

# РЕЗОНАНСНЫЕ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ ВЛ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ

АВТОР:

К.И. КУЗЬМИЧЕВА,  
К.Т.Н.  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**В** сетях 110 кВ, в которых к ВЛ подключены один или несколько силовых трансформаторов, при неполнофазных коммутациях возможны феррорезонансные повышения напряжения. Это

может привести к повреждению электрооборудования. При проектировании и создании новых линий электропередач необходимо предусматривать мероприятия, исключающие появление таких режимов.

**Ключевые слова:** феррорезонанс, высоковольтная линия, неполнофазное включение, силовой трансформатор, перенапряжения.



Подстанция «Древлянка»

## ВВЕДЕНИЕ

В сетях 110 кВ широкое распространение получили схемы подключения к ВЛ силовых трансформаторов без выключателей. При неправильной работе линейных выключателей либо обрыве проводов ВЛ могут возникнуть неполнофазные режимы работы ВЛ. В ряде случаев эти режимы сопровождаются феррорезонансными перенапряжениями, превышающими уровень изоляции электрооборудования, что приводит к повреждению последнего. В эксплуатации были отмечены случаи повреждения трансформаторов напряжения, разрядников и даже силовых трансформаторов. Поэтому для разработки методов повышения надежности работы электрических сетей необходимо изучить процесс повышения напряжений при неполнофазных режимах и разработать мероприятия по их ограничению.

Феррорезонансные повышения напряжения при неполнофазных режимах возможны при одностороннем питании ВЛ, к которой подключены слабо нагруженные трансформаторы с изолированной нейтралью. Перенапряжения при неполнофазных режимах могут возникать при включении и отключении ВЛ в переходном и установившемся процессах

Как известно, резонансные повышения напряжения возникают на отключенных фазах ВЛ в схемах с односторонним питанием и подключенным одним или несколькими слабо нагруженными трансформаторами с изолированной нейтралью, имеющих обмотку, соединенную в треугольник.

Возникновение резонансных повышений напряжения при двухстороннем питании ВЛ принципиально невозможно. Если треугольник в схеме соединения трансформа-

тора отсутствует или разомкнут, то резонанс не возникает [1].

Резонансные повышения напряжения при обрыве провода возможны только в случае, когда ни один из концов оборвавшегося провода не касается земли. Обрыв провода и заземление его со стороны питающей сети приводит к отключению ВЛ релейной защитой. При обрыве провода и заземлении фазы со стороны трансформатора повышения напряжения на заземленной фазе не возникают.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПОВЫШЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Для определения возможных величин резонансных повышений напряжения и параметров схем, в которых они возможны, были проведены расчеты. Расчеты проводились в трехфазной постановке задачи, при включении ВЛ одной или двумя фазами, изменении длины ВЛ числа и мощности трансформаторов. ВЛ представлялась линией с распределенными параметрами. Схема замещения трансформатора учитывала все основные параметры: мощность и схему соединения обмоток,  $U_k$  – напряжение короткого замыкания,  $P_{xx}$  – потери холостого хода;  $P_{кз}$  – потери короткого замыкания;  $i_{xx}$  – ток холостого хода;

При расчетах принималось, что коммутация ВЛ с трансформаторами проводится при максимальном рабочем напряжении на шинах 110 кВ, равном 126 кВ ( $U_{\phi} = 100 \text{ кВ}_{\text{макс}}$ ). В этом случае перенапряжения максимальны.

Расчеты проводились для следующих случаев:

- включение ВЛ с трансформатором на конце, имеющем схему соединения обмоток «звезда-треуголь-

- включение ВЛ с несколькими отпаечными трансформаторами, имеющими схему соединения обмоток «звезда-треугольник». Нейтраль обмоток ВН трансформаторов изолирована;
- обрыв провода на ВЛ с несколькими отпаечными трансформаторами, имеющими схему соединения обмоток «звезда-треугольник» и изолированные нейтрали обмоток ВН.

## ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Результаты расчетов повышений напряжений в установившемся режиме при включении одной и двух фаз ВЛ 110 кВ с трансформатором на конце в зависимости от мощности трансформатора ( $W_{тр}$ ) и длины (l) коммутируемой ВЛ приведены на рисунках 1 и 2.

Из этих рисунков видно, что диапазон длин ВЛ, при которых возникают резонансные повышения напряжения в установившемся режиме при включении ВЛ с трансформатором с изолированной нейтралью, зависит от мощности трансформатора.

При включении двух фаз ВЛ резонансные повышения напряжения, превышающие величину фазного напряжения, в установившемся режиме на отключенной фазе не возникают при мощности трансформаторов не более 25 МВА. Резонансные повышения напряжений в установившемся режиме возникают при мощности трансформатора 40 МВА и более, причем с увеличением мощности трансформатора диапазон ВЛ, при которых резонансные повышения напряжения на отключенной фазе превыша-

## УСТАНОВИВШЕЕСЯ НАПРЯЖЕНИЕ НА ВЫВОДАХ 110 КВ ТРАНСФОРМАТОРА

НА ОТКЛЮЧЕННОЙ ФАЗЕ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ДВУХ  
ФАЗ ВЛ С ТРАНСФОРМАТОРОМ НА КОНЦЕ

Нейтраль обмотки 110 кВ трансформатора изолирована. Мощность трансформатора:  
■ 10 МВА, ■ 25 МВА, ■ 40 МВА, ■ 63 МВА, ■ 125 МВА, ■ 250 МВА

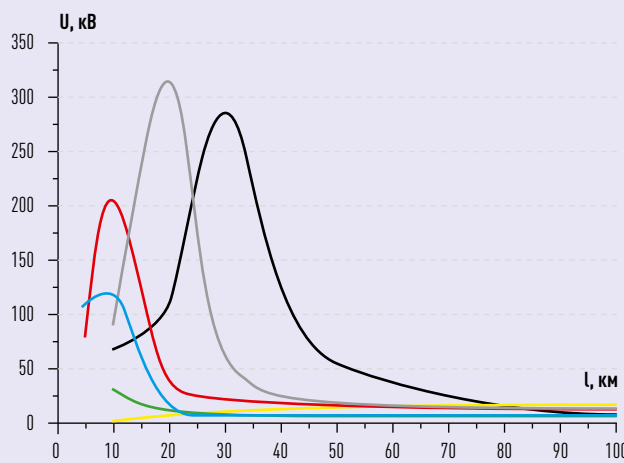


Рис. 1

ют фазное напряжение (100 кВ), смещается в область больших длин. При этом, чем выше мощность трансформатора, тем шире диапазон длин ВЛ, при которых возникают резонансные повышения напряжений. Так, при мощности трансформатора 125 МВА повышения напряжения, превышающие фазное напряжение 100 кВ, могут возникать при длинах ВЛ от 10 до 30 км. При мощности трансформатора 40 МВА диапазон длин ВЛ, при которых повышения напряжения превышают фазное напряжение 100 кВ, смещается в область от 2 до 10 км. При длинах ВЛ, превышающих 30 км, резонансные повышения напряжения, превышающие величину фазного напряжения 100 кВ в установив-

шемся режиме, не возникают при всех мощностях трансформаторов.

При включении одной фазой ВЛ с трансформатором с изолированной нейтралью максимум резонансных повышений напряжений в установившемся режиме смещается по сравнению с двухфазным включением ВЛ с трансформатором в область меньших длин. Как следует из рисунка 2, повышения напряжения, превышающие величину фазного напряжения, на двух отключенных фазах не превышают в установившемся режиме величины фазного напряжения при длинах ВЛ более 10 км независимо от мощности трансформатора.

Таким образом, диапазон ВЛ, при котором возможны феррорезо-

## УСТАНОВИВШЕЕСЯ НАПРЯЖЕНИЕ НА ВЫВОДАХ 110 КВ ТРАНСФОРМАТОРА

НА ОТКЛЮЧЕННЫХ ФАЗАХ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ  
ОДНОЙ ФАЗЫ ВЛ С ТРАНСФОРМАТОРОМ

Мощность трансформатора: ■ 10 МВА, ■ 25 МВА, ■ 40 МВА, ■ 63 МВА, ■ 125 МВА, ■ 250 МВА

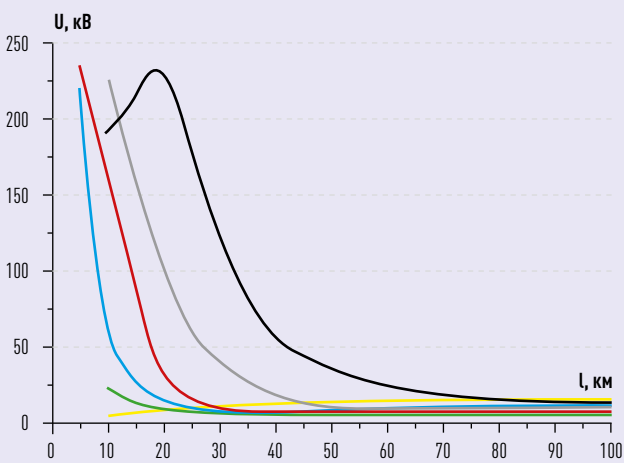


Рис. 2

нанные повышения напряжения на отключенной фазе в установившемся режиме, несколько шире при включении ВЛ двумя фазами, чем при включении ВЛ одной фазой.

Если нейтраль обмотки 110 кВ трансформатора заземлена, то перенапряжения на отключенных фазах при всех расчетных длинах ВЛ и мощностях трансформатора не превышают фазного напряжения 100 кВ.

### ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ

При неполнофазном включении ВЛ с подключенным к ней ненагруженным трансформатором с изолированной нейтралью на отключенной

фазе возникает переходный процесс, сопровождающийся различными хаотическими нелинейными колебаниями, причем, последние, как правило, превышают максимальное фазное рабочее напряжение. Переходный процесс завершается либо срывом нелинейных колебаний и установлением относительно невысокого напряжения на фазе, либо переходом к достаточно высокому резонансному повышению напряжения. Характерные расчетные кривые напряжений на отключенной фазе в переходном и установившемся режимах приведены на рисунках 3-8.

Следует отметить, что величина и длительность повышений напряжений в переходном процессе зависит от момента коммутации. На рисунке 8 приведены расчетные кривые напряжений на отключенной фазе при различных моментах коммутаций. По рисунку 8а срыв нелинейных колебаний происходит через 900 мс после начала переходного процесса. По рисунку 8б срыв нелинейных колебаний происходит через 5600 мс после начала переходного процесса.

Необходимо учитывать, что напряжение в переходном процессе по расчетам может повышаться до (2,0-3,0)  $U_{\phi}$  и существовать в течение нескольких секунд (от 1 до 6 с). В нескольких расчетных случаях переходное повышение напряжения величиной  $2,0 U_{\phi}$  существовало несколько десятков секунд. В соответствии с ГОСТ 1516.3 [2], повышение напряжения частоты 50 Гц величиной  $2,0 U_{\phi}$  допускается на электрооборудовании в течение 1 с. Таким образом, повышение напряжения переходного процесса может представлять опасность для изоляции электрооборудования и приводить к его повреждению.

Эффективным средством ограничения перенапряжений переходного

процесса является заземление нейтрали трансформатора. Расчеты показывают, что напряжение на отключенных фазах при заземленной нейтрали трансформаторов не превышает фазного напряжения независимо от мощности трансформатора.

### ПОВЫШЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В НЕСИММЕТРИЧНОМ РЕЖИМЕ ВЛ С НЕСКОЛЬКИМИ ПОДКЛЮЧЕННЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Схема с несколькими подключенными к ВЛ трансформаторами соответствует многоконтурной схеме с нелинейными элементами. Общее решение для такой схемы достаточно сложно. Поэтому для определения повышений напряжения были проведены расчеты в следующих схемах:

- общая длина ВЛ составляет 80 км. Через каждые 20 км подключены трансформаторы с изолированной нейтралью мощностью 10 МВА;
- общая длина ВЛ составляет 80 км. Через каждые 20 км подключены трансформаторы с изолированной нейтралью. Мощность трех трансформаторов составляет по 10 МВА, на конце ВЛ мощность трансформатора 40 МВА;
- общая длина ВЛ составляет 80 км. Через каждые 20 км подключены трансформаторы. Мощность трех трансформаторов составляет по 10 МВА, на конце ВЛ мощность трансформатора 40 МВА. В расчетах поочередно заземляется нейтраль одного трансформатора;
- общая длина ВЛ составляет 30 км. Через каждые

- 10 км подключены трансформаторы с изолированной нейтралью мощностью 10 МВА; общая длина ВЛ составляет 30 км. Через каждые 10 км подключены трансформаторы с изолированной нейтралью мощностью 25 МВА;
- общая длина ВЛ составляет 30 км. Через каждые 20 км подключены трансформаторы с изолированной нейтралью мощностью 40 МВА.

Рассматривалось включение ВЛ двумя фазами и определялось напряжение на отключенной фазе. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, практически при всех длинах ВЛ и мощностях трансформаторов перенапряжения на отключенной фазе в установившемся режиме не превышают величины фазного напряжения. В переходном процессе напряжение на отключенной фазе превышает фазное напряжение в несколько раз. Поэтому повышение напряжения переходного процесса может представлять опасность для изоляции оборудования. Заземление нейтрали хотя бы одного трансформатора снижает напряжение переходного процесса на отключенной фазе до безопасной величины.

### ПОВЫШЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОБРЫВЕ ПРОВОДА ВЛ

При обрыве провода резонансные повышения напряжения возможны только в схеме, когда ни один из проводов не касается земли.

В таблицах 2 и 3 приведены результаты расчетов повышений напряжения в установившемся и переходном процессах при обрыве фазы

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОВЫШЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В УСТАНОВИВШЕМСЯ И ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССАХ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 110 КВ С НЕСКОЛЬКИМИ ОТПАЕЧНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Длина ВЛ, км	Мощность трансформатора, МВА	Напряжение в установившемся режиме, кВ	Напряжение в переходном режиме, кВ	Нейтраль
80	3×10 + 40	4,9	195	Изолирована
30	3×10	2,6	330	Изолирована
30	3×25	29	340	Изолирована
30	3×40	118	430	Изолирована
80	3×10 + 40	Не более 100*	Не более 100	Заземлена

\* При заземлении любой нейтрали трансформатора, подключенного к ВЛ.  
Таблица 1

провода и изолированной нейтрали трансформатора.

Расчеты показывают, что перенапряжения в установившемся режиме зависят только от длины участка ВЛ между точкой обрыва и трансформатором ( $l_1$ ) и не зависят от общей длины ВЛ ( $l_{\text{общ}}$ ). Это понятно, поскольку процесс образования перенапряжений определяется емкостью участка ВЛ длиной  $l_1$  и мощностью трансформатора и аналогичен процессу образования перенапряжений при неполнофазном включении ВЛ двумя фазами с трансформатором на конце..

Как показывают расчеты, в случае заземления нейтрали трансформатора, установленного на конце ВЛ, установившееся напряжение на отключенной фазе не превышает фазного напряжения. В переходном режиме напряжение на отключенной фазе может превышать фазное напряжение на 15-30%.

Таким образом, при обрыве фазы ВЛ:

- перенапряжения в установившемся режиме зависят только от длины участка ВЛ между точкой обрыва и трансформатором ( $l_1$ ) и не зависят от общей длины ВЛ ( $l_{\text{общ}}$ );
- при изолированной нейтрали трансформатора и мощности не более 25 МВА установившееся и переходное напряжение на отключенной фазе не превышает величины фазного напряжения;
- при изолированной нейтрали трансформатора и мощности 40 МВА и более установившееся и переходное напряжение на отключенной фазе не превышает величину фазного напряжения в диапазоне длин ВЛ от 10 до 30 км.: при заземленной нейтрали трансфор-

матора и любой его мощности установившееся и переходное напряжение на отключенной фазе не превышает величины фазного напряжения.

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ РЕЗОНАНСНЫХ ПОВЫШЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ

При проектировании и создании новых электропередач 110 кВ необходимо предусматривать меро-

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ УСТАНОВИВШЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ ( $U_{\text{МАКС}}$ ) В МЕСТЕ ОБРЫВА ПРОВОДА НА РАССТОЯНИИ $l_1$ СО СТОРОНЫ ТРАНСФОРМАТОРА. НЕЙТРАЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА ИЗОЛИРОВАНА ( $\gamma/\Delta$ )

$W_{\text{тр}}$ , МВА	$l_{\text{общ}}$ , км	$l_1$ , км		
		10	20	30
10	20	2,6	-	-
	30	2,6	8,0	-
	40	2,6	8,0	9,9
25	20	28,8	-	-
	30	28,9	2,1	-
	40	28,9	2,1	5,6
40	20	118,0	-	-
	30	118,0	11,6	-
	40	118,0	11,6	2,4
63	20	206,0	-	-
	30	206,0	38,0	-
	40	206,0	38,0	10,5
125	20	85,8	-	-
	30	86,0	346,0	-
	40	86,1	346,0	55,0

Таблица 2

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ НАПРЯЖЕНИЯ ( $U_{\text{МАКС}}$ ) В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ В МЕСТЕ ОБРЫВА ПРОВОДА НА РАССТОЯНИИ $l_1$ СО СТОРОНЫ ТРАНСФОРМАТОРА. НЕЙТРАЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА ИЗОЛИРОВАНА ( $\gamma/\Delta$ )

$W_{\text{тр}}$ , МВА	$l_{\text{общ}}$ , км	$l_1$ , км		
		10	20	30
10	20	98,0	-	-
	30	99,0	111,0	-
	40	99,0	111,0	120,0
25	20	100,0	-	-
	30	102,0	96,4	-
	40	102,0	96,4	99,0
40	20	329,0	-	-
	30	296,0	99,1	-
	40	285,0	103,0	96,0
63	20	196,0	-	-
	30	196,0	315,0	-
	40	196,0	276,0	99,0
125	20	87,0	-	-
	30	89,1	324,0	-
	40	87,3	340,0	347,0

Таблица 3

## НАПРЯЖЕНИЕ НА ОТКЛЮЧЕННОЙ ФАЗЕ

ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ВЛ ДЛИНОЙ 80 КМ С ТРАНСФОРМАТОРОМ 125 МВА С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

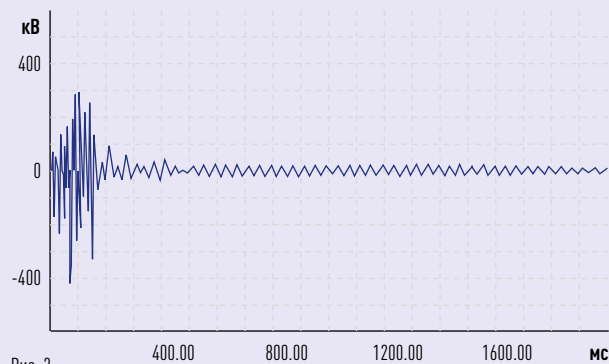


Рис. 3

ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ВЛ ДЛИНОЙ 50 КМ С ТРАНСФОРМАТОРОМ 125 МВА С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

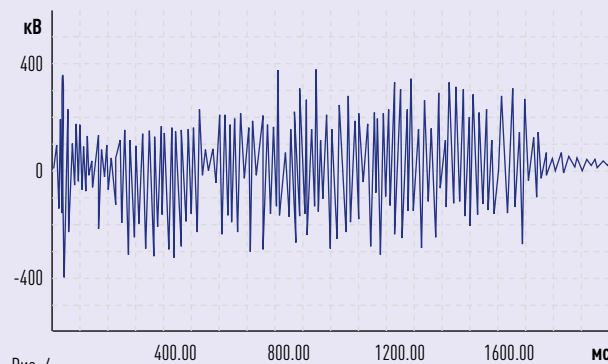


Рис. 4

ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ВЛ ДЛИНОЙ 50 КМ С ТРАНСФОРМАТОРОМ 40 МВА С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

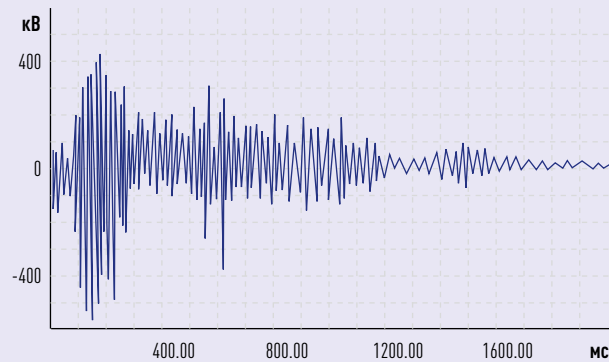


Рис. 5

ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ВЛ ДЛИНОЙ 30 КМ С ТРАНСФОРМАТОРОМ 10 МВА С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

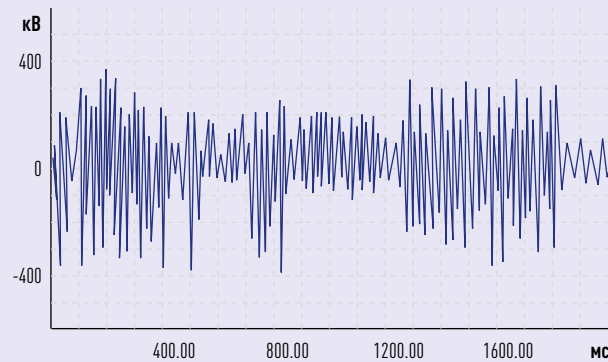


Рис. 6

ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ВЛ ДЛИНОЙ 10 КМ С ТРАНСФОРМАТОРОМ 63 МВА С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ. В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ РЕЗОНАНСНОЕ ПОВЫШЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ 200 КВ

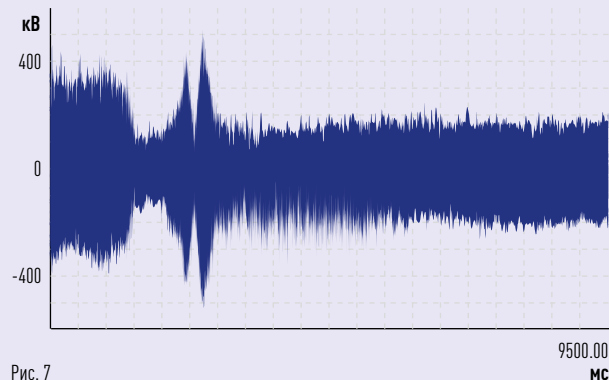


Рис. 7

ВЛ ДЛИНОЙ 40 КМ С ТРАНСФОРМАТОРОМ МОЩНОСТЬЮ 63 МВА С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ РАЗНЫХ МОМЕНТАХ ВКЛЮЧЕНИЯ

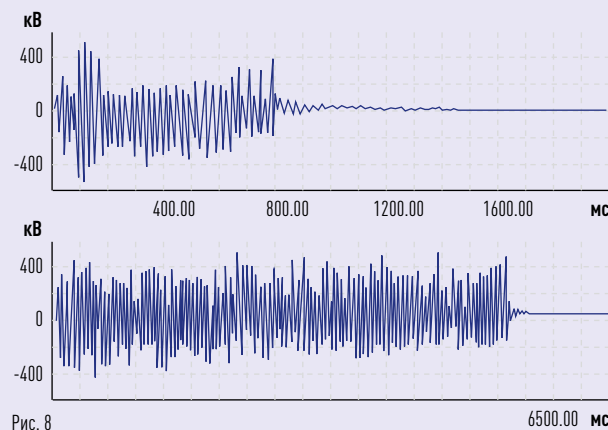


Рис. 8

приятя, исключаящие появление неполнофазных режимов. К ним относятся:

- подключение трансформаторов к ВЛ только через выключатели, что позволит, во-первых, избежать коммутации ВЛ с трансформатором, во-вторых, в случае феррорезонансных повышений напряжений отключить трансформаторы с изолированными нейтралью и прервать феррорезонанс и связанные с ним повышения напряжения;
- подключение трансформаторов к ВЛ через выключатели, у которых мала вероятность неполнофазных коммутаций, например, элегазовые выключатели. Это в первую очередь относится к линейным выключателям ПС, питающим магистральные электропередачи;
- замена воздушных выключателей 110 кВ, которые коммутируют ВЛ с подключенными к ней отпаечными трансформаторами, на элегазовые выключатели, имеющие малую вероятность неполнофазных коммутаций, применение на магистральных ВЛ выключателей с высоким значением токов отключения (63 кА), что позволит более широко применять в сети 110 кВ трансформаторы с заземленной нейтралью обмотки ВН.

При эксплуатации электропередач 110 кВ с трансформаторами, подключенными к ВЛ без выключателей, для предотвращения

повышений напряжений при неполнофазных включениях ВЛ с трансформатором и обрыве провода ВЛ следует:

- заземлять обмотки 110 кВ трансформатора, в первую очередь при длинах ВЛ 10–30 км, когда при неполнофазных коммутациях возможен феррорезонанс в установившемся режиме. Если к ВЛ подключено несколько трансформаторов без выключателей, то следует заземлить нейтраль хотя бы одного трансформатора [1];
- применять релейную защиту от повышения напряжений на ПС, к которой подходит ВЛ, с подключенными к ней без выключателей трансформаторами с изолированной нейтралью. Возникновение феррорезонансных повышений напряжения при неполнофазных режимах вызывает появление высших гармоник, поэтому защита от повышения напряжений должна срабатывать по амплитудным значениям контролируемой величины.

Уставки защиты должны выбираться в соответствии с уровнями допустимых напряжений по величине и длительности на оборудование в соответствии с ГОСТ 1516.3.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. РД 153–34–35.125–99. – СПб.: ПЭИПК, 1999.
2. ГОСТ 1516.3–96. Электрооборудование переменного тока на напряжения до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

## ЭНИП-2

Многофункциональные измерительные преобразователи



## МЭК 61850

С положительным результатом на соответствие IEC 61850 испытаны следующие блоки соответствия:

- Basic Exchange (22/24)
- Data Sets (6/6)
- Data Set Definition (24/24)
- Unbuffered Reporting (9/19)
- Buffered Reporting (7/21)
- GOOSE Publish (13/13)
- GOOSE Subscribe (23/30)
- Direct Control (5/12)
- Enhanced SBO Control (9/19)



реклама

www.enip2.ru  
8 (8182) 65-75-65