

## **Моделирование процессов в цикле ОАПВ с использованием программного комплекса ЕМТР**

**Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. (Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, С.-Петербургский Государственный Политехнический Университет)**

### **Введение**

Однофазное автоматическое повторное включение линий электропередачи (ОАПВ) является эффективной мерой повышения надежности энергоснабжения по ВЛ сверхвысокого напряжения (СВН).

Основной задачей, возникающей при применении ОАПВ, является установление требуемой для успешности его осуществления длительности бестоковой паузы в каждой конкретной проектируемой или эксплуатируемой ВЛ СВН.

Требования к правильному заданию длительности бестоковой паузы ОАПВ обусловлены тем, что после отключения аварийной фазы с двух сторон дуга в месте КЗ продолжает гореть, получая подпитку от неотключенных фаз линии, находящихся на относительно небольшом расстоянии от аварийной фазы (так называемая дуга подпитки), и команда на повторное включение должна быть выработана после погасания дуги.

Опыты ОАПВ, осуществляемые в энергосистемах по специально разрабатываемым техническим программам с использованием различной измерительной аппаратуры, дают разностороннюю, важную и надежную информацию о переходных процессах, сопровождающих ОАПВ, процессе гашения дуги подпитки и временах гашения. Однако проведение таких опытов является весьма дорогостоящим и нежелательным для энергосистемы. Поэтому важной задачей является создание цифровой модели, позволяющей анализировать процессы при ОАПВ, не проводя натуральных экспериментов.

Наиболее сложным для моделирования элементом является открытая дуга переменного тока. При расчетах переходных процессов в цикле ОАПВ использовалась реализованная нами в известном программном комплексе ЕМТР математическая модель открытой дуги переменного тока, алгоритм которой описан в [1]. Дуга в ЕМТР представляет из себя специальный отдельный блок расчетной схемы, созданный с использованием возможностей встроенного в ЕМТР языка программирования (Model's menu).

Не останавливаясь на этом подробно, укажем только, что за основу была принята каналовая цилиндрическая симметричная модель вертикальной дуги, стабилизированной восходящими конвективными потоками газа. После введения некоторых допущений математическое описание процессов в дуге сводится к динамическому уравнению баланса энергии в частных производных второго порядка относительно температуры. Критерием погасания дуги, уравнение которой решалось совместно с уравнениями

переходных процессов внешней сети, являлась потеря проводимости всего дугового канала.

В настоящей статье в сжатой форме приводятся результаты сравнения компьютерных расчетов (с использованием реализованной в EMTP модели дуги подпитки) с натурными экспериментами ОАПВ на ВЛ 750 кВ [2, 3].

Здесь также приведены расчеты по исследованию условий осуществления ОАПВ на проектируемой ВЛ 750 кВ КАЭС – Череповец длиной 272 км. По результатам расчетов сделаны выводы и даны рекомендации по осуществлению ОАПВ на этой ВЛ.

### Сравнение результатов расчетов с натурными экспериментами

Для гашения дуги подпитки существенны длина дугового промежутка и его расположение. Наименее благоприятны условия гашения дуги, и одновременно близка к наименьшей длина дугового промежутка при его расположении вдоль поддерживающей гирлянды изоляторов ВЛ.

Инициирование дугового замыкания осуществляют обычно с помощью тонкой алюминиевой или медной проволоочки, натягиваемой параллельно поддерживающей гирлянде.

Возможны два принципиально различных способа создания дугового КЗ на ВЛ:

- 1) включение под напряжение ВЛ с заранее установленной на гирлянде изоляторов одной из фаз проволочкой;
- 2) внезапное перекрытие гирлянды изоляторов проволочкой либо внезапное подключение гирлянды с проволочкой к ВЛ, находящейся под напряжением или под нагрузкой.

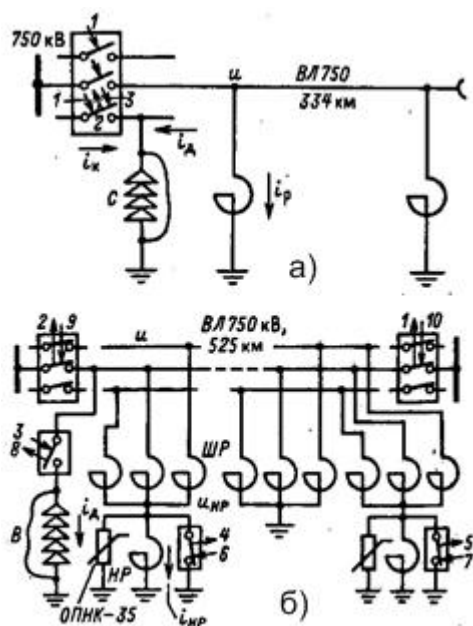


Рис. 1. Схемы опытов ОАПВ.

Коммутации, осуществляемые при реализации опытов ОАПВ с короткими замыканиями по этим способам, иллюстрируются схемами рис.1,а-б, пригодными для ВЛ как без шунтирующих реакторов, так и с ними.

Характерные экспериментальные осциллограммы из [3], соответствующие этим схемам, приведены на рис.2-3.

Форма тока подпитки после отключения КЗ существенно зависит от способа создания КЗ и наличия на ВЛ реакторов. Если на ВЛ нет шунтирующих реакторов, включение ВЛ на КЗ, как и внезапное КЗ, приводит к протеканию “установившегося” тока подпитки. От истинно установившегося этот ток может отличаться искажениями, создаваемыми нелинейным сопротивлением дугового канала и особенно неуспешными

попытками гашения дуги. Если на ВЛ имеются шунтирующие реакторы, но КЗ создается включением под напряжение ВЛ с закороткой (схема рис.1,а), то напряжение на фазе ВЛ и ток в реакторе в момент включения равны нулю; в этом случае после отключения КЗ через канал дуги протекает только “установившийся” ток подпитки (рис.2). Если же ВЛ с шунтирующим реактором поставлена под напряжение (или нагрузку) до возникновения КЗ, форма тока подпитки существенно изменяется. Действительно, в шунтирующих реакторах ВЛ под напряжением протекает синусоидальный ток. В момент подключения закоротки около реактора в нем возникает апериодический ток, начальное значение которого равно мгновенному значению тока реактора к моменту КЗ. Если, например, КЗ возникает в момент, когда напряжение на ВЛ переходит через нуль, то апериодическая составляющая тока реактора достигнет амплитуды его рабочего тока (340 А для реактора 750 кВ). Заметим, что апериодическая составляющая может еще удвоиться, если КЗ возникает непосредственно после включения ВЛ, когда ток реактора увеличен за счет апериодической составляющей от включения. Практически, однако, такой случай маловероятен, но даже без этого удвоения начальное значение апериодической составляющей велико: в зависимости от количества реакторов на ВЛ оно может составить 0.3-1.0 кА в ВЛ 750 кВ.

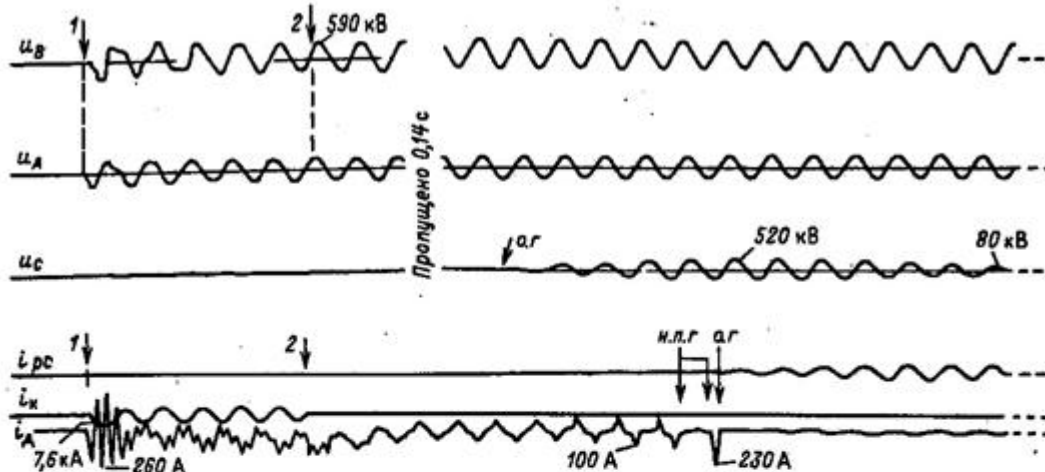


Рис.2. Осциллограммы опыта ОАПВ на ВЛ 750 кВ по схеме рис.1,а.

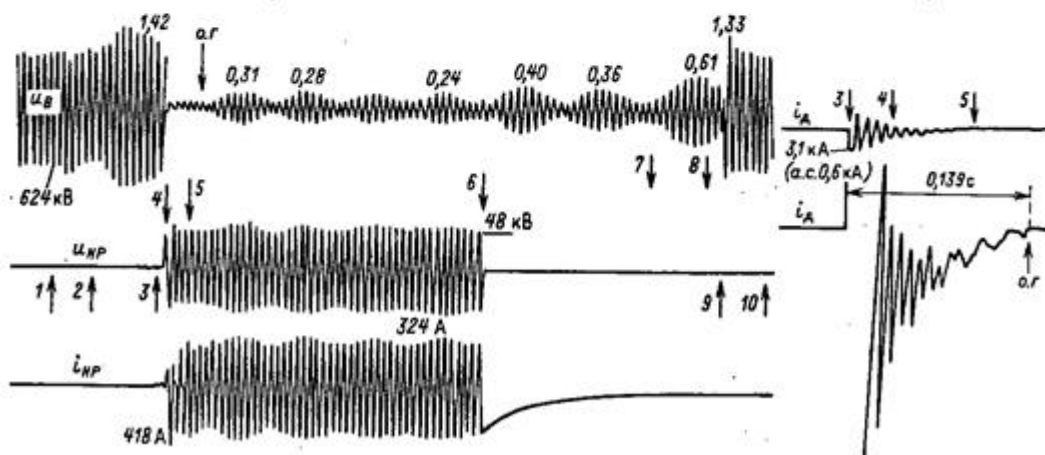


Рис.3. Осциллограммы опыта ОАПВ на ВЛ 750 кВ по схеме рис.1,б.

Последовательность коммутаций в предложенном на рис.1,б способе отличается от используемой при обычных опытах тем, что подключение гирлянды с проволокой к фазе ВЛ производится не до, а после отключения этой фазы от питающих шин. Отключение фазы ВЛ приводит к возникновению переходного процесса, после затухания которого напряжение этой фазы должно установиться на уровне, который определяется степенью поперечной компенсации емкостей ВЛ реакторами и в зависимости от нее может оказаться как ниже, так и выше первоначального, близкого к номинальному или наибольшему рабочему напряжению.

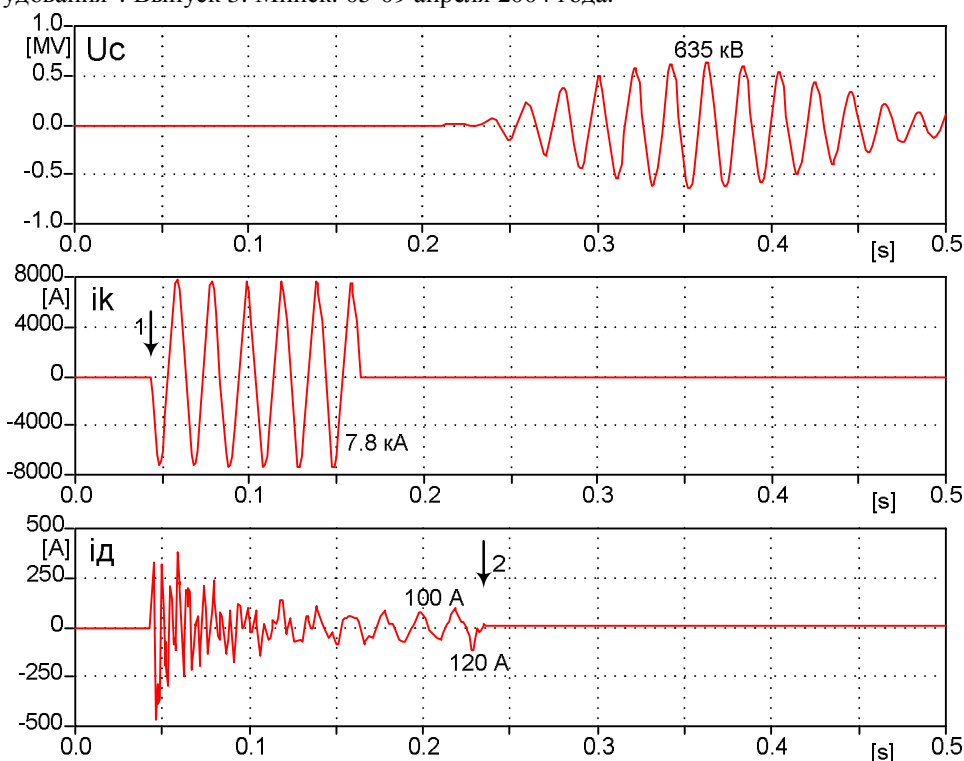


Рис.4. Результаты расчета ОАПВ на ВЛ 750 кВ в схеме рис.1,а по программе ЕМТР с использованием модели дуги.

Переходный процесс изменения напряжения на фазе после ее отключения имеет вид биений с заполнением в виде синусоиды промышленной частоты (рис.3). При этом практически во всех схемах переходный процесс начинается с повышения напряжения в биениях сверх первоначального значения. Подключение в этот момент гирлянды с проволочкой к фазе ВЛ вызывает протекание через проволочку большого переходного тока подпитки, амплитуда которого достигает 2-4 кА. Этот ток образуется за счет разряда емкости ВЛ и за счет повышенной аperiodической составляющей от шунтирующего реактора и протекает в течение соответственно 0.03-0.05 и 0.1-0.3 с (рис.3).

Затухание аperiodической составляющей определяется отношением активного сопротивления дуги к индуктивному реактора и происходит сравнительно медленно. По опытным данным в сети 750 кВ оно продолжается 0.3-0.32 с. Наложение аperiodической составляющей не только в несколько раз увеличивает амплитуду полного тока подпитки, но и препятствует переходам тока подпитки через нуль в течение нескольких десятых секунды, чем задерживает гашение тока подпитки.

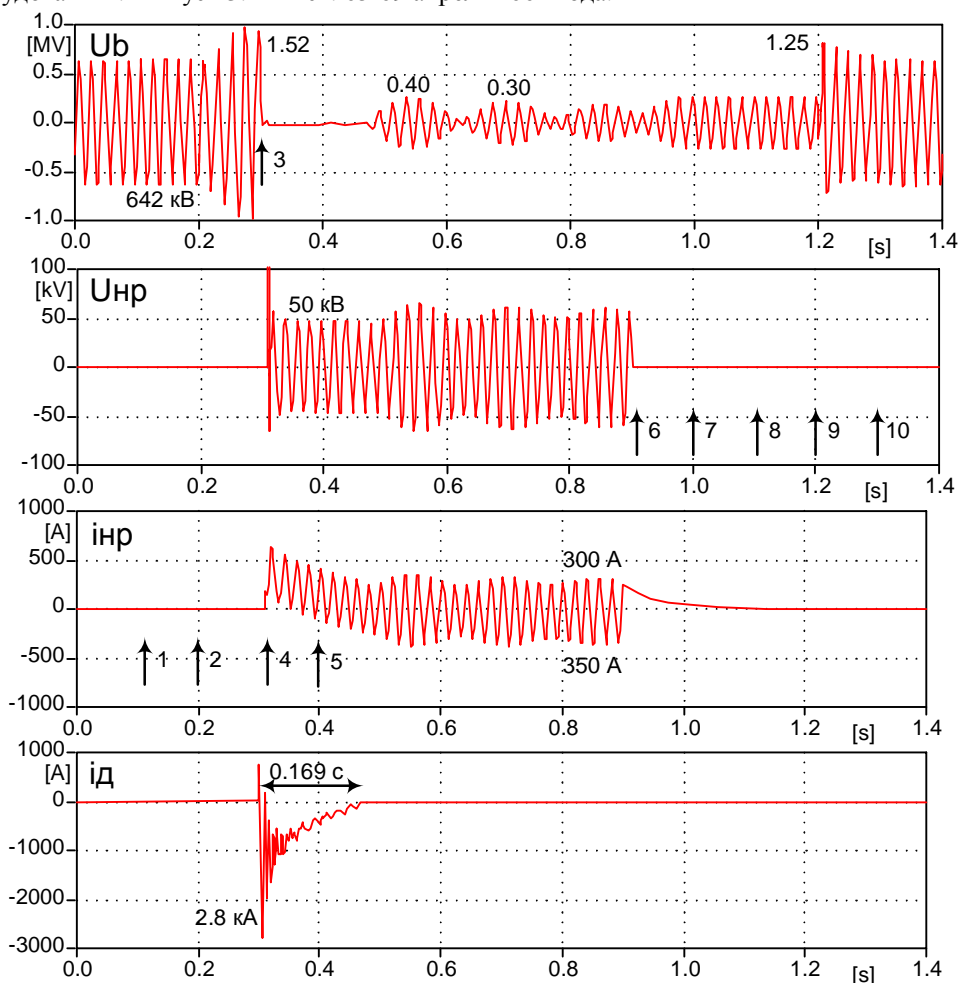


Рис.5. Результаты расчета ОАПВ на ВЛ 750 кВ в схеме рис.1,б по программе EMTP с использованием модели дуги.

Полагают возможными два механизма гашения дуги подпитки: ее растяжение до критической длины, когда рост сопротивления дуги приводит к уменьшению тока, усилению деионизации канала и дальнейшему возрастанию сопротивления вплоть до прекращения тока, либо обрыв дуги после перехода тока через нуль, когда восстанавливающееся напряжение оказывается недостаточным для пробоя деионирующегося промежутка и ток оказывается оборванным без его предварительного уменьшения. В последнем случае удлинение канала дуги может быть небольшим.

Анализ всего опытного материала, полученного в сетях 330-1150 кВ, особенно в испытаниях на ВЛ 750 кВ, показал, что при практически встречавшихся длинах ВЛ СВН, достигавших 525 км, гашение дуги происходило почти исключительно по второму механизму. Поэтому удлинение дуги в процессе ее горения в предлагаемой модели дуги переменного тока не учитывалось.

Созданная в EMTP модель не учитывает возможных повторных пробоев дугового промежутка после погасания дуги подпитки. Поэтому, в этом случае, возможность повторного пробоя промежутка следует оценивать по расчетным осциллограммам восстанавливающегося напряжения на отключенной фазе с учетом известных экспериментальных данных [3] по

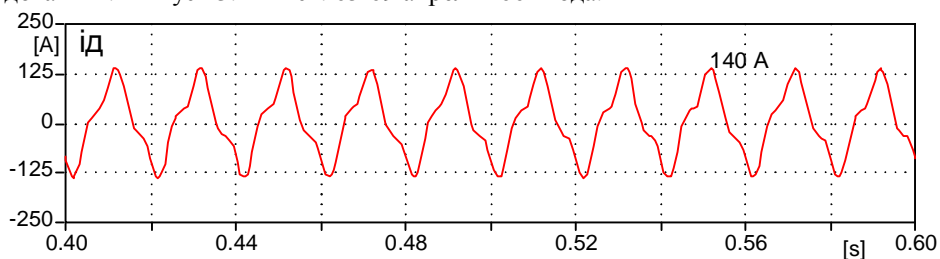


Рис.6. Фрагмент расчетной осциллограммы тока подпитки в схеме рис.1,б без нулевых реакторов. ОАПВ неуспешно.

электрической прочности бывшего дугового промежутка в зависимости от времени, прошедшего с момента обрыва тока подпитки.

Полученные в ЕМТР с использованием модели дуги расчетные осциллограммы для схем рис.1,а-б приведены на рис.4-5. Видно, что расчеты дали качественно и количественно достаточно близкие к экспериментальным (рис.2-3) результаты.

На рис.6 приведен фрагмент расчетной осциллограммы тока дуги в условиях рис.1,б, но при отсутствии на линии нулевых реакторов. Амплитуда установившегося тока подпитки в этом случае составила 140 А, дуга не погасла, ОАПВ было неуспешно. Этот расчет подтверждает эффективность использования нулевых реакторов для подавления тока подпитки при ОАПВ.

Приведенные в настоящей статье расчеты (а также множество других расчетов, не вошедших сюда) позволяют считать реализованную в ЕМТР модель дуги адекватной, использовать ее в расчетах процессов ОАПВ как на уже эксплуатируемых, так и на проектируемых и строящихся ВЛ СВН.

### Расчеты ОАПВ на ВЛ 750 кВ КАЭС - Череповец

Схема анализируемой электропередачи приведена на рис.7.

Длина проектируемой ВЛ 750 кВ КАЭС – Череповец составляет 272 км. По концам линии установлены шунтирующие реакторы 3x110 МВА каждый. Геометрические параметры линии, циклы транспозиции, эквивалентные параметры примыкающих к линии систем были предоставлены институтом “Энергосетьпроект”.

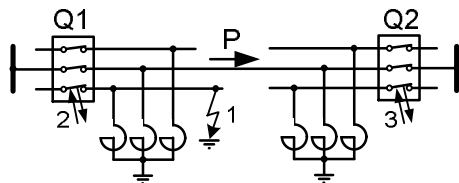


Рис.7. Схема опыта ОАПВ на ВЛ 750 кВ КАЭС-Череповец.

Величина тока подпитки носит статистический характер, обусловленный такими случайными факторами, как фаза линии, на которой произошло КЗ; угол между напряжениями по концам линии, зависящий от значения передаваемой мощности; расположение места КЗ на линии; число и

расположение по концам линии шунтирующих реакторов; уровень рабочего напряжения; величина и расположение дугового промежутка; погодные условия. Следует иметь в виду также, что гашение дуги подпитки зависит от

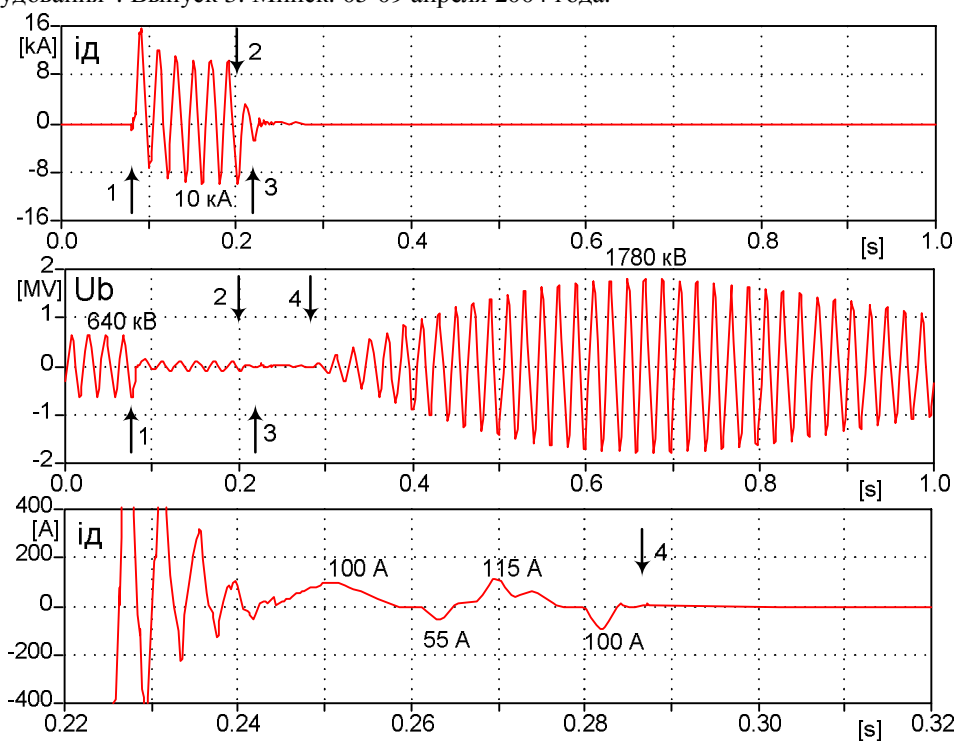


Рис.8. Результаты расчета ОАПВ на ВЛ 750 кВ в схеме рис.7.

случайного значения апериодической составляющей тока подпитки и его несинусоидальности.

Для рассмотренной ВЛ 750 кВ КАЭС – Череповец (рис.7) была проведена серия расчетов по программе ЕМТР, учитывающих различные влияющие на ток подпитки факторы.

На рис.8 приведены результаты расчета (осциллограммы тока в месте повреждения и напряжения на аварийной фазе) для одного из рассмотренных при проведении работы случаев.

Для рис.8 условия таковы, что КЗ возникает в  $t=0.08$  с от начала расчета (момент 1) в фазе В вблизи начала линии. В  $t=0.2$  с (момент 2) и в  $t=0.22$  с (момент 3) выключатели по концам ВЛ отключают аварийную фазу. Обе группы шунтирующих реакторов, установленных на линии, находятся в работе.

Видно, что отключение КЗ сопровождается волновым процессом разряда частично заряженной фазы ВЛ на место замыкания. В дуге возникает достаточно быстро затухающая переходная составляющая тока подпитки с амплитудой в сотни ампер. В силу кратковременности эта составляющая слабо влияет на процесс гашения дуги подпитки.

Помимо высокочастотной составляющей в токе подпитки присутствует апериодическая составляющая. Затухание апериодической составляющей определяется отношением активного сопротивления дуги к индуктивному реактору и происходит сравнительно медленно. Наличие апериодической составляющей увеличивает амплитуду полного тока подпитки, препятствует переходам тока подпитки через нуль, чем задерживает гашение дуги.



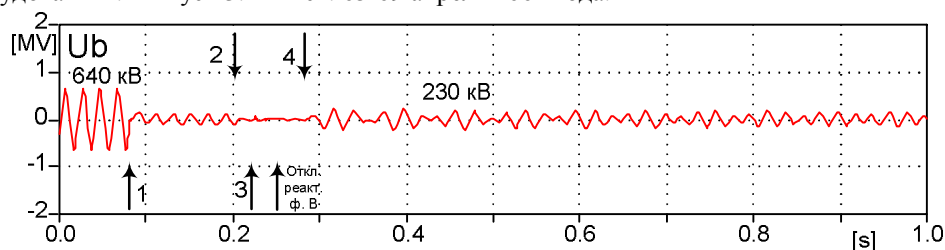


Рис.9. Результаты расчета ОАПВ на ВЛ 750 кВ в схеме рис.7 при отключении фазы В одного из двух установленных на линии реакторов.

В расчете, результаты которого приведены на рис.8, а также во всех других, дуга подпитки гасла (момент 4) без применения каких-либо специальных способов ее подавления.

Традиционным способом подавления тока подпитки в электропередачах высших классов напряжений 750-1150 кВ является установка в нейтраль шунтирующих реакторов дополнительного компенсационного реактора [3]. Однако, опыт эксплуатации [3] говорит об успешном применении ОАПВ на линиях 500-750 кВ длиной до 500-600 км даже при отсутствии компенсационных реакторов.

Учитывая результаты расчета, подкрепляемые опытом эксплуатации, установка на ВЛ 750 кВ КАЭС – Череповец длиной 272 км дополнительных компенсационных реакторов не требуется.

Вновь обратимся к рис.8. Как видно, после гашения дуги подпитки отключенная фаза попадает в условия, близкие к резонансным. Это приводит к недопустимо большому росту напряжения на отключенной фазе. Для исключения такого повышения напряжения по результатам расчетов рекомендуется у одного из двух линейных ШР отключать на время прохождения цикла ОАПВ ту фазу, для которой на линии запущен этот цикл.

Напряжение на отключенной фазе В в условиях рис.8 при отключении одноименной фазы одного из ШР приведено на рис.9. Полученные в этом расчете значения восстанавливающегося напряжения вполне допустимы как по условиям работы изоляции линии и присоединенного к ней оборудования, так и по условиям отсутствия повторных пробоев промежутка после погасания дуги подпитки.

Используя упрощенную емкостную схему замещения ВЛ с реакторами для определения напряжения на отключенной фазе во время бестоковой паузы ОАПВ, приведенную в [4], легко проверить эффективность предложенной меры снижения восстанавливающегося напряжения.

Во всех проведенных для рассматриваемой ВЛ 750 кВ длиной 272 км расчетов амплитуда установившегося тока подпитки  $I_{Д\max}$  не превосходила 70 А. Это хорошо согласуется с данными [3].

В [3] предложена аппроксимация зависимости времени гашения дуги с вероятностью 0.9 от амплитуды тока подпитки  $t_{Г0,9} = 0.2 + 2.86 \cdot 10^{-4} \cdot I_{Д\max}^2$ . При  $I_{Д\max} = 70$  А, используя приведенную зависимость, найдем  $t_{Г0,9} = 1.6$  с. Так как реальные токи подпитки для рассмотренной ВЛ меньше принятого в

расчете максимального значения, то вероятность гашения дуги будет заметно выше.

### **Выводы по модели дуги**

1. В программе ЕМТР создана модель открытой дуги переменного тока.
2. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных (по ЕМТР с использованием созданной модели дуги) осциллограмм процессов при ОАПВ ВЛ СВН. По результатам сравнения предлагаемая модель признана адекватной для использования в расчетах ОАПВ.

### **Выводы по ВЛ 750 кВ КАЭС - Череповец**

3. Проведенные расчеты показали, что в цикле ОАПВ ВЛ 750 кВ КАЭС - Череповец длиной 272 км для обеспечения гашения дуги подпитки установки компенсационных реакторов в нейтрали линейных ШР не требуется.
4. Параметры схемы таковы, что в цикле ОАПВ имеет место резонансное повышение напряжения на отключенной фазе ВЛ. Для исключения такого повышения напряжения по результатам расчетов рекомендуется у одного из двух линейных ШР отключать на время прохождения цикла ОАПВ ту фазу, для которой на линии запущен этот цикл.
5. Для обеспечения надежного гашения дуги подпитки рекомендуется согласно [3] выбрать время бестоковой паузы цикла ОАПВ равным 1.6 с.

### **Литература**

- [1] **Гавриков В.И., Гамилко В.А., Евдокунин Г.А.** Математическое моделирование открытой дуги переменного тока. – Энергетика, 1984, № 8.
- [2] **Гамилко В.А., Евдокунин Г.А., Кегелес М.Б., Фельдман М.Л.** Гашение открытых дуг при однофазном разрыве ВЛ 750 кВ. – Электрические станции, 1990, № 5.
- [3] **Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др.** Процессы при однофазном повторном включении линий высоких напряжений. Под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [4] **Евдокунин Г.А.** Электрические системы и сети. – СПб.: Издательство Сизова М.П., 2004.