

# ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

ГУСЕВ Ю.П., КОСАРЕВ С.А., НИУ «МЭИ», кафедра «Электрические станции»

В современных распределительных сетях напряжением 6(10) кВ, в условиях плотной городской застройки все шире используются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, более чувствительные, чем кабели с бумажно-масляной изоляцией, к перенапряжениям, обусловленным возникновением однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) с перемежающейся электрической дугой. Для таких сетей вопрос выбора режима заземления нейтрали [1, 2] чрезвычайно актуален. В статье представлены результаты расчетно-теоретического исследования перенапряжений, возникающих при перемежающихся ОЗЗ в сети 10 кВ с пофазно экранированными кабелями, с целью разработки рекомендаций по снижению аварийности и повышению электробезопасности.

Для исследования была разработана расчетная модель участка электрической сети, схема которого изображена на рис. 1. В центре питания (ЦП) установлен понижающий трансформатор Т1 с номинальной мощностью 40 МВА и номинальными напряжениями 115/11 кВ. Группа соединения обмоток выбрана Y0/Y-0. Такой трансформатор облегчает регистрацию напряжения на нейтрали сети 10 кВ относительно земли. Рассмотрено состояние сети с планомерно или аварийно отключенным ду-

госящим реактором (ДГР), что соответствует режиму сети с изолированной нейтралью. Это состояние сети является особо опасным, т.к. суммарный ёмкостной ток замыкания на землю сети может оказаться значительно больше установленных ПУЭ пределов [3].

Отходящие кабельные линии подключаются к шинам ЦП через токоограничивающий реактор LR типа РБДГ 10-4000-0.105У3, что обеспечивает ограничение токов трехфазных коротких замыканий до 11,8 кА. В мо-

дели предусмотрено подключение линии с кабелями  $3 \times (1 \times 240 \text{ мм}^2)$  с изоляцией из сшитого полиэтилена, в конце которой произошло ОЗЗ. Длина кабелей была выбрана с учетом допустимого падения напряжения. Прокладка кабелей принята треугольником без просветов. Для получения расчетных параметров кабельной линии использовалась программа EMTP-RV (Powersys), в частности, модуль CABLE DATA. Кабельная линия имеет заземление экранов с двух сторон, при этом сопротивления заземляющих устройств ЦП и в конце рассматриваемой линии составляют 0,5 Ом.

Известны несколько гипотез, лежащих в основе математического описания процессов, связанные с перемежающимися ОЗЗ [4]. Важную роль в этих гипотезах играют условия погасания дуги. Так, по гипотезе Петерсена, соответствующей максимальным оценкам перенапряжений, погасание дуги происходит при первом прохождении через ноль высокочастотной составляющей тока дуги. Эта гипотеза основана на идеализации, цель которой – оценить максимально возможные перенапряжения, расчеты с ее использованием дают завышенное значение кратности перенапряжений. Однако в тех случаях, когда электрическая прочность изоляции восстанавливается быстро, например, когда дуга горит под

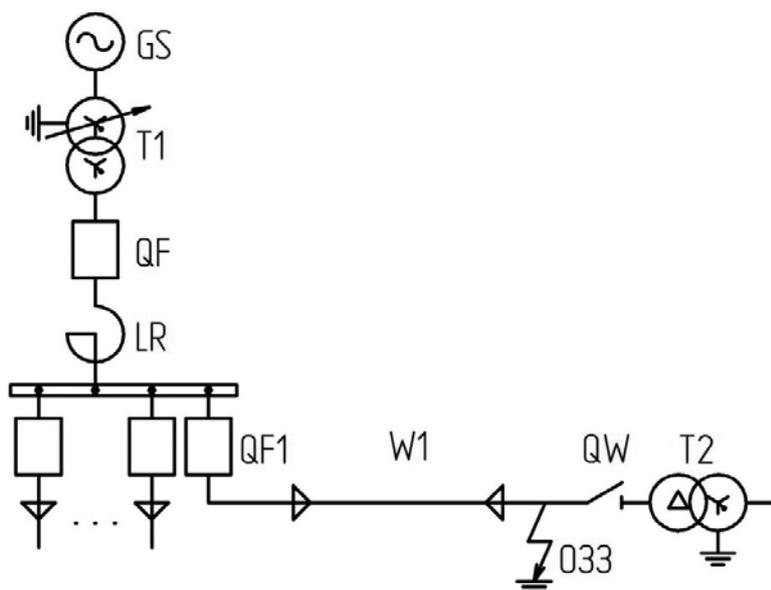


Рис. 1. Схема моделируемого участка сети

маслом или в узкой щели, в частности, в трещине кабельной муфты, оправдано применение гипотезы Петерсена. Недостаток данной гипотезы – ее слабое физическое и экспериментальное обоснование, кроме того, возможна ситуация, когда данная гипотеза принципиально неприменима [5].

Более предпочтительными являются гипотезы Петерса – Слепяна и Белякова [6]. Согласно первой, погасание дуги происходит после прохождения через ноль составляющей тока дуги промышленной частоты. Гипотеза Петерса – Слепяна хорошо описывает свободно горящие дуги на открытом воздухе, например, возникающие при перекрытии гирлянд изоляторов. Электрическая прочность изоляции после погасания дуги восстанавливается сравнительно медленно. Получаемые по ней значения перенапряжений оказываются ниже, чем по гипотезе Петерсена.

Гипотеза Белякова связывает момент погасания дуги с величиной максимума напряжения на поврежденной фазе после прохождения мгновенного значения полного тока дуги через ноль, при этом восстанавливающееся напряжение должно быть менее 40 % амплитуды фазного напряжения. Эксперименты с дугowymi замыканиям в действующих сетях, проведенные Н.Н. Беляковым в 1950-х годах, позволяют считать эту гипотезу физически обоснованной. В большинстве современных публикаций по данной тематике расчеты выполняются с использованием этих гипотез. В данной работе предложена и апробирована обобщенная гипотеза, позволяющая в рамках одной модели использовать и гипотезу Петерсена, и гипотезу Белякова. Это обеспечивается использованием в качестве условий гашения дуги прохождения мгновенным значением полного тока дуги через ноль, при этом среднеквадратичное значение тока дуги не превышает заданное пороговое значение, являющееся параметром настройки модели дуги.

Варьируя в настройках модели дуги значение порогового тока дуги, можно получить результаты, максимально приближенные к результатам натуральных экспериментов и к результатам расчетов с применением других известных гипотез.

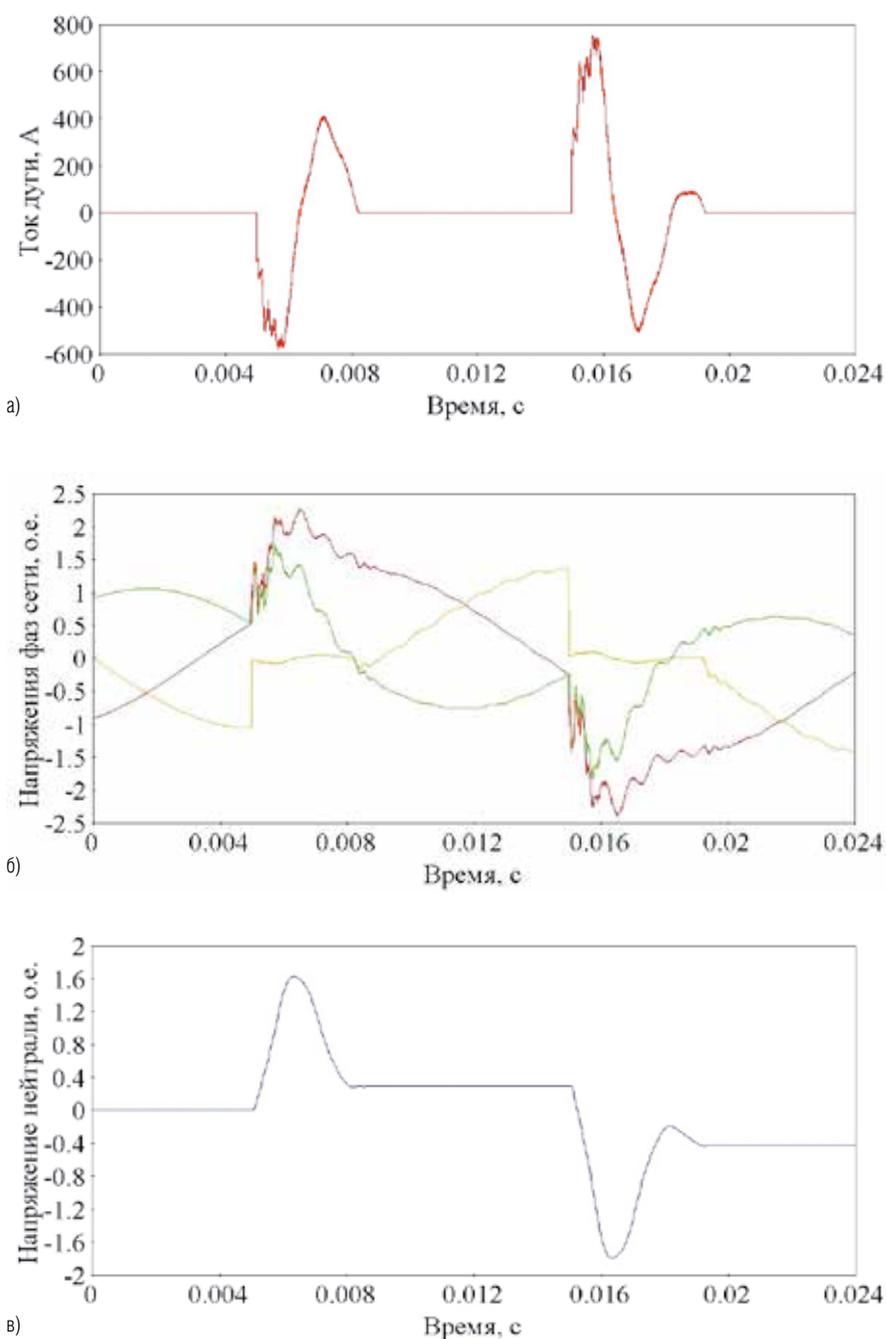


Рис. 2. а) ток дуги, А; б) напряжения фаз сети в месте повреждения: А (–), В (–) и С (–), о.е.; в) напряжение нейтрали Т1, о.е.

В расчетной модели, использованной в данном исследовании, было принято, в соответствии с [7], длину и площадь сечения столба дуги считать неизменными, соответствующими начальной стадии горения дуги. Эти параметры используются при вычислении мгновенных значений сопротивления дуги.

Расчеты выполнены для сети с емкостным током 71 А, что обеспечивалось подключением к шинам ЦП

сосредоточенной емкости 12 мкФ. Дуговое ОЗЗ создавалось в фазе А, в конце линии W1. Было принято, что зажигание дуги происходит в моменты достижения фазным напряжением амплитудных значений в фазе А в каждом полупериоде промышленной частоты. Кабельная линия до возникновения ОЗЗ работала на холостом ходу. Ток дуги, кратности перенапряжений на фазах и напряжение нейтрали трансформатора Т1 для двух

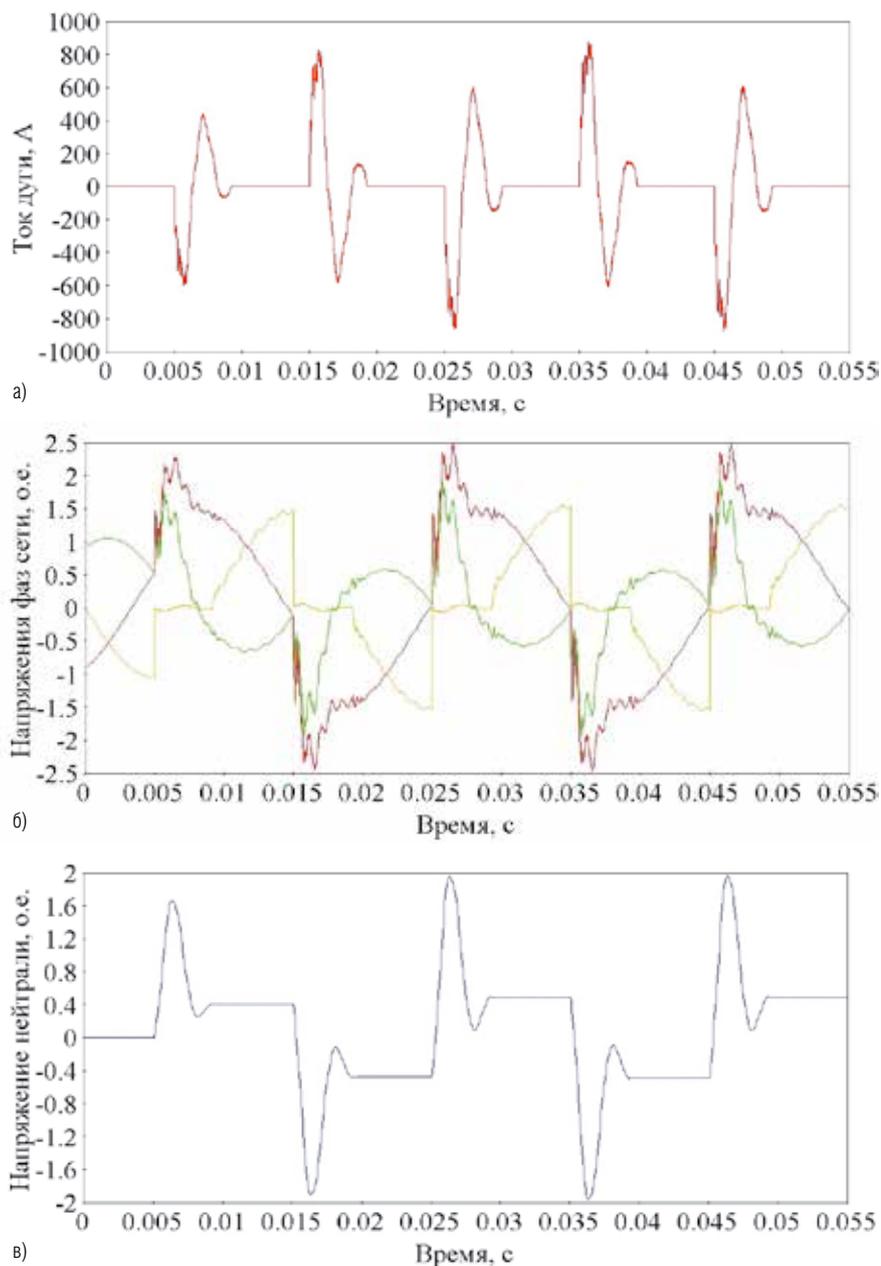


Рис. 3. а) ток дуги, А; б) напряжения фаз сети в месте повреждения: А (-), В (-) и С (-), о.е.; в) напряжение нейтрали Т1, о.е.

последовательно возникающих зажиганиях дуги при ОЗЗ показаны на рис. 2, а–в.

При первом зажигании дуги возникает переходный процесс, сопровождающийся высокочастотными колебаниями. Пока горит дуга, в ее токе, кроме высокочастотных составляющих, присутствует составляющая тока промышленной частоты. Но она существенно меньше доминирующей высокочастотной составляющей, т.к. ее фаза опережает напряжение фазы А на угол, близкий к 90 электрическим

градусам, и при зажигании дуги ее мгновенные значения близки к нулю. Поскольку сеть имеет множество контуров, то свободные высокочастотные составляющие тока дуги и напряжения нейтрали имеют сложный гармонический состав. Для рассматриваемой схемы, доминирующей составляющей тока дуги будет ток, связанный с контурами, в которых, кроме самого кабеля, входят токоограничивающий реактор LR, обмотки трансформатора Т1 и фазные емкости сети относительно земли.

После погасания дуги, при переходе тока через ноль, на фазах остается электрический заряд, который обуславливает появление в нейтрали Т1 постоянного напряжения относительно земли. При погасшей дуге ОЗЗ прерывается, и заряд с нейтрали может «стекать» только за счет утечек изоляции на землю, но, поскольку сопротивление изоляции кабелей велико, напряжение нейтрали можно считать неизменным (постоянным) до следующего зажигания дуги.

После повторного зажигания дуги вновь начинается переходной процесс, однако теперь напряжение нейтрали в режиме, предшествующем зажиганию дуги, имеет ненулевое значение. В этом случае параметры высокочастотных составляющих в токе ОЗЗ и напряжении нейтрали будут отличаться от параметров при первом зажигании дуги. После очередного погасания дуги может произойти увеличение электрического заряда на фазах сети и увеличение напряжения нейтрали. Перенапряжения в неповрежденных фазах сети могут при этом достигать значений, превышающих 3–4 амплитуды фазного напряжения [2].

Для исследования возможности применения среднеквадратичного значения высокочастотной составляющей тока дуги для определения момента ее погасания были рассчитаны пять последовательных зажиганиях дуги в месте ОЗЗ. Результаты представлены на рис. 3 а–в. Значение порогового тока гашения дуги было выбрано из условия равенства восстанавливающегося напряжения 0,4 амплитуды фазного напряжения, что соответствует гипотезе Белякова и обеспечивает получение расчетных оценок по перенапряжениям, приближенных к экспериментальным значениям.

Максимальная расчетная кратность перенапряжений на неповрежденных фазах достигает 2,47 о.е., что хорошо согласуется с данными, приведенными в [2].

В электроустановках с другими параметрами ОЗЗ и окружающей среды кратность перенапряжений может существенно отличаться от вышеприведенных. Был проведен расчет при значении порогового тока гашения дуги 1800 А, что дела-

ет модель соответствующей гипотезе Петерсена. Результаты расчетов приведены на рис. 4 а–в. Амплитуда свободных колебаний напряжения в каждом цикле «зажигание–гашение» дуги увеличивается, что приводит к увеличению электрического заряда на фазах после погасания дуги. Как следствие, с каждым последующим циклом постоянная составляющая напряжения нейтрали возрастает, кратность перенапряжений достигает 5 амплитуд фазных напряжений и выше. Данный случай демонстрирует возможность возникновения в сети перенапряжений, превышающих прочность изоляции кабелей, а также другого электрооборудования подстанций.

### ВЫВОДЫ

1. Разработана расчетная модель переходных процессов, вызванных однофазными дугowymi замыканиями на землю в распределительных сетях. Положенная в основу модели гипотеза определения условий погасания дуги хорошо согласуется с другими известными гипотезами и с известными экспериментальными данными.

2. Показано влияние на кратность перенапряжений, обусловленных перемежающейся электрической дугой, трех составляющих: напряжения промышленной частоты, напряжения высокочастотных колебаний и напряжения, обусловленного электрическим зарядом, остающимся после погасания дуги. Приведены результаты расчетов, соответствующие условиям появления перенапряжений кратностью до 5 амплитуд фазного напряжения и более.

3. Результаты исследования позволяют оценивать, по кратности перенапряжений, варианты схемно-технических решений при выборе способа заземления нейтрали в электрических сетях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю, Энергоэксперт № 2 – 2010.
2. СТО ГАЗПРОМ 2-1.11-070-2006 Методические указания по выбору режима заземления нейтрали в сетях

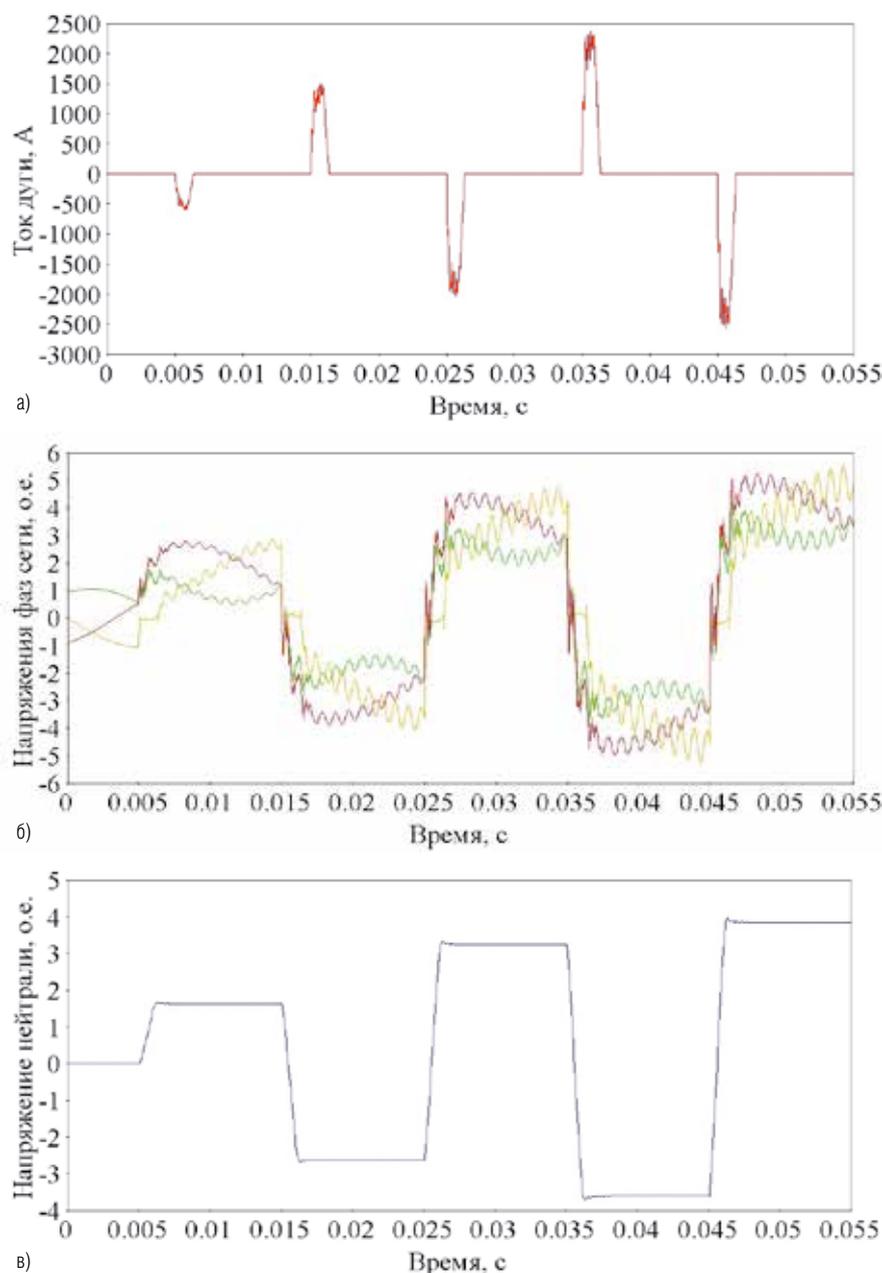


Рис. 4. а) ток дуги, А; б) напряжения фаз сети в месте повреждения: А (–), В (–) и С (–), о.е.; в) напряжение нейтрали Т1, о.е.

напряжением 6 и 10 кВ дочерних обществ и организаций ОАО «Газпром».

3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание седьмое (РФ), 1.2.16.

4. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей ред. Д.В. Разевига. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976.

5. Об ограниченности теории Петерсена для исследования дугowych перенапряжений в городских электри-

ческих сетях 6–10 кВ, Мусин А.Х., Козлов А.И., Никитина Е.С., Степаков В.С. Ползуновский вестник, № 1, 2002.

6. Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959.

7. Воронин А.А., Кулаков П.А. Математическая модель электрической дуги, Вестник Самарского государственного технологического университета. Серия «технические науки», № 4 (36), 2013.