

Изучение резонансных перенапряжений трансформатора, вызванных высокочастотным взаимодействием кабеля и трансформатора

Бйорн Густавсен, *Старший член IEEE*

Резюме — Силовые трансформаторы могут отказать из-за электростатического напряжения, вызванного электромагнитными переходными процессами. В данной статье рассматривается особое явление, при котором перенапряжение вызывается резонансом. Это может возникнуть в случае, когда трансформатор на стороне высокого напряжения подключен к кабелю, а сторона низкого напряжения не нагружена. На стороне низкого напряжения может возникнуть очень высокое перенапряжение, вызванное переходными состояниями, которые приводят к незначительно ослабленному перенапряжению в кабеле с преобладающей частотой, совпадающей с резонансным пиком в коэффициенте трансформации по напряжению. Лабораторные испытания с распределительным трансформатором 11 кВ/230 В показали, что при возбуждении шаговым напряжением кабеля длиной 27 м появляется перенапряжение 24 ед. мощности на разомкнутой стороне низкого напряжения. Формы кривой напряжения точно воспроизводятся моделью «черный ящик», полученной по измерениям качания частоты. Моделирование показало, что при наиболее неблагоприятной длине кабеля может возникнуть перенапряжение до 43 ед. мощности. Далее показано, что перенапряжение на ненагруженной стороне низкого напряжения трансформатора может быть вызвано следующими ситуациями: 1) возникновением короткого замыкания на дальнем конце кабеля, 2) включением кабеля от шины с несколькими другими подключенными кабелями, 3) включением кабеля от другого кабеля такой же длины, и 4) включением батареи конденсаторов на дальнем конце кабеля.

Ключевые термины — кабель, перенапряжение, резонанс, трансформатор.

I. Введение

ТРАНСФОРМАТОРЫ могут быть подвержены диэлектрическому отказу из-за высокочастотных переходных состояний, вызванных сетью, например, операций переключения и отказов, а также атмосферных разрядов. Один пример описан в [1], где генераторный повышающий трансформатор вышел из строя по причине отказа шины. Увеличивающееся число диэлектрических отказов трансформаторов в последние годы заставило CIGRE основать (2008) новую Рабочую группу (A2/C4.39), занимающуюся оценкой типов взаимодействия между трансформатором и сетью при переходных состояниях.

Электростатические напряжения, возникающие в обмотках трансформаторов, изучались во многих работах [2]-[8]. Расчет данных внутренних перенапряжений требует детального геометрического трансформатора. Поскольку такая информация является собственностью производителя, подобные анализы трудно провести на практике. Кроме того, чувствительность модели к геометрии и свойствам материала делает труднодостижимым высокий уровень точности.

Также важное значение имеет оценка внешних перенапряжений в трансформаторах. Перенос грозовых перенапряжений между обмотками изучался в [9]-[12] и показывает, в принципе, что при включении ненагруженного трансформатора по кабелю может возникнуть перенапряжение во вторичной обмотке из-за явления резонансного перенапряжения. Для расчета внешних перенапряжений обычно используются модели типа «черный ящик» [8]-[10], [13]-[17], поскольку они не требуют информации о геометрии трансформатора и могут воспроизводить поведение клемм трансформатора с высокой степенью точности. Эти модели оптимально подходят для исследования поведения трансформатора при установке в данной сети, поскольку они позволяют непосредственно имитировать переходное взаимодействие между сетью и трансформатором. Модели «черный ящик», как правило, строятся на основе измерений качания частоты на клеммах трансформатора с последующим рациональным приближением функции. Процесс рационального подбора часто основывается на каком-либо варианте метода векторного подбора [18] с последующим смещением [19] для усиления пассивности. Такие модели можно легко связать с программами моделирования типа EMTP [20] по сосредоточенной электрической сети [13], либо путем численного интегрирования уравнений состояния [21], [22].

Настоящая статья ставит перед собой следующие цели: 1) показать, что модели «черный ящик» могут достаточно точно представлять явление резонансного перенапряжения и 2) определить ситуации, вызывающие чрезмерное (внешнее) резонансное перенапряжение. Исследование основано на лабораторных измерениях с распределительным трансформатором 11 кВ/230 В, подключенным к (питающему) кабелю на стороне высокого напряжения. Подача шагового напряжения к кабелю приводит к появлению резонирующего напряжения на открытой стороне низкого напряжения. Такая ситуация соответствует возникновению короткого замыкания в кабеле. Формы кривой перенапряжения сравниваются с кривыми, полученными с помощью модели «черный ящик» трансформатора и кабеля. С помощью полученной модели трансформатора рассчитывается максимальное перенапряжение трансформатора при различных длинах кабеля, а также при разных нагрузках на стороне низкого напряжения. Наконец, уровень резонирующих перенапряжений исследуется для других трех важных ситуаций. Включение осуществляется по питающему кабелю от шины, подключенной к нескольким другим кабелям, включение осуществляется по питающему кабелю от другого кабеля аналогичной длины, и включение от батареи конденсаторов на дальнем конце питающего кабеля.

II. Резонансное перенапряжение трансформатора

A. Явление резонансного перенапряжения

В источниках [11] и [12] описано так называемое резонансное перенапряжение, могущее привести к повышению переходных напряжений. Это явление можно понять по схеме на рис. 1.

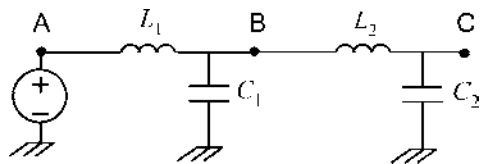


Рис. 1. Две последовательно соединенные цепи RLC.

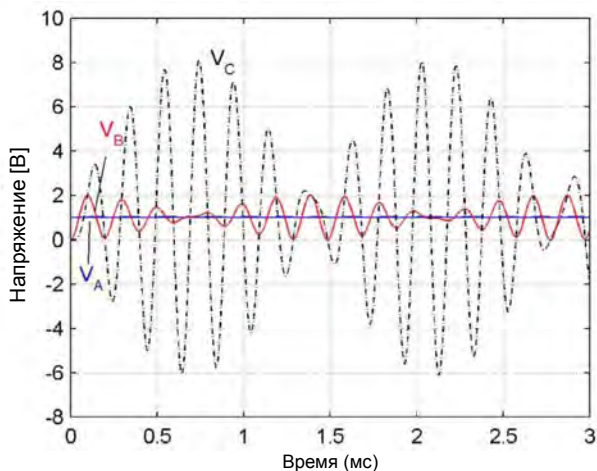


Рис. 2. Возбуждение единичным перепадом напряжения. Напряжение в точках А, В и С на Рис. 1.

Цепь, образованная L_1 и C_1 , возбуждается единичным перепадом напряжения, вызывая осциллирующее напряжение в точке В с частотой $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$. Вторая цепь подключается к точке В, образованной L_2 и C_2 . Если вторая цепь (цепь #2) имеет резонансную частоту $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$, которая равна (или почти равна) ω_1 , а волновое полное сопротивление цепи #2 гораздо выше, чем в цепи #1, $\sqrt{L_2/C_2} \gg \sqrt{L_1/C_1}$, возможно возникновение резонансного перенапряжения. Это показано на рис. 2 для возбуждения единичным перепадом напряжения. Энергия передается между двумя цепями, вызывая наблюдаемое явление колебания. Пиковая величина напряжения в цепи #2 выше, чем в цепи #1, по причине меньших значений в цепи. По соотношению энергии $W = C_1 V_1^2/2 = C_2 V_2^2/2$, пиковая величина колебательной составляющей напряжения V_2 в цепи #2 равно примерно $\sqrt{C_1/C_2}$, или 7,1 при данных значениях в цепи. На рис. 2 напряжение изменяется от -6 В до +8 В по мере его колебания вблизи приложенного напряжения (+1 В).

В. Резонанс между кабелем и трансформатором

Перенос напряжения между обмотками в трансформаторе значительно изменяется в зависимости от частоты, поскольку перенос напряжения при высокой частоте не регулируется балансом ампер-витки. При увеличении частоты поток в железном сердечнике уменьшается, и коэффициент трансформации в конечном счете определяется индуктивностью рассеяния и емкостью между витками обмотки и между обмотками. Это приводит к резонансным пикам в переносе напряжения со стороны высокого напряжения на сторону низкого напряжения, которые часто намного превышают коэффициент трансформации при рабочей частоте (50 Гц/60 Гц). Как правило, импеданс клемм трансформатора намного выше на стороне высокого напряжения, чем на стороне низкого напряжения (из-за большего числа витков), и особенно высок в ситуациях, когда обмотка низкого напряжения ненагружена. Таким образом, внешние перенапряжения в трансформаторе могут возникнуть при наличии следующих условий.

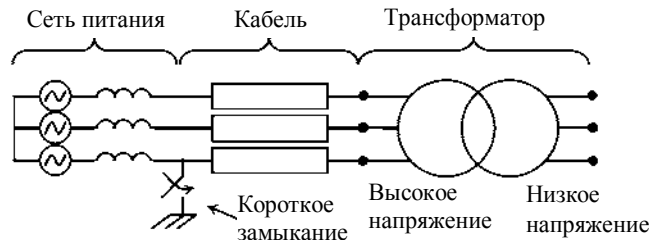


Рис. 3. Короткое замыкание на стороне высокого напряжения трансформатора. Однофазный рисунок.

- 1) Переходное состояние возникает на стороне высокого напряжения с разомкнутой стороной низкого напряжения, либо подключенной к нагрузке с высоким импедансом.
- 2) Переходное состояние имеет преобладающую частоту, соответствующую резонансному пику в переходе напряжения от высокого к низкому.
- 3) Входной импеданс в обмотке высокого напряжения (с разомкнутой стороной низкого напряжения) достаточно высокий, чтобы влияние нагрузки трансформатора не вызвало существенного уменьшения напряжения на стороне высокого напряжения.

Отметим, что данные условия похожи на условие резонансного перенапряжения, описанное в разделе II-A. Далее описаны четыре важных случая, при которых в ненагруженном трансформаторе может возникнуть перенапряжение.

Случай 1) Возникновение короткого замыкания (рис. 3). При возникновении короткого замыкания на дальнем конце питающего кабеля, соединенного со стороной высокого напряжения ненагруженного трансформатора, между двумя концами кабеля распространяется коаксиальная волна. Это приводит к появлению осциллирующего напряжения на конце кабеля. Поскольку кабель имеет низкое характеристическое сопротивление, которое при высоких частотах может быть намного ниже, чем на стороне высокого напряжения трансформатора, трансформатор может обеспечить только незначительное ослабление перенапряжения кабеля. Если частота резонансного напряжения кабеля совпадает с пиком в переносе напряжения со стороны высокого напряжения на сторону низкого напряжения, на стороне низкого напряжения может возникнуть значительное перенапряжение. Данная ситуация аналогична Рис. 1, на котором цепи #1 и #2 обозначают кабель и трансформатор.

Случай 2) Включение кабеля (рис. 4). Если питающий кабель переключается на шину, подключенную к нескольким другим кабелям, импеданс шины от питающего кабеля будет намного меньше, чем характеристический импеданс кабеля. Поэтому шина является источником шагового напряжения с низким импедансом, и в кабеле трансформатора на несколько циклов может возникнуть осциллирующее напряжение. Перенапряжение может возникнуть на стороне низкого напряжения трансформатора из-за резонанса, аналогично случаю с коротким замыканием.

Случай 3) Включение кабеля (рис. 5). При замене питающего кабеля на кабель такой же длины на конце кабеля со слабым затуханием возникнет осциллирующее напряжение.

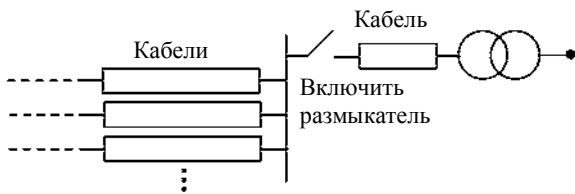


Рис. 4. Включение трансформатора по кабелю с шиной, подключенной к нескольким кабелям. Трехфазный рисунок.

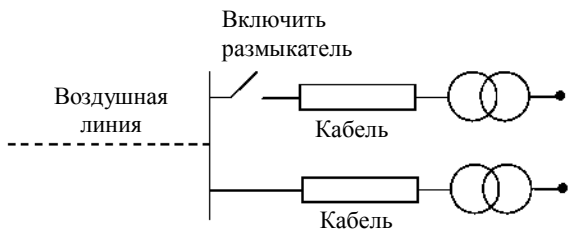


Рис. 5. Соединение двух кабелей одинаковой длины.

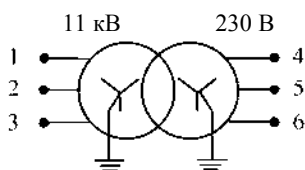


Рис. 6. Распределительный трансформатор 300 кВА.

И снова перенапряжение может возникнуть на стороне низкого напряжения из-за резонанса.

Случай 4) Включение батареи конденсаторов. Если батарея конденсаторов переключается на шину, присоединенную к стороне высокого напряжения ненагруженного трансформатора по кабелю, напряжение сначала упадет до нуля на шине, а затем на конце кабеля. Это может вызвать перенапряжение на стороне низкого напряжения трансформатора, аналогично случаю с коротким замыканием. Данные случаи будут проанализированы с помощью численного моделирования в Разделах IV, V-A, V-B и VI соответственно.

III. Моделирование для повторения экспериментальных результатов

A. Моделирование трансформатора

Используется трансформатор 11-кВ/ 230 В с номинальной мощностью 300 кВА, подключенный по схеме звезда-звезда с заземленными нейтралью (см. рис. 6). Широкополосное моделирование данного трансформатора будет рассмотрено в другой статье, поэтому упомянем только основные моменты. Анализатор сетей (Anritsu MS4630B) используется для измерения матрицы полных проводимостей на клеммах Y в диапазоне 10 Гц-10 МГц с помощью схемы измерения, аналогичной представленной в [15]. Воздействие измерительных кабелей устраняется, давая описание относительно клемм трансформатора. Матрица полной проводимости подвергается рациональному приближению по модели (1). Модель рассчитывается путем векторного подбора [18], [24], [25] с помощью 100 членов вычета в полюсе в диапазоне 50 Гц-10 МГц с последующим усилением пассивности путем вычета

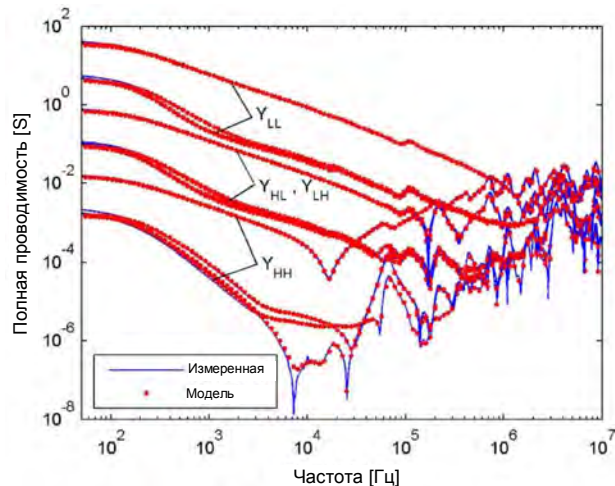


Рис. 7. Измеренная и подогнанная матрица полных проводимостей.

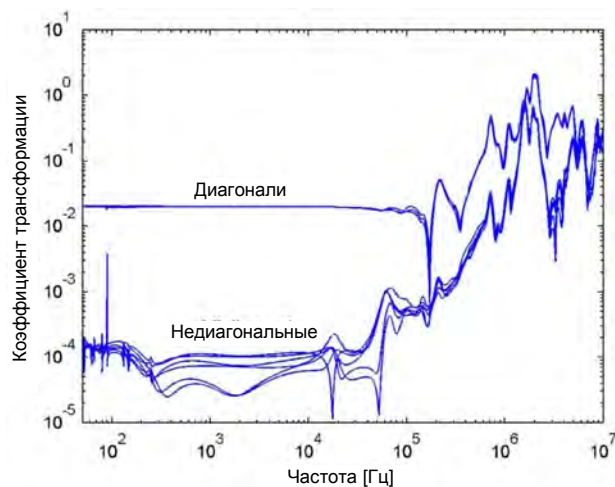


Рис. 8. Коэффициент напряжений от высокого к низкому, рассчитанный по модели.

остатка [19], [26]. Модель симметричная, причинная, и имеет только стабильные полюса.

$$Y(\omega) = \sum_{m=1}^N \frac{R_m}{j\omega - a_m} + R_0. \quad (1)$$

Измеренная матрица полных проводимостей и результат рационального подбора показан на рис. 7. (График характеристики модели включает только часть образцов, чтобы отрицательные пики в измерении не были хорошо разрешены). Метки на графике соответствуют разбиению матрицы в (2).

$$\begin{bmatrix} i_H \\ i_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{HH} & Y_{HL} \\ Y_{LH} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_H \\ v_L \end{bmatrix}. \quad (2)$$

По разбиению в (2) получим коэффициент трансформации H_{LH} , используя (3). H_{LH} – это матрица 3 x 3, соотносящая вектор приложенного напряжения V_H на стороне высокого напряжения с характеристикой V_L на разомкнутой стороне низкого напряжения. Коэффициент трансформации показан на рис. 8. Наблюдается, что коэффициент напряжений при частоте выше 100 кГц намного выше, чем при 50 Гц.

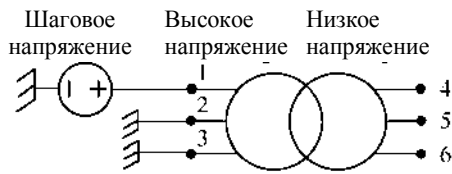


Рис. 9. Возбуждение шаговым напряжением.

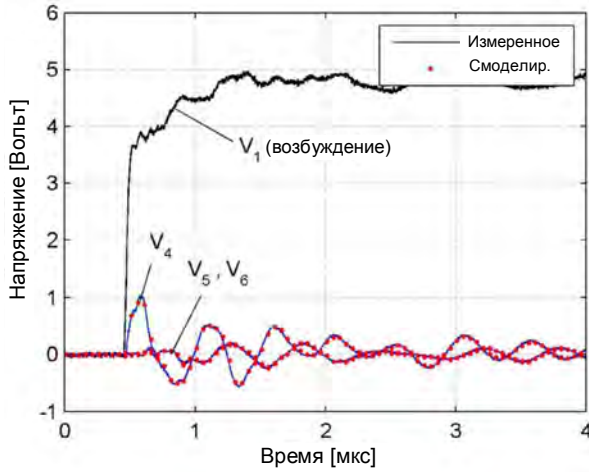


Рис. 10. Измеренный и моделированный отклик.

В принципе, стационарное возбуждение 1 В на клемме #1 с заземленными клеммами #2 и #3 даст напряжение 2 В на стороне низкого напряжения

$$\mathbf{H}_{LH} = -\mathbf{Y}_{LL}^{-1} \mathbf{Y}_{LH}. \quad (3)$$

Аналог временной области рисунка 8 можно определить путем возбуждения одного из высоковольтных выводов шаговым напряжением при заземленных двух других выводах (см. рис. 9). Результирующие характеристики напряжения на стороне низкого напряжения соответствуют одной графе \mathbf{H}_{LH} . На рис. 10 показано, что измеренная характеристика напряжения на стороне низкого напряжения сильно колеблется. На этом же графике показано имитированная характеристика напряжения, когда приложенное напряжение (возбуждение) является идеальным источником напряжения. Точное соответствие между измерением и моделированием подтверждает точность модели. Также отметим, что компонент 2 МГц в передаче по напряжению (рис. 8) наблюдается в отклике временной области (рис. 10).

В. Моделирование кабеля

К трансформатору присоединен одножильный кабель 240 мм² 12 кВ. Как правило, кабели моделируются с помощью частотно-зависимой модели бегущей волны, полученной по описанию геометрии [27], [28]. Поскольку высокочастотные характеристики модели весьма чувствительны к неточностям в описании геометрии кабеля, сначала мы смоделируем кабель с помощью подхода, основанного на измерении. Таким образом, будет легче сконцентрировать внимание на точности модели трансформатора. Затем мы используем модель, полученную по описанию геометрии, для прикладного анализа с разными длинами кабелей.

Используя измерения качания частоты, получаем матрицу полных проводимостей 2 x 2 \mathbf{Y} относительно двух концов участка кабеля длиной 27 м, в диапазоне 100 кГц-50 МГц.

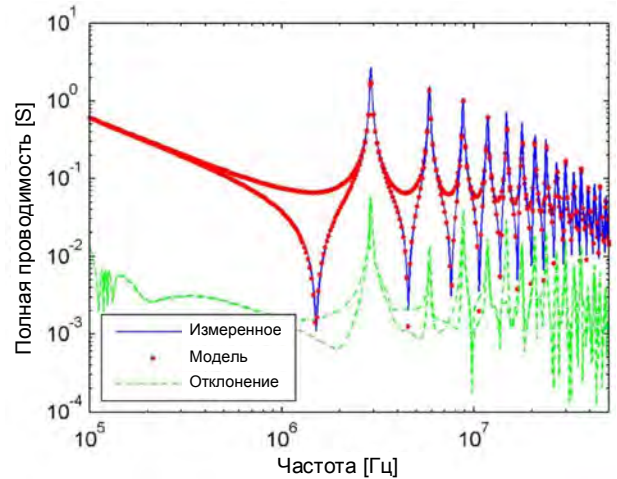


Рис. 11. Измеренная и подогнанная матрица полных проводимостей кабеля.



Рис. 12. Возбуждение кабеля прямоугольным импульсом напряжения с дальним концом, заземленным резистором 50 Ом.

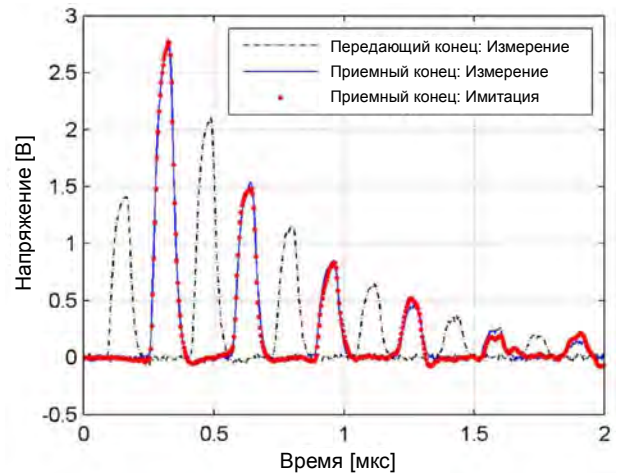


Рис. 13. Напряжение передающего и приемного конца кабеля.

Матрица полных проводимостей получается по коэффициенту трансформации между двумя концами кабеля, при этом дальний конец разомкнут или оканчивается резистором 50 Ом. Подробная информация приведена в Приложении. На рис. 11 показана полученная матрица полных проводимостей и ее приближение по рациональной модели (1), полученной путем векторного подбора и усилением пассивности путем вычета остатка.

Чтобы проверить точность модели кабеля во временной области, приложим импульс напряжения к одному концу кабеля (передающему) и измерим характеристику на приемном конце, который оканчивается резистором 50 Ом, см. рис. 12. Приложенное напряжение используется в качестве идеального источника напряжения в моделировании характеристики напряжения на приемном конце. На рис. 13 сравниваются измеренное и моделированное напряжение на приемном конце, что показывает очень хорошее соответствие.

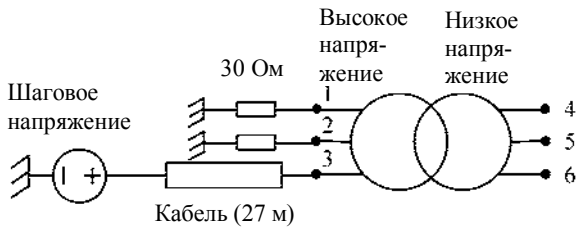


Рис. 14. Обзор системы.



Рис. 15. Соединения с трансформатором.

Колебания возникают потому, что характеристическое сопротивление кабеля не соответствует сопротивлению 50-11 источника и нагрузки. Хорошее соответствие означает, что модель кабеля имеет правильное характеристическое сопротивление и временную задержку.

IV. ВОЗНИКНОВЕНИЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПИТАЮЩЕМ КАБЕЛЕ

В ходе лабораторного эксперимента кабель подключается к клемме #3 на стороне высокого напряжения трансформатора, см. рис. 14. Клеммы #1 и #2 заземляются с помощью резисторов 30 Ом, что дает сопротивление нагрузки, немного отличающееся от характеристического сопротивления кабеля. Сторона низкого напряжения остается разомкнутой. Источник шагового напряжения с очень низким внутренним сопротивлением подключается к передающему концу кабеля, в результате чего возникает колебание напряжения в кабеле. Ситуация схожа со случаем короткого замыкания на рис. 3 в том плане, что импеданс нагрузки трансформатора является основным источником ослабления осциллирующего напряжения в кабеле. В лабораторной установке кабель присоединяется с помощью коротких соединительных проводов, чтобы уменьшить влияние паразитных сопротивлений, см. рис. 15.

На рис. 16 показано напряжение на передающем конце кабеля (возбуждение) и приемном конце перед подключением трансформатора. Видно, что напряжение колеблется с очень небольшим ослаблением. Используя измеренное напряжение на передающем конце в качестве идеального источника напряжения в моделировании, модель кабеля достаточно точно воспроизводит характеристику напряжения на приемном конце.

На рис. 17 показан такой же результат, что и на рис. 16, но после подключения трансформатора. Видно, что трансформатор вызывает значительное ослабление напряжения на дальнем конце кабеля (V_3). На графике также показано напряжение на клеммах #5 и #6 стороны низкого напряжения (V_5, V_6). Видно, что напряжение на стороне низкого напряжения достигает значения, равного примерно 50% напряжения возбуждения на

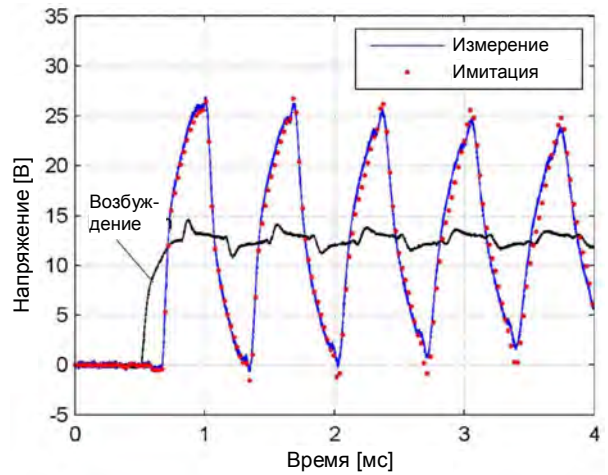


Рис. 16. Перенапряжение на передающем конце кабеля (возбуждение) и приемном конце (измерение/моделирование) при отсоединенном трансформаторе.

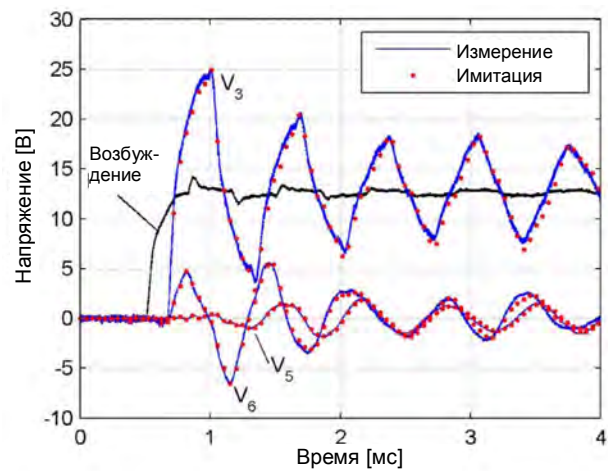


Рис. 17. Перенапряжение при подключенном трансформаторе.

передающем конце кабеля. Коэффициент трансформации равен 11000/230 (т.е. 48:1). Это значит, что вторичное напряжение достигает значения 24 ед. мощности нормального напряжения между фазой и землей. Так, если бы накладывающееся напряжение (передающий конец) было бы равно нормальному напряжению между фазой и землей (т.е. 8,9 кВ), переходное напряжение на стороне 230 В достигло бы 4,4 кВ. На этом же графике также показаны моделированные формы кривой напряжения с напряжением передающего конца кабеля в качестве источника идеального напряжения. Соответствие измеренным величинам очень хорошее.

Для сравнения, непосредственное возбуждение шаговым напряжением на рис. 10 (без кабеля) вызывает перенапряжение 12 ед. мощности на стороне низкого напряжения. Более высокое напряжение на рис. 17 вызвано резонансом между кабелем и трансформатором. В данном случае резонанс ведет к удвоению пикового напряжения по сравнению с непосредственным возбуждением шаговым напряжением.

Теперь проанализируем перенапряжение с различными длинами кабеля. Для этого основанная на измерениях модель кабеля заменяется частотно-зависимой моделью бегущей волны [28], в которой электрические параметры на единицу длины (R, L, C) получены по описанию геометрии в табл. 1 по методике, описанной в [27]. Полупроводниковые слои учитываются

ТАБЛИЦА 1
ОПИСАНИЕ КАБЕЛЯ

| | Радиус [мм] | Толщина [мм] | Сопротивление [Ом·м] | ϵ_r |
|-------------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|
| Фазный провод | 9.25 | | $3.36E-8$ | |
| Полупроводник | | 0.5 | | |
| Изоляция | | 3.4 | | 2.3 |
| Полупроводник | | 0.5 | | |
| Оплетенный провод | | 0.4 | $1.72E-8$ | |
| Оболочка | | 2 | | 2.3 |

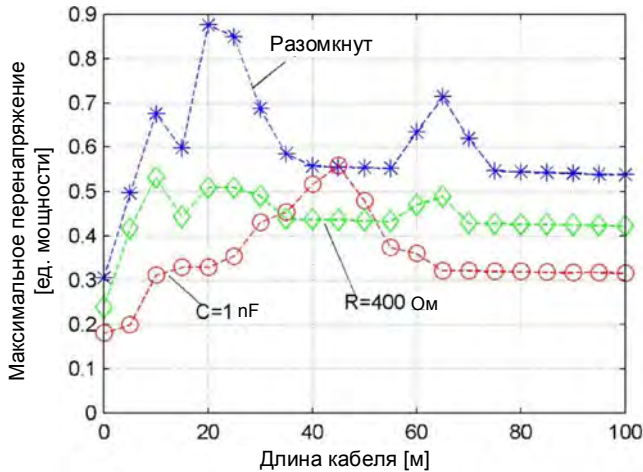


Рис. 18. Моделирование максимального перенапряжения на стороне низкого напряжения в зависимости от длины кабеля. Схема на рис. 14 показывает непосредственное возбуждение шаговым напряжением. Перенапряжение показано в расчете на единицу приложенного напряжения.

путем замены их на изоляцию с одновременным увеличением диэлектрической проницаемости всей изоляционной пластины (между проводником и оболочкой) с 2,3 до 3,0, согласно методике в [29].

На рис. 18 показано максимальное перенапряжение на стороне низкого напряжения для разных длин кабеля, когда для возбуждения используется идеальный единичный перепад напряжения. При разомкнутых вводах низкого напряжения максимальные пиковые значения напряжения при 0,9 ед. мощности приложенного напряжения для кабеля 20 м. Это соответствует 43 ед. мощности нормального напряжения (50 Гц). Соответствующее моделирование показано на рис. 19. Видно, что напряжение кабеля быстро уменьшается по мере передачи энергии от кабеля к трансформатору, что приводит к значительному повышению перенапряжения в трансформаторе. Наблюдается поразительное сходство с идеализированным результатом на рис. 2.

На рис. 18 показано, что перенапряжение значительно уменьшается, если сторона низкого напряжения присоединена к небольшой нагрузке. Для справки, величина 400 Ом примерно соответствует характеристическому сопротивлению воздушной линии, а величина 1 нФ должна обозначать эффект шунтирующей емкости участка кабеля 3 м.

Характеристическое сопротивление кабеля – это важный параметр явления резонансного перенапряжения. На рис. 20 показано максимальное перенапряжение в зависимости от длины кабеля с характеристическим напряжением кабеля в качестве параметра. В этом моделировании используется модель кабеля без потерь с принятой скоростью волны 177 м/мкс. Видно, что максимальное напряжение уменьшается по мере увеличения характеристического сопротивления.

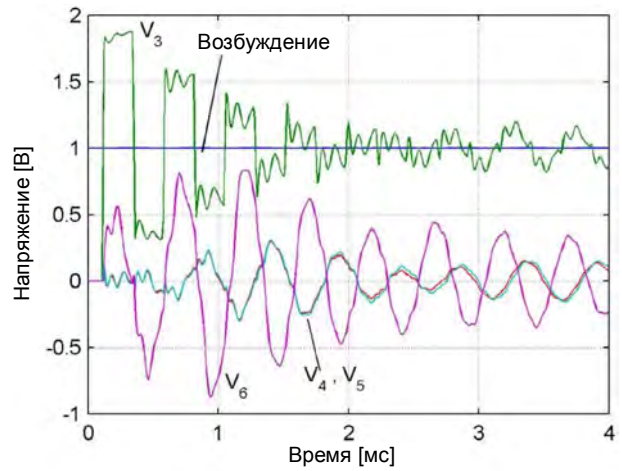


Рис. 19. Имитированная характеристика шагового напряжения. Кабель 20 м.

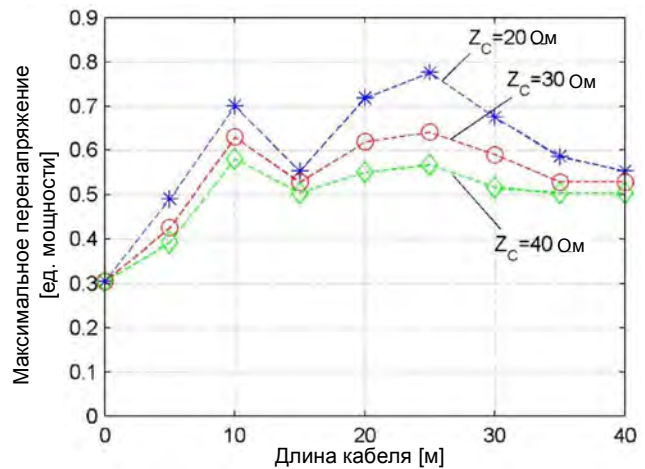


Рис. 20. Максимальное перенапряжение в зависимости от длины кабеля. Кабель без потерь с альтернативными значениями характеристического сопротивления. Схема на рис. 14 с возбуждением идеальным шаговым напряжением.

Напряжение уменьшается потому, что более высокий характеристический импеданс подразумевает меньшее количество энергии в кабеле, и поэтому колебание напряжения в кабеле затухает быстрее, приводя к меньшему нарастанию напряжения на стороне низкого напряжения.

V. ВКЛЮЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ПО ПИТАЮЩЕМУ КАБЕЛЮ

A. Шина, присоединенная к нескольким длинным кабелям

Согласно разделу II, перенапряжение в трансформаторе может также возникнуть при включении трансформатора по (питающему) кабелю от шины, присоединенной к нескольким другим кабелям. Пример приведен на рис. 21. Шина присоединена к четырем кабелям и питающему кабелю 20 м.

Если размыкатель цепи замыкается при напряжении $V_{шина}$ в шине, результирующее напряжение в момент после контакта размыкателя становится равным $V_{шина} \cdot (4/5) = 0.8 V_{шина}$, если принять, что все кабели имеют одинаковый характеристический импеданс. Используется частотно-зависимая модель кабеля, основанная на данных Таблицы I с расстоянием 0,5 м между тремя одножильными кабелями.

На рис. 22 показано моделирование данной ситуации во временной области. Принимается, что размыкатель фазы C замыкается на 1 мс раньше следующего размыкателя, и что напряжение фазы C максимальное. На графике показано, что напряжение на стороне шины кабеля 20 м резко повышается с 0 до 0,8 ед. мощности при замыкании размыкателя.

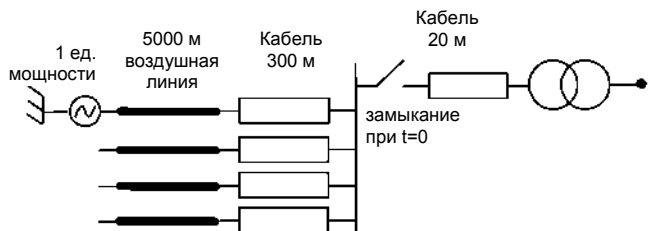


Рис. 21. Включение трансформатора от трехфазной системы питания. Замыкающий полюс первого размыкателя при $t = 0$.

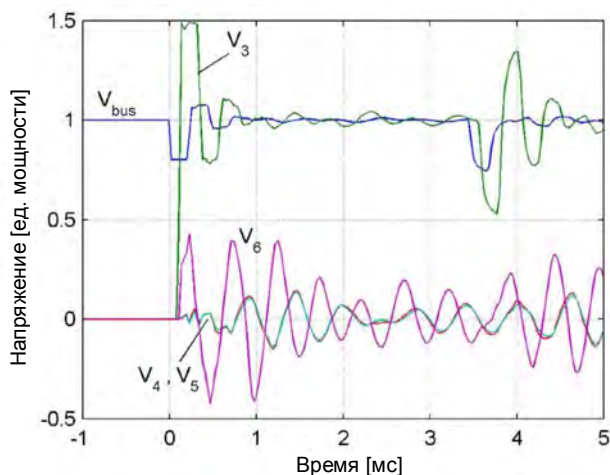


Рис. 22. Переходное перенапряжение.

Связанная волна напряжения в кабеле почти удваивается при достижении трансформатора (V_3), и в кабеле возникает высокочастотное колебание. Преобладающий компонент имеет частоту $f = 1/(4\tau)$, где τ – это время распространения по питающему кабелю (20 м). Колебание вызывает повышение перенапряжения на стороне низкого напряжения трансформатора, превышающего 0,4 ед. мощности напряжения шины. Данное напряжение соответствует 19 ед. мощности напряжения низкой частоты (50 Гц).

В. Шина присоединена к кабелю такой же длины, что и питающий кабель

Если питающий кабель трансформатора включается от другого кабеля (под напряжением) аналогичной длины, возможно более высокое перенапряжение [12]. Ситуация, для которой верно сказанное, показана на рис. 23, где два генераторных повышающих трансформатора питаются от одной шины. При замыкании размыкателя цепи волна напряжения распространяется по обоим кабелям (с противоположной полярностью), а последующее отражение вызывает осциллирующее перенапряжение на конце кабеля. Преобладающий компонент имеет частоту $f = 1/(4\tau)$, где τ – это время распространения по каждому кабелю (20 м).

На рис. 24 показано моделирование во временной области для случая рис. 23 без T2, когда полюс первого размыкателя (фаза С) замыкается на 1 мс раньше следующего полюса. По графике видно, что напряжение шины мгновенно изменяется с 1 ед. мощности до 0,5 ед. мощности, и что на выводе трансформатора T1 (V_3) возникает осциллирующее напряжение.

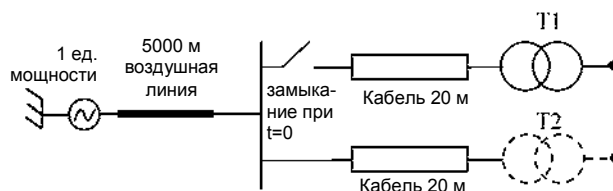


Рис. 23. Включение трансформатора от трехфазной системы питания. Замыкающийся полюс первого размыкателя при $t = 0$.

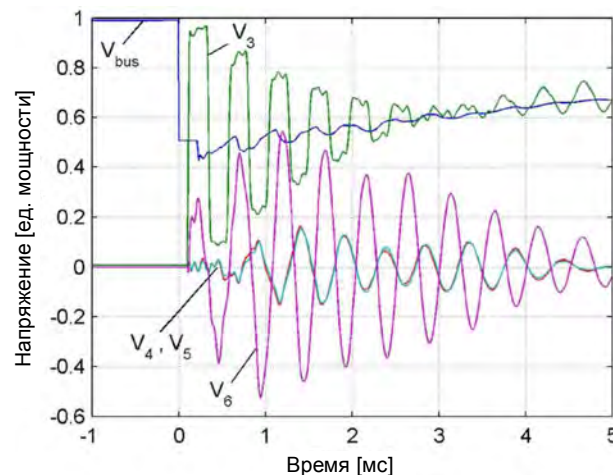


Рис. 24. Переходное перенапряжение.

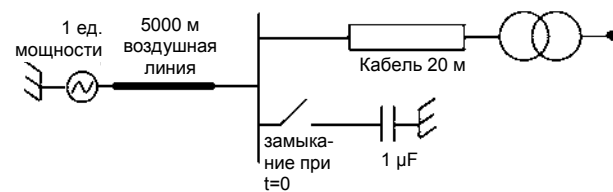


Рис. 25. Включение батареи конденсаторов.

В результате этого на стороне низкого напряжения трансформатора возникает перенапряжение, дающее максимальное напряжение в 0,50 ед. мощности напряжения шины.

Получены следующие дополнительные результаты.

- 1) Если в модель включается трансформатор T2, пиковое напряжение падает с 0,50 ед. мощности до 0,43 ед. мощности. Если на вторичном T2 устанавливается нагрузка 30 Ом, пиковое напряжение падает до 0,41 ед. мощности.
- 2) Перенапряжение повышается при присоединении к шине большего числа кабелей одинаковой длины (20 м). При наличии одного дополнительного кабеля пиковое напряжение повышается с 0,50 ед. мощности до 0,66 ед. мощности, двух - пиковое значение равно 0,71 ед. мощности.

VI. ВКЛЮЧЕНИЕ ОТ БАТАРЕИ КОНДЕНСАТОРОВ

Последний пример – это включение от батареи конденсаторов (см. рис. 25). При замыкании размыкателя напряжение шины резко падает до нуля, что не сильно отличается от случая короткого замыкания на рис. 14. На рис. 26 показаны имитированные перенапряжения при замыкании полюса размыкателя С на 1 мс раньше следующего полюса. Наблюдается внезапное падение напряжения шины до нуля, что вызывает осциллирующее напряжение на конце кабеля (V_3).

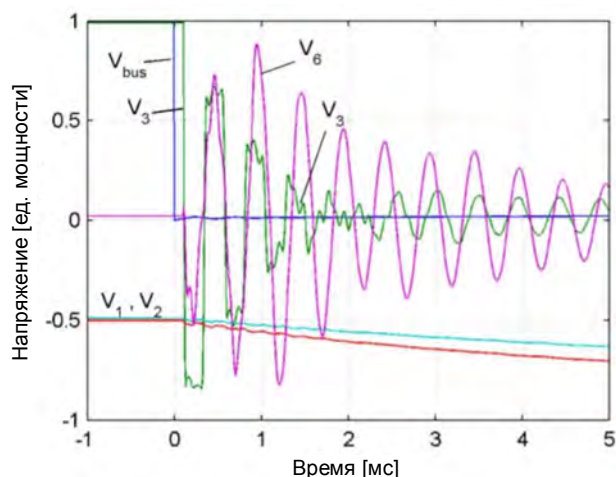


Рис. 26 Переходное перенапряжение.

Осциллирующее напряжение вызывает резонансное перенапряжение на стороне низкого напряжения трансформатора (V_6), достигающее около 0,9 ед. мощности начального напряжения шины. Это соответствует 43 ед. мощности нормального напряжения (50 Гц) на стороне 230 В.

VII. АНАЛИЗ

Исследование проводилось с распределительным трансформатором, в котором перенос напряжения со стороны высокого напряжения к стороне низкого напряжения максимален при частоте около 2 МГц. В других трансформаторах пики в переносе напряжения могут наблюдаться при гораздо меньших частотах. Например, на рис. 27 показан переход от высокого напряжения к низкому для генераторного повышающего трансформатора 410 МВА, исследованного в [14]. Первичное напряжение равно 434 кВ, а вторичное 21 кВ. Очевидно, коэффициент трансформации особенно высокий при 50 Гц (0,67), а также при 170 кГц (0,28). Учитывая коэффициент трансформации при 50 Гц ($21 \text{ кВ}/434 \text{ кВ} = \{0,048\}$), данные пиковые значения соответствуют коэффициентам трансформации 14 (при 50 кГц) и 6 (при 170 кГц). Таким образом, переходные состояния на стороне высокого напряжения с данными характеристическими частотами могут привести к значительному перенапряжению на стороне низкого напряжения, при условии, что входной импеданс на стороны высокого напряжения достаточно высокий. Принимая скорость распространения в кабеле 160 м/мкс, подобные ситуации на рис. 3-5 возникли бы при длине кабеля 800 м (50 кГц) и 235 м (170 кГц).

Практическое применение основанных на измерениях моделей трансформаторов типа «черный ящик», естественно, потребует, чтобы трансформаторы были изготовлены и готовы к измерениям. Поэтому модель «черный ящик» не применяется для проектирования трансформаторов, но позволяет прогнозировать их поведение в данной электрической системе. Это позволит принять смягчающие меры. Установить защитные устройства, внести изменения в схему сети, либо установить защитные устройства. Кроме того, если производится серия одинаковых трансформаторов, измерение/моделирование нужно провести только один раз.

VIII. ВЫВОДЫ

В данной статье исследовалось резонансное перенапряжение на стороне низкого напряжения распределительного трансформатора, вызванное взаимодействием кабеля и трансформатора на стороне высокого напряжения. Выводы основаны на измерениях в частотной и временной области, а

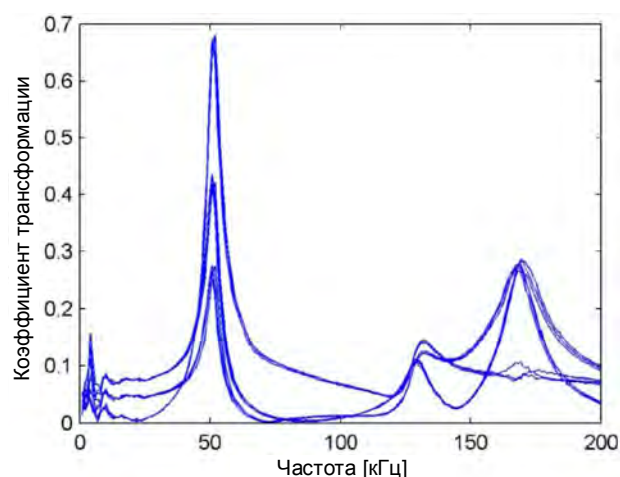


Рис. 27. Генераторный повышающий трансформатор 410 МВА. Коэффициент трансформации от высокого (434 кВ) до низкого (21 кВ).

также на моделировании во временной области с помощью модели трансформатора типа «черный ящик».

- 1) Переходные состояния, вызывающие осциллирующее перенапряжение в (питающем) кабеле, присоединенном к стороне высокого напряжения трансформатора, могут вызвать очень большие перенапряжения на стороне низкого напряжения. Поэтому характеристическое напряжение кабеля должно быть гораздо меньше сопротивления трансформатора на стороне высокого напряжения.
- 2) Наивысшее (резонансное) перенапряжение возникает, если преобладающая частотная составляющая напряжения кабеля совпадает с одной из преобладающих частотных составляющих переноса напряжения со стороны высокого напряжения на сторону низкого напряжения. Перенапряжение может также возникнуть даже при несовпадении по частоте, при условии, что накладывающееся напряжение переходного процесса достаточно крутое.
- 3) При использовании модели трансформатора типа «черный ящик» измерение резонансного напряжения кабеля-трансформатора воспроизводится с высокой степенью точности. На практике также необходимо наличие достаточно точной модели прилегающей сети.
- 4) С помощью модели «черный ящик» определяются три ситуации, могущие вызвать перенапряжение на стороне низкого напряжения: 1) возникновение короткого замыкания в питающем кабеле; 2) включение трансформатора по питающему кабелю от шины, подключенной к нескольким кабелям; 3) включение трансформатора по питающему кабелю от второго кабеля примерно такой же длины; и 4) включение от батареи конденсаторов рядом с концом питающего кабеля.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Измерение матрицы полных проводимостей кабеля

В разделе III-B на основе измерений создана высокочастотная модель для одножильного кабеля 27 м. Далее описана использованная методика измерения.

С помощью векторного анализатора сетей (VNA) измеряется перенос напряжения между двумя концами кабеля #1 и #2 для двух ситуаций: конец #2 разомкнут, а конец #2 оканчивается резистором 50 Ом, см. рис. 28. Символы A, R и S обозначают источник VNA (S), источник опорного сигнала (R) и вход (A).

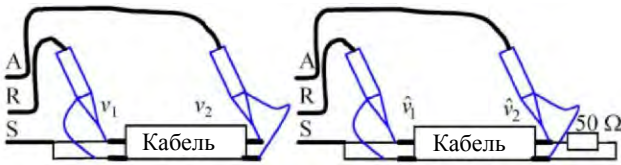


Рис. 28. Переходное перенапряжение.

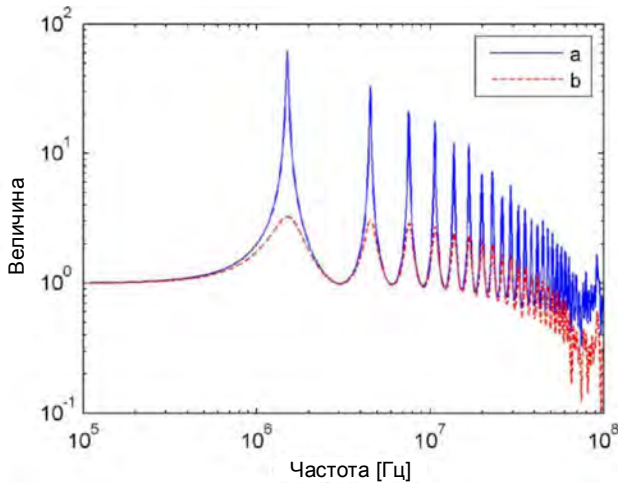


Рис. 29. Измеренные коэффициенты трансформации $a = v_2/v_1$ и $b = \hat{v}_2/\hat{v}_1$.

Сначала измеряется калибровочная характеристика с помощью двух датчиков напряжения, подключенных к одной точке. Затем обратная величина полученного отношения $f = (v_2/v_1)$ используется в качестве множителя (калибровка) для всех измеренных коэффициентов трансформации.

Узловая матрица полных проводимостей кабеля имеет структуру, показанную в (4), из-за симметрии относительно двух концов кабеля

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_a & y_b \\ y_b & y_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

В случае с разомкнутым концом #2, имеем $i_2 = 0$, что дает

$$y_a = -\frac{y_b}{\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}. \quad (5)$$

Подключая резистор $R = 50$ Ом к концу #2, получаем следующее для второго ряда (4)

$$0 = y_b \hat{v}_1 + \left(y_a + \frac{1}{R}\right) \hat{v}_2. \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6), получаем окончательное уравнение (7) для y_b . y_a рассчитывается по (4). На рис. 29 показаны измеренные характеристики $a = (v_2/v_1)$ и $b = (\hat{v}_2/\hat{v}_1)$

$$y_b = \frac{\left(\frac{i_2}{v_2}\right)}{R \left(\left(\frac{v_2}{v_1}\right) - 1\right)}. \quad (7)$$

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность К. Лйокельсой и О. Роксет (Исследования в области энергетики SINTEF) за разработку источника импульса напряжения с низким импедансом и за помощь в реализации схемы измерения.

- [1] A. Morched, L. Marti, R. H. Brierly, and J. G. Lackey, "Analysis of internal winding stresses in EHV generator step-up transformer failures," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 2, pp. 888-894, Apr. 1996.
- [2] F. De Leon and A. Semlyen, "A complete transformer model for electromagnetic transients," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 1, pp. 231-239, Jan. 1994.
- [3] P. G. Blanken, "A lumped winding model for use in transformer models for circuit simulation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, no. 3, pp. 445-460, May 2001.
- [4] E. Bjerkan and H. K. Hoidalen, "High frequency FEM-based power transformer modeling: Investigation of internal stresses due to network-initiated overvoltages," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Montreal, QC, Canada, Jun. 19-23, 2005, p. 6.
- [5] M. Popov, L. van der Sluis, R. P. Smeets, and J. L. Roldan, "Analysis of very fast transients in layer-type transformer windings," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 238-247, Jan. 2007.
- [6] S. M. H. Hosseini, M. Vakilian, and G. B. Gharehpetian, "Comparison of transformer detailed models for fast and very fast transient studies," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 733-741, Apr. 2008.
- [7] A. De, D. Debnath, and A. Chakrabarti, "A study on the impact of low-amplitude oscillatory switching transients on grid connected ehv transformer windings in a longitudinal power supply system," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 2, pp. 679-686, Apr. 2009.
- [8] M. Popov, L. van der Sluis, and R. P. Smeets, "Evaluation of surge transferred overvoltages," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 3, pp. 441-449, 2008.
- [9] M. J. Manyahi and R. Thottappillil, "Transfer of lightning transients through distribution transformers," in *Proc. Int. Conf. Lightning Protection*, Cracow, Poland, Sep. 2-6, 2002, pp. 435-440.
- [10] A. Borghetti, A. Morched, F. Napolitano, C. A. Nucci, and M. Paolone, "Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 1, pp. 360-372, Jan. 2009.
- [11] G. C. Paap, A. A. Alkema, and L. L. Van der Sluis, "Overvoltages in power transformers caused by no-load switching," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 10, no. 1, pp. 301-307, Jan. 1995.
- [12] B. Storesund, "Resonant overvoltage transients in power systems," Ph.D. dissertation, Norges Tekniske H0gskole, Trondheim, Norway, 1992.
- [13] A. Morched, L. Marti, and J. Ottevangers, "A high frequency transformer model for the EMTF," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 3, pp. 1615-1626, Jul. 1993.
- [14] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 3, pp. 834-842, Jul. 1998.
- [15] B. Gustavsen, "Wide band modeling of power transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 1, pp. 414-422, Jan. 2004.
- [16] B. Gustavsen, "Frequency-dependent modeling of power transformers with ungrounded windings," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 3, pp. 1328-1334, Jul. 2004.
- [17] M. Tiberg, D. Bormann, B. Gustavsen, and C. Heitz, "Generic and automated simulation modeling based on measurements," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Lyon, France, Jun. 4-7, 2007, p. 6.
- [18] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061, Jul. 1999.
- [19] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Enforcing passivity for admittance matrices approximated by rational functions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 97-104, Feb. 2001.
- [20] H. W. Dommel, *ElectroMagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book)*. Portland, OR: Bonneville Power Administration, 1986.
- [21] A. Semlyen and A. Dabuleanu, "Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-94, no. 2, pt. 1, pp. 561-575, Mar./Apr. 1975.
- [22] B. Gustavsen and O. Mo, "Interfacing convolution based linear models to an electromagnetic transients program," in *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Lyon, France, Jun. 4-7, 2007, p. 6.
- [23] A. J. Schulz, I. B. Johnson, and N. R. Schulz, "Magnification of switching surges," *AIEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 77, no. 3, pp. 1418-1425, Apr. 1958.
- [24] B. Gustavsen, "Improving the pole relocating properties of vector fitting," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 3, pp. 1587-1592, Jul. 2006.

- [25] D. Deschrijver, M. Mrozowski, T. Dhaene, and D. De Zutter, "Macro-modeling of multiport systems using a fast implementation of the vector fitting method," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 6, pp. 383-385, Jun. 2008.
- [26] B. Gustavsen, "Fast passivity enforcement for pole-residue models by perturbation of residue matrix eigenvalues," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2278-2285, Oct. 2008.
- [27] L. M. Wedepohl and D. J. Wilcox, "Transient analysis of underground power transmission systems; system-model and wave propagation characteristics," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 120, no. 2, pp. 252-259, Feb. 1973.
- [28] A. Morched, B. Gustavsen, and M. Tartibi, "A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 3, pp. 1032-1038, Jul. 1999.
- [29] B. Gustavsen, J. A. Martinez, and D. Durbak, "parameter determination for modeling system transients-part II: Insulated cables," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 3, pp. 2045-2050, Jul. 2005.

Бйорн Густавсен (M'94-SM'03) родился в Харстаде, Норвегия, в 1965 г. Он получил степени кандидата наук и доктора технических наук в Норвежском университете технологии (NTH), Тронхейм, Норвегия, в 1989 и 1993 годах соответственно.

С 1994 г. работает в Центре исследований в области энергетики SINTEF, NTH, где является старшим ученым-исследователем. Сфера его интересов включает моделирование электромагнитных переходных процессов и частотно-зависимых эффектов. В 1996 г. был прикомандированным исследователем в Университете Торонто, Торонто, Онтарио, Канада, а в 1998 г. – в Центре исследований постоянного тока высокого напряжения Манитобы, Виннипег, Манитоба, Канада. Являлся членом общества Марии Кюри в Университете Штутгарта, Штутгарт, Германия, с 2001 по 2002 г.