

# ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ, СОДЕРЖАЩИХ ПРОТЯЖЕННЫЕ ВЛ

**ПОПОВ О.Е.**, начальник отдела контроля за техническим состоянием объектов генерации и электрических сетей АО «Техническая инспекция ЕЭС»

**ПИСАРЕВА И.Н.**, магистрант кафедры «ЭСиЭЭС» ПИ СФУ (Красноярск)

**ТИМОФЕЕВ С.А.**, к.т.н., доцент кафедры «ЭСиЭЭС» ПИ СФУ (Красноярск)

**ТИХОНОВ А.А.**, к.т.н., доцент кафедры «ЭСиЭЭС» ПИ СФУ (Красноярск)

В последние годы на страницах журналов идет интенсивная дискуссия о наиболее эффективном способе заземления нейтрали распределительных сетей 10–35 кВ [1, 2, 3]. В этих сетях в основном применяется режим с изолированной нейтралью, с компенсацией емкостного тока или комбинированный способ [4]. При выборе режима заземления нейтрали один из основных аргументов – это, безусловно, уровень перенапряжений при однофазном дуговом замыкании на землю (ОДЗ).

Данный вид перенапряжений исследован в фундаментальных работах Петерсена, Ф.А. Лихачева [5], Н.Н. Белякова и других авторов. В результате теоретических и экспериментальных работ было установлено, что перенапряжения при ОДЗ лежат в диапазоне 2,5–4,1  $U_{фм}$  ( $U_{фм}$  – амплитудное значение фазного напряжения сети). В классических теориях и опубликованных работах исследования переходных процессов при ОДЗ проводились в эквивалентных схемах замещения с сосредоточенными параметрами, где точка регистрации и место

ОДЗ совпадают (на шинах источника напряжения).

В работе [6] было показано увеличение кратности дуговых перенапряжений в конце отходящих от шин воздушных линий по сравнению с перенапряжениями на шинах. Обусловлено это явление волновыми процессами отражения и преломления волн в узловых точках. Между тем, во всех последних дискуссиях этот факт по-прежнему игнорируется.

Учитывая определенные трудности осциллографирования перенапряжений в действующих сетях (особенно

в точках, удаленных от места искусственного ОДЗ), в работе использовался метод имитационного компьютерного моделирования для исследования переходных процессов при ОДЗ в сетях содержащих протяженные ВЛ.

На рис. 1 представлена принципиальная однолинейная схема радиальной электрической сети, принятая для исследований в качестве основной.

Для приведенной схемы в пакете SIMULINK программного комплекса MATLAB, была создана модель сети 35 кВ для исследования электромагнитных переходных процессов при ОДЗ. Место ОДЗ и места регистрации переходных процессов в модели могут быть в любой точке сети. С помощью разработанной модели были проведены исследования влияния места ОДЗ на частотный спектр (форму) переходного тока и амплитуды перенапряжений, возникающих при ОДЗ в различных точках сети.

Предварительные исследования показали, что упрощенные схемы замещения сети с сосредоточенными индуктивностями и емкостями не отра-

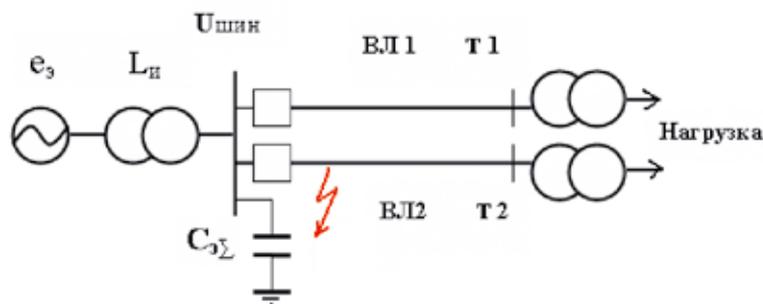


Рис. 1. Принципиальная однолинейная схема радиальной распределительной электрической сети

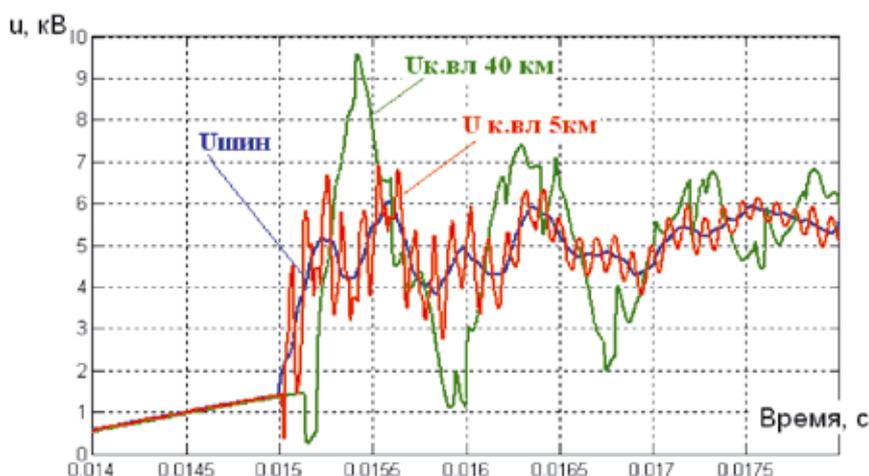


Рис. 2. Осциллограммы перенапряжений на концах ВЛ при ОДЗ на шинах ПС в сети 35 кВ содержащей две ВЛ протяженностью 5 и 40 км

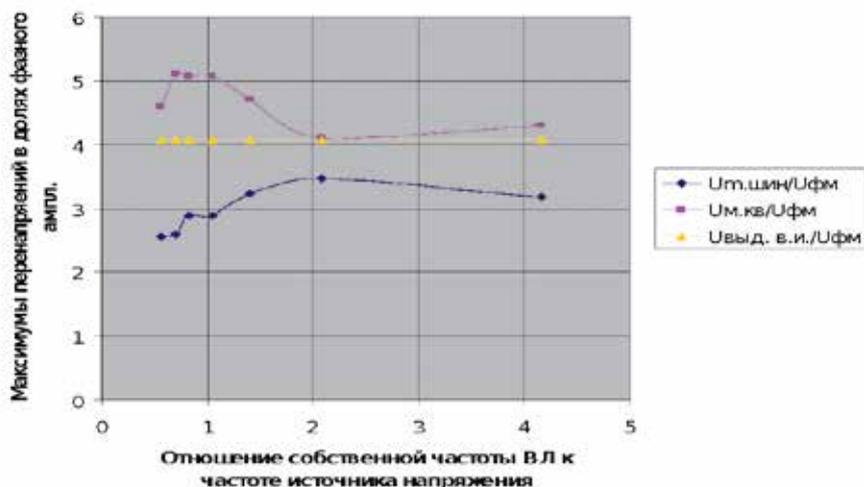


Рис. 3. Максимумы перенапряжений, возникающие при ОДЗ на шинах питающей ПС и в конце ВЛ, от отношения частот  $f_{вл} / f_{и}$

жают реальные формы токов замыкания на землю и перенапряжений, возникающих в удаленных точках сети.

На рис. 2 в качестве иллюстрации приведены расчетные осциллограммы переходных процессов при первом замыкании на землю на шинах ПС при наличии двух ВЛ, отходящих от шин ПС длиной 5 и 40 км, соответственно. Максимумы перенапряжений на шинах составляют 61 кВ ( $2,1 U_{фм}$ ), в конце ВЛ длиной 5 км – 70 кВ ( $2,45 U_{фм}$ ), в конце ВЛ длиной 40 км – 96 кВ ( $3,4 U_{фм}$ ).

Известно, что перенапряжения при ОДЗ зависят от многих случайных факторов (момента зажигания и гашения дуги, величины напряжения повторного пробоя, величины активного

сопротивления в цепи ОДЗ, параметров сети и т.д.), один из которых – удаление точки ОДЗ от шин питающей подстанции.

В настоящей статье в качестве иллюстрации на рис. 3 приведены зависимости максимумов перенапряжений, возникающих при ОДЗ на здоровых фазах, от соотношения собственных частот линии ( $f_{вл}$ ) и источника питания ( $f_{и}$ ).

Таблица 1. Основные вероятностные характеристики перенапряжений при ОДЗ

Кратности максимумов перенапряжений ( $U_n$ ) по отношению к $U_{фм}$ (за 4 цикла зажигания-гашение)	Вероятностные характеристики перенапряжений					
	Математическое Ожидание		Среднее квадратичное отклонение		$U_n$ (с вероятностью 0,95)	
	Длина ВЛ в км					
	5	40	5	40	5	40
На шинах ПС	2,57	2,4	0,3	0,42	3,2	3,1
В конце ВЛ	3,27	3,87	0,47	0,65	4,3	5,6

## ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Ведущий рубрики



**Турапин Евгений Вячеславович**

Заместитель директора по техническому контролю и аудиту электрических сетей АО «Техническая инспекция ЕЭС»

Анализ результатов показывает, что перенапряжения на шинах питающих ПС (при горении дуги по гипотезе Белякова) при учете волновых процессов в ВЛ не превосходят величины  $3,5 U_{фм}$  (вместо  $3,2 U_{фм}$ ), в то же время на концах протяженных ВЛ они могут возрасти до  $5,1 U_{фм}$ .

Уровень выдерживаемых напряжений электрооборудования 3–35 кВ при коммутационных перенапряжениях определяется уровнем испытательных напряжений нормируемых ГОСТ 1516.3-96 и для оборудования 35 кВ составляет  $U_{выд} = 116,9$  кВ или  $4,1 U_{фм}$ .

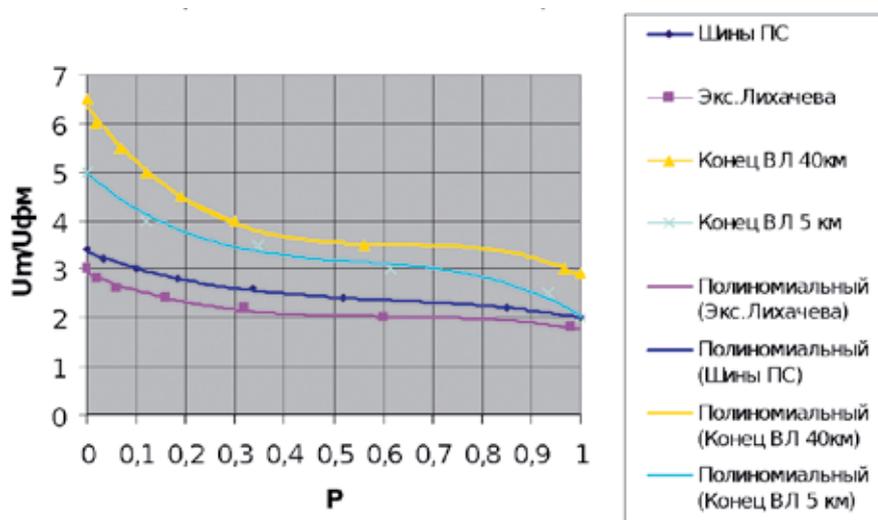


Рис. 4. Кривые распределения вероятности перенапряжений при ОДЗ

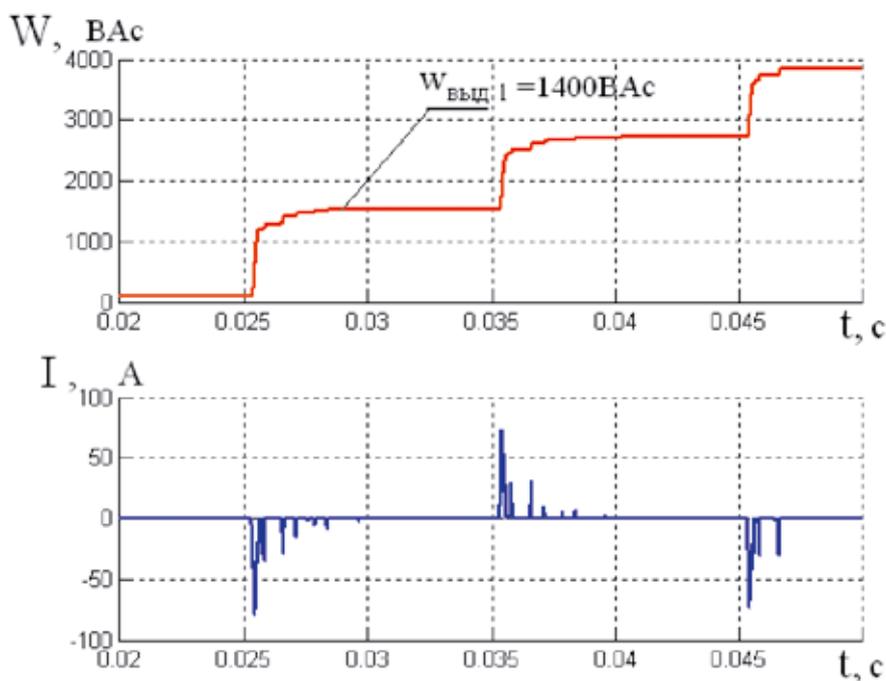


Рис. 5. Осциллограммы энергии выделяющейся в варисторах, и токи в ОПН, установленном в конце ВЛ 40 км, в режиме ограничения перенапряжений при ОДЗ при изолированной нейтрали

Таблица 2. Результаты расчетов перенапряжений при ОДЗ при различных вариантах защиты (в сети с емкостным током 10 А)

Режим нейтрали и место установки ОПН. Длина ВЛ 40 км	Um шины пс/ Uфм		Um к вл/ Uфм	
	ф В	ф С	ф В	ф С
Нейтраль изолирована. Без ОПН в сети	3,08	3,4	5,6	5,9
Резистивное заземление $R_N=4 \text{ кОм}$ . Без ОПН в сети	2,2	2,42	3,3	3,5
Нейтраль изолирована. ОПН на шинах питающей ПС	2,8	2,95	5,12	5,3
Нейтраль изолирована. ОПН в конце ВЛ и на шинах тупиковой ПС	2,45	2,45	3	2,98

При анализе статистических характеристик перенапряжений, сопровождающих горение перемежающейся дуги, были учтены три основные случайные характеристики, определяющие процесс: момент первого зажигания дуги, величина напряжения повторного пробоя и длительность горения дуги.

В отсутствии экспериментальных данных по законам распределения этих случайных параметров было принято, что они подчинены закону равномерной плотности, как обладающему наибольшей энтропией.

Каждый цикл расчетов включал в себя 60–70 опытов. Результаты статистического анализа максимумов перенапряжения на шинах питающей ПС и в конце ВЛ приведены в таблице 1 и на рис. 4.

Анализ полученных статистических характеристик перенапряжений, возникающих при ОДЗ в сетях 35 кВ с учетом волновых процессов в протяженных ВЛ, позволяет сделать следующие выводы:

- максимумы перенапряжений на шинах питающих ПС увеличиваются незначительно по сравнению с классическими теориями и с вероятностью 0,95 не превышают  $(3-3,2) U_{фм}$  при математическом ожидании  $(2,4-2,5) U_{фм}$ ;
- максимумы перенапряжений на концах ВЛ (тупиковых ПС) с вероятностью 0,95 достигают  $(4,3-5,6) U_{фм}$  при математическом ожидании  $(3,1-3,2) U_{фм}$ ;
- с ростом длины отходящих линий наблюдается существенное увеличение кратностей перенапряжений. Так, при длине ВЛ 5 км вероятность того, что перенапряжения превысят допустимый уровень  $4,1 U_{фм}$ , составляет примерно 10 %, а при длине ВЛ 40 км эта вероятность достигает 25 %;

■ полученные результаты по кратностям перенапряжений следует считать максимально возможными (не заниженными), так как в реальных сетях существует более интенсивное затухание высокочастотных колебаний за счет: утечек по загрязненной изоляции, частотных характеристик потерь в земле, удаления точки замыкания на линии от шин ПС и т.д.

Ограничение перенапряжений при ОДЗ возможно либо с помощью из-

менения режима заземления нейтрали, либо с помощью защитных аппаратов.

Для ограничения перенапряжений до  $2,5 U_{фм}$  Петерсеном предложено заземление нейтрали через резистор  $RN \approx (1-2,5)/(\omega \cdot 3Cф)$ . С точки зрения увеличения результирующего тока замыкания на землю, устойчивости горения дуги ОДЗ и требований к энергоемкости резисторной установки предпочтительнее использовать резистор с максимально большим сопротивлением (наложение активного тока составляющего 50–100 % от емкостного тока замыкания на землю).

Расчеты показывают, что при резистивном заземлении нейтрали с таким сопротивлением амплитуда перенапряжений при ОДЗ на шинах питающей ПС не превышает  $2,3-2,5 U_{фм}$ , а в конце ВЛ длиной 40 км достигает  $(3,5-3,8) U_{фм}$ , что уже приближается к  $U_{ввд}$  и может представлять опасность для стареющей изоляции с учетом многократности их воздействия.

В настоящее время для защиты от перенапряжений при ОДЗ возможно применение нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) с большой пропускной способностью.

В работе были проведены исследования эффективности ОПН разной пропускной способности: ОПН-35/40, 5–10/650(II) и ОПН-35/41-10/900(III) ОАО «Феникс-88» (таблица 2).

На рис. 5 приведены расчетные осциллограммы токов и выделяющейся энергии в ОПН, установленном в конце ВЛ 40 км, в режиме ограничения максимально возможных перенапряжений при ОДЗ ( $5,9 U_{фм}$ ).

При допустимой для 2 или 3 класса энергоемкости ОПН-35:

$w_{опн, доп} = (3,5-5,3) \text{ кДж}/(\text{кВ} \cdot U_{нр})$  и  $U_{нр} = 40,5-42 \text{ кВ}$  их допустимая поглощаемая энергия составляет  $w_{опн, доп} = 142-220 \text{ кДж}$ .

Энергия, выделяемая в ОПН за один цикл «гашение–зажигание» согласно расчетам для наиболее тяжелого режима работы (максимум неограниченных перенапряжений  $6-6,1 U_{фм}$ ), составляет порядка  $w_{ввд,1} = 1400 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$  или 504 Дж. Следовательно, допустимая длительность работы ОПН  $T_{доп} = (W_{опн, доп} / w_{ввд,1}) \cdot 0,01$  не превышает 3–4 сек.

Статистические расчеты и полученная функция распределения энергии, выделяемой в ОПН-35 кВ, установленном в конце ВЛ 40 км, за один цикл «зажигание – гашение – зажигание» показывают, что энергия, выделяемая в ОПН при ОДЗ, с вероятностью 0,95 не превышает 310 Дж. При этом допустимое время, в течение которого ОПН в конце протяженной ВЛ может ограничивать перенапряжения при ОДЗ в сети с изолированной нейтралью, равно 5 сек.

Следует отметить, что эти вероятности получены для наиболее тяжелых условий работы ОПН (ОПН установлен в конце протяженной ВЛ, гашение дуги ОДЗ происходит в первые переходы тока через нулевое значение, повторные пробои происходят вблизи максимума ЭДС в каждый полупериод).

При резистивном заземлении нейтрали ( $R_N = 4 \text{ кОм}$ ) энергия, выделяющаяся в ОПН в конце ВЛ длиной 40 км, за один цикл «зажигание – гашение – зажигание» снижается до 108 Дж, а допустимая длительность работы ОПН в режиме ограничения перенапряжений при ОДЗ в сети не превышает 15–20 сек.

Таким образом резистивное заземление нейтрали не устраняет полностью проблему тепловой устойчивости ОПН установленных на концах протяженных ВЛ при длительных ОДЗ.

Следует отметить, что согласно [7] в сети с изолированной нейтралью с токами однофазного замыкания на землю  $I_{озз} = 10 \text{ А}$  длительность ОДЗ при расчете энергоемкости ОПН предлагают оценивать по эмпирической формуле. Для сети с током 10 А это время примерно 0,3 сек. Возможная длительность ОДЗ в реальных воздушных распределительных сетях, определяющая возможность применения ОПН, мало изучена и требует специальных экспериментальных исследований.

Высокоомный резистор в нейтрали сети 35 кВ, являясь наиболее эффективным способом повышения надежности работы ОПН, не ограничивает высокочастотные перенапряжения, возникающие при повторных зажиганиях дуги в удаленных точках где они достигают  $(3,5-3,8) U_{фм}$ .

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

- при исследовании переходных процессов, вызванных ОДЗ в электрических сетях, необходим учет волновых процессов, возникающих в линиях электропередачи;
- наибольшие кратности перенапряжений при ОДЗ наблюдаются в конце тупиковых линий электропередачи и могут достигать  $(4,3-5,6) U_{фм}$ ;
- применение ОПН для ограничения перенапряжений, вызванных однофазными дугowymi замыканиями, приводит к существенному ограничению перенапряжений, однако при длительном ОДЗ существует вероятность их теплового разрушения. В возможных наиболее тяжелых режимах ограничения перенапряжений допустимая длительность их работы составляет 3–4 секунды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов Н.И., Ширковец А.И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Энергоэксперт. 2010. № 2.
2. Назарычев А.Н., Пугачев А.А., Титенков С.С. Комбинированное заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ. Мифы и реальность // Новости ЭлектроТехники. 2016. № 3(99).
3. Мионов И.А. Режимы заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ. // Электрические станции. 2008. № 4.
4. Правила устройства электроустановок. Издание 7 М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
5. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.
6. Кадомская К.П., Тихонов А.А., Цырикова О.В., Курсиш В.А. Процессы при однофазных дугowych замыканиях в сетях 6–35 кВ с учетом распределенности параметров воздушных линий // Известия вузов. Энергетика. 1994. – № 1/2. с. 3–8.
7. Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6–35 кВ. – Москва, ОАО «Институт Энергосетьпроект», 2001.