимущественно емкостный характер, определяемый входными переходными емкостями  $C_T$  между линейными выводами трансформатора и землей. На основании этого оценку частоты колебаний в системе «питающий кабель–трансформатор» можно сделать при замене рассматриваемой фазы трансформатора его входной переходной емкостью  $C_T$  и эквивалентирования этой емкости отрезком разомкнутой линии соответствующей длины  $l_{\text{доп}}$ , имеющей то же входное сопротивление.

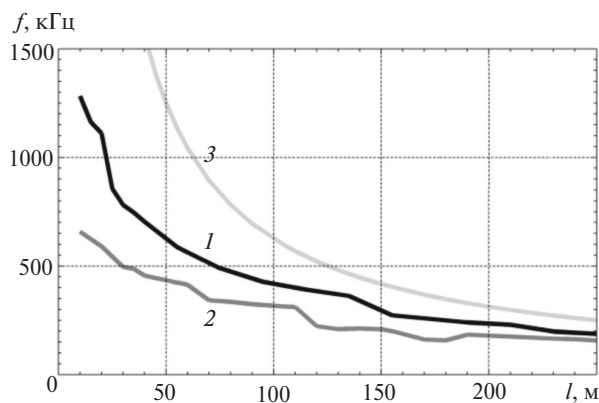


Рис. 4. Зависимость измеренных значений частоты колебаний для трансформаторов № 1 (1) и № 2 (2) и частоты колебаний  $f_{4\tau}$  (3) от длины кабеля

При допущении об отсутствии потерь в кабеле, имеющем волновое сопротивление  $Z_B$ , получаем трансцендентное уравнение для доминирующей частоты колебаний в системе «питающий кабель—трансформатор»:

$$f = \frac{v}{4l} \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \arctan(2\pi f C_T Z_B) \right], \quad (1)$$

решение которого позволяет оценить основную частоту колебаний рассматриваемой системы. Из выражения (1) следует, что эта частота определяется, в первую очередь, параметрами питающей линии, а также входной переходной емкостью трансформатора, влияние которой тем больше, чем больше частота колебаний и волновое сопротивление линии. Снижение частоты колебаний напряжения в рассматриваемой системе относительно  $f_{4\tau}$  зависит от длины кабеля. Например, при входной емкости трансформатора  $C_T = 8$  нФ и питающем кабеле длиной  $L = 100$  м с параметрами  $Z_C = 40$  Ом и  $v = 180$  м/мкс снижение частоты колебаний системы по сравнению с частотой  $f_{4\tau}$  может составлять около 35%, а при длине кабеля 50 м — примерно 50%. Таким образом, это снижение особенно сильно проявляется в области высокой частоты и малой длины кабеля.

Пренебречь последним слагаемым в выражении (1) для приближенной оценки можно лишь в случае кабельной линии, имеющей сравнительно большую длину и малое волновое сопротивление, а также в случае малой входной емкости трансформатора  $C_T$ .

В общем виде входную емкость  $C_T$  относительно одного из линейных выводов трансформатора определяет ряд факторов:

схема соединения обмоток: при соединении в треугольник к линейному выводу оказываются подключенными две обмотки, поэтому переходная емкость относительно линейного вывода оказывается вдвое больше, чем при соединении обмоток в звезду;

наличие или отсутствие заземления нейтрали обмотки (соединение в звезду) или других линейных выводов (соединение в треугольник);

наличие или отсутствие заземления выводов соседних обмоток.

Для проверки степени применимости выражения (1) выполнена приближенная оценка переходных емкостей обмотки ВН при разных вариантах соединения выводов обмоток ВН и НН трансформатора № 2. Для этого целью на линейный вывод фазы А обмотки ВН через зарядное сопротивление  $R_3 = 1500$  Ом подавалось ступенчатое напряжение. Осциллографировалось напряжение на выводе фазы А обмотки ВН, и по осциллограммам опреде-

лялась постоянная времени зарядки  $\tau_3$  обмотки ВН как время нарастания напряжения от нуля до  $(1 - e^{-1})100\% = 63,2\%$  максимального значения. Переходная емкость обмотки ВН определялась как  $C_T = \tau_3 / R_3$  и по итогам измерений составила около 4,3 нФ в случае, когда все незадействованные выводы обмоток ВН и НН изолированы от земли; около 8,3 нФ при заземлении линейных выводов фаз В и С обмотки ВН; около 8,0 нФ при заземлении выводов фаз В и С обмотки ВН и нейтрали обмотки НН.

На рис. 5 показаны экспериментально полученные для второго трансформатора доминирующие значения частоты колебаний напряжения на стороне ВН и расчетные значения частоты колебаний по уравнению (1) при  $C_T = 8$  нФ.

Видно, что оценка частоты колебаний напряжения в системе «питающий кабель—трансформатор» по выражению (1) для трансформатора № 2 дает хорошее совпадение с экспериментом. Имеющиеся небольшие отличия объясняются некоторым изменением входного сопротивления обмотки ВН при приближении к резонансным частотам. Кроме того, в результате биений напряжения видимая частота колебаний оказывается равной полусумме частоты колебания системы и резонансной частоты обмотки ВН.

$f$ , кГц

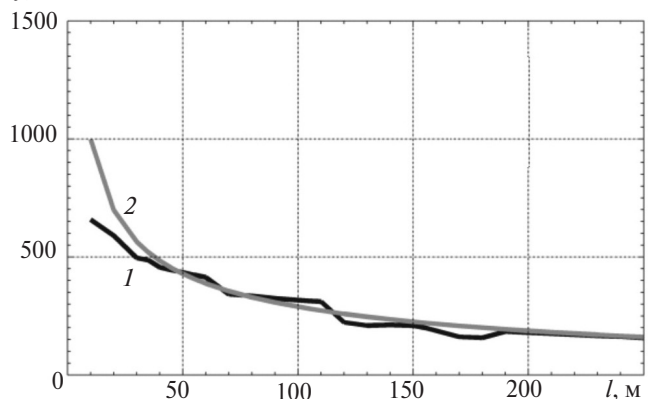


Рис. 5. Частота колебаний для трансформатора № 2: 1 — измерения; 2 — расчет по выражению (1)

Из рис. 4 и 5 также следует, что в случае сравнительно большой входной емкости  $C_T$ , например, как это имело место в рассматриваемом примере для соединенной в треугольник обмотки ВН, значения частоты колебаний в системе «питающий кабель—трансформатор» будут значительно ниже 1 МГц даже при относительно короткой длине кабеля (десятки метров).

**Высокочастотные колебания при включении под напряжение системы «питающая линия—трансформатор».** На генерирующих и сетевых энергообъектах широко применяются схемы, в которых к общим

шинам подключены присоединения, содержащие кабельные линии (КЛ) примерно равной длины и силовые трансформаторы с идентичными или очень близкими параметрами.

Рассмотрим случай включения под напряжение одного из кабельных присоединений с трансформатором (рис. 6), когда второе присоединение уже находится под напряжением, другие кабельные присоединения к шинам отключены либо отсутствуют, при этом шины питаются от воздушной линии (ВЛ) или еще одного трансформатора (СТ).

Непосредственно перед включением КЛ1 не была заряжена и имела нулевое напряжение. Включение КЛ1 под напряжение выключателем В1 в момент времени  $t=0$  вызовет появление в КЛ1 бегущей волны, вызванной переходным процессом зарядки кабельной линии. В момент времени  $t=\tau$ , где  $\tau$  – время пробега волны по КЛ1 (КЛ2), волна дойдет до ненагруженного трансформатора Т1, имеющего на высокой частоте емкостное входное сопротивление (входная переходная емкость  $C_{T1}$ ), и отразится от Т1 с тем же знаком. В момент времени  $t=2\tau$  отраженная волна дойдет до сборных шин. Поскольку к шинам в общем случае помимо КЛ2 подключены другие присоединения, будет иметь место преломление волны, пришедшей от Т1. В результате лишь часть набегающей от КЛ1 волны пойдет далее в КЛ2, что приведет к снижению максимального напряжения волны, преломленной в КЛ2. Затем бегущая в КЛ2 волна отразится от трансформатора Т2 с тем же знаком и в момент времени  $t=4\tau$  дойдет до сборных шин. Преломление волны из КЛ2 в КЛ1 при набегании на сборные шины вызовет следующий цикл переходного процесса.

Трансформаторы Т1 и Т2, имеющие входные переходные емкости  $C_{T1}$  и  $C_{T2}$ , могут быть эквивалентированы отрезками разомкнутых линий длиной  $l_{доп1}$  и  $l_{доп2}$ . Частота колебаний в линии эквивалентной длины  $l_{эКВ} = 2l + l_{доп1} + l_{доп2}$ , разомкнутой с двух сторон, при близких значениях  $l_{доп1}$  и

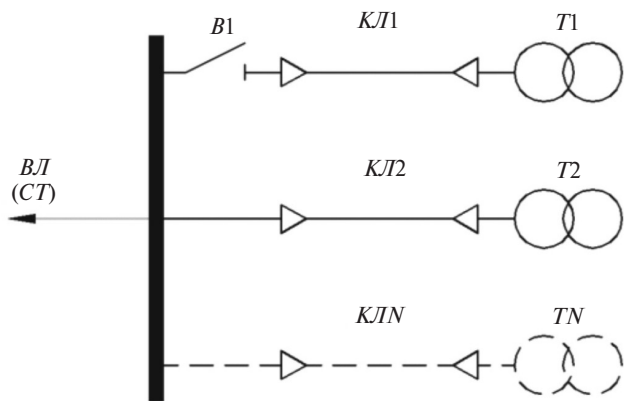


Рис. 6. Фрагмент схемы с кабельными присоединениями и трансформаторами

$l_{доп2}$  эквивалентна частоте колебаний в линии длиной  $l_{эКВ} = l + l_{доп1}$ , замкнутой в начале и разомкнутой на конце. Таким образом, для приближенной оценки доминирующих значений частоты колебаний напряжения в рассматриваемой системе вполне приемлемы результаты, полученные ранее для случая короткого замыкания на землю в начале питающего кабеля. При значительно отличающихся входных емкостях трансформаторов  $C_{T1}$  и  $C_{T2}$  приближенная оценка доминирующих значений частоты колебаний напряжения на трансформаторах может быть выполнена по усредненному значению входной емкости двух трансформаторов.

Аналогичный переходный процесс будет иметь место в случае, если к шинам подключены три и более кабельных присоединения с трансформаторами. В этом случае при набегании на сборные шины отраженная от Т1 волна разделится между другими включенными параллельно кабельными линиями (КЛ2, КЛ3, ..., КЛN) и после переотражений от их концов вновь сложится в общей точке их подключения – сборных шинах. Частота колебаний напряжения в системе при этом идентична рассмотренному ранее случаю с двумя кабельными присоединениями.

Из рассмотрения переходных процессов в системе, содержащей два и более присоединения с кабельными линиями и трансформаторами, можно сделать следующий важный вывод. Подключение к сборным шинам большого числа кабельных или воздушных линий, длина которых много больше длины КЛ, питающих трансформаторы, приводит к росту убыли энергии из системы из-за преломлений волн, что влечет быстрое затухание переходных процессов в системе. Наименьшим затуханием характеризуется схема или режим работы, в которых к шинам подключена только одна питающая воздушная линия или воздушная ошиновка от еще одного силового трансформатора (автотрансформатора). Случай с наименьшим затуханием является наиболее опасным, поскольку при воздействии слабозатухающих колебательных напряжений в обмотках трансформаторов могут развиваться резонансные перенапряжения с большей кратностью.

**Высокочастотные колебания при отключении системы «питающая линия–трансформатор» от сборных шин.** Возникновение опасных колебаний напряжений в схеме рис. 6 возможно также при отключении одной из ненагруженных кабельных линий.

В [8] описан интересный случай повреждения силового оборудования гидроэлектростанции, вызванного отключением разъединителем КРУЭ 500 кВ холостой кабельной линии 500 кВ (КЛ2), соединяющей КРУЭ и сдвоенный энергоблок № 2 из двух генераторов и двух генераторных трансформаторов (Т3 и Т4). В момент коммутации к шинам

500 кВ были подключены две кабельные линии 500 кВ длиной около 600 м (*КЛ1* и *КЛ3*), каждая из которых была нагружена на один холостой генераторный трансформатор (*T1* и *T5* соответственно), а также две другие кабельные линии 500 кВ длиной около 500 м, связывающие КРУЭ 500 кВ с автотрансформаторами связи 500/220 кВ. Как отмечается в [8], в результате перенапряжений, вызванных коммутацией разъединителя КРУЭ 500 кВ, были повреждены генераторный трансформатор *T5*, в котором произошел пробой изоляции фазы *A* обмотки высшего напряжения (ВН), и трансформатор собственных нужд 630 кВА 15,75/0,4 кВ, подключенный к вторичной обмотке трансформатора *T1*. При этом в фазе *A* разъединителя КРУЭ были отмечены шум и утечка элегаза.

Принимая во внимание, что повреждение оборудования произошло непосредственно после коммутации холостой кабельной линии 500 кВ разъединителем КРУЭ, наиболее вероятной причиной произошедшего являются высокочастотные перенапряжения, вызванные переходными процессами в кабельных линиях примерно равной длины (*КЛ1*, *КЛ2* и *КЛ3*) в результате повторного зажигания дуги в разъединителе. Причиной повреждения обмотки ВН трансформатора *T5* с большой вероятностью являются резонансные перенапряжения, вызванные высокочастотными колебаниями напряжения в системе «питающий кабель – трансформатор», а повреждение ТСН связано с наведенными перенапряжениями [9–10], возникшими на стороне низшего напряжения (НН) при воздействии высокочастотных перенапряжений на обмотку ВН трансформатора *T1*.

Известно, что при отключении емкостной нагрузки разъединителем, контакты которого расходятся сравнительно медленно, возможны многократные погасания и повторные зажигания дуги между его контактами. При первом погасании дуги в момент нуля емкостного тока 50 Гц напряжение на *КЛ2* будет максимально. Эта линия отключена с двух сторон, к ней не подключены генераторные трансформаторы *T3* и *T4*, а потому остаточный заряд и напряжение на *КЛ2* могут оставаться длительно. При смене полярности напряжения на шинах 500 кВ напряжение, приложенное к межконтактному промежутку разъединителя, может превысить электрическую прочность промежутка и произойдет повторное зажигание дуги между контактами. Это повторное зажигание приведет к переходному процессу перезарядки *КЛ2* и многократным переотражениям волн во всех пяти кабельных линиях 500 кВ, подключенных к КРУЭ 500 кВ. В этом переходном процессе наибольшие напряжения развиваются на концах кабельных линий *КЛ1*, *КЛ2* и *КЛ3*, имеющих примерно равную длину. По-

сле каждого погасания в разъединителе дуги повторного зажигания на кабельной линии *КЛ2* будет оставаться некоторое остаточное напряжение. Каждое последующее повторное зажигание в разъединителе будет вызывать повторные циклы колебаний напряжения в кабельных линиях 500 кВ.

Несмотря на то что высокочастотным колебаниям напряжения предшествовала операция отключения кабельной линии, по сути своей этот случай идентичен рассмотренному ранее включению кабельной линии под напряжение. При этом он является потенциально более опасным из-за больших колебательных напряжений, воздействующих на трансформаторы, поскольку в момент повторного зажигания напряжение между контактами разъединителя может превышать амплитудное рабочее напряжение.

*Автор выражает благодарность А.Ю. Волкову и И.С. Иванову за участие в измерениях, результаты которых представлены в статье.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Larin V., Matveev D., Volkov A.** Study of transient interaction in a system with transformer supplied from network through a cable: assessment of interaction frequencies and resonance evolvment. — Proc. of the 3rd Intern. Colloquium Transformer Research and Asset Management, Split, Croatia, October 15–17, 2014.
2. **Ларин В.С.** Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.1. Условия возникновения и защитные мероприятия. — *Электричество*, 2015, № 11, с. 33–40.
3. **CIGRE Brochure 577A.** «Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 1: Expertise», 2014.
4. **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.
5. **Ларин В.С., Волков А.Ю.** Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.2. Определение резонансных частот обмоток. — *Электричество*, 2015, № 12, с. 20–25.
6. **Ларин В.С.** Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.3. Измерения напряжения в обмотках на резонансных частотах. — *Электричество*, 2016, № 1, с. 20–24.
7. **Gustavsen B.** Study of Transformer Resonant Overvoltages Caused by Cable-Transformer High-Frequency Interaction. — *IEEE Trans. on Power Delivery*, April 2010, vol. 25, No. 2, pp. 770–779.
8. **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.
9. **Ананянц С.С., Кузьмичева К.И., Хуртин В.А., Двинянинов В.И.** Влияние режимов работы ОРУ ВН ГЭС на перенапряжения в системе генераторного напряжения. — *Электрические станции*, 2010, № 2, с. 48–53.
10. **Ларин В.С.** Наведенные перенапряжения на холостых обмотках трансформаторов: оценка напряжений и защитные мероприятия. — *Электротехника*, 2015, № 7, с. 51–58.

[25.04.2018]

*Автор: Ларин Василий Серафимович окончил Институт электроэнергетики МЭИ в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета*

внутренней изоляции силовых трансформаторов». Начальник отдела трансформаторов ФГУП ВЭИ. Регулярный член Исследовательского комитета А2

«Трансформаторы» СИГРЭ и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в комитете А2 СИГРЭ.

*Elektrichestvo*, 2018, No. 9, pp. 22–28

DOI:10.24160/0013-5380-2018-9-4-22-28

## Resonance Overvoltages in Transformer Windings – Part 4: Determination of Oscillation Frequencies in «Feeding Cable – Transformer» System

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

*During the transients caused by switching devices or short circuit in the supply networks, power transformers actively interact with other elements of electrical networks, exchanging stored electromagnetic energy. This interaction can be accompanied by development of high-frequency voltage fluctuations at the transformer terminals supplied through a cable line having a length of several tens or hundreds of meters. The article considers transients and voltage oscillation frequencies in the system «feeding cable – transformer» for typical schemes and switching operations. Experimental results showing the influence of the transformer on voltage oscillation frequencies in the system under consideration are presented. An approach to estimating the voltage oscillation frequencies in the «feeding cable – transformer» system taking into account the transformer surge capacitance is proposed.*

**Key words:** transformer windings, resonance overvoltages, voltage oscillation frequencies, external network

### REFERENCES

1. **Larin V., Matveyev D., Volkov A.** Study of transient interaction in a system with transformer supplied from network through a cable: assessment of interaction frequencies and resonance evolution. – Proc. of the 3rd Intern. Colloquium Transformer Research and Asset Management, Split, Croatia, October 15–17, 2014.
2. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 11, c. 33–40.
3. **CIGRE Brochure 577A.** «Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. Part 1: Expertise», 2014.
4. **Larin V.S., Zhuikov A.V., Matveyev D.A.** *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2013, No. 12, pp. 21–25.
5. **Larin V.S., Volkov A.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 12, pp. 20–25.
6. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 1, pp. 20–24.
7. **Gustavsen B.** Study of Transformer Resonant Overvoltages Caused by Cable-Transformer High-Frequency Interaction. – IEEE Trans. on Power Delivery, April 2010, vol. 25, No. 2, pp. 770–779.
8. **Zil'berman V.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 10, pp. 47–54.
9. **Ananyants S.S., Kuz'micheva K.I., Khurtin V.A., Dvinyaninov V.I.** *Elektriicheskiye stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2010, No. 2, pp. 48–53.
10. **Larin V.S.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2015, No. 7, pp. 51–58.

[25.04.2018]