

УДК 621.311

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН ЗАДЕРЖКИ ПРОХОЖДЕНИЯ ТОКА ЧЕРЕЗ НУЛЬ  
В ЛИНИИ “ДАТКА-КЕМИН” ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

*Ю.П. Гусев, К. Насыр уулу, Дж.Б. Рахимов*

Проведены анализ причин возможной задержки прохождения через нуль мгновенных значений тока через элегазовый выключатель (ЭВ) и приведены результаты моделирования с помощью программы EMTP-RW процессов отключения токов короткого замыкания (КЗ) при наличии на подстанциях шунтирующих реакторов (ШР).

*Ключевые слова:* аperiodическая составляющая тока; задержка прохождения тока короткого замыкания через нуль; элегазовый выключатель; шунтирующий реактор.

**ANALYZE OF POSSIBLE CAUSES DELAYS ZERO CROSSING OF CURRENT  
WHILE FAULTS CLEARING IN LINE “DATKA-KEMIN”**

*Yu.P. Gusev, K. Nasyr uulu, Dj.B. Rahimov*

The work presents the analysis of the reasons of possible delay zero of passing through instant values of current via the gas-insulated switch (GIS) and results of modeling by means of the EMTP-RW program of processes of shutdown currents of the short circuit (SC) in the presence are given in substations of the shunting reactors (SR).

*Keywords:* D.C. component of current; delayed current zero crossing of short circuit; gas insulated circuit breakers; shunt reactors.

В электрических сетях наблюдается тенденция к расширению использования ЭВ. В частности, такие ЭВ нашли применение в энергосистеме Кыргызстана (КР) как на новых, так и на реконструируемых объектах.

Масляные и воздушные выключатели, морально устаревшие и отработавшие свой ресурс, последовательно заменяются на новые ЭВ. Преимуществом ЭВ является значительное сокращение эксплуатационных затрат, повышенный коммутационный ресурс, более долгий срок службы. Однако вместе с положительными качествами новых ЭВ энергосистемы приобрели и новую проблему.

Использование быстродействующих выключателей, с одной стороны, и увеличение мощности генераторов в крупных узлах энергосистемы с другой, выявили проблему отключающей способности выключателей по содержанию аperiodической составляющей тока КЗ. Существуют два основных фактора, которые осложняют работу быстродействующей коммутационной аппаратуры. Так в 2006–2011 гг. в энергосистемах России и Казахстана произошел ряд аварий с разрушениями (взрывами полюсов) линейных ЭВ 500–750 кВ:

- в 2006 г. и 2007 г. – на ПС 1150 кВ “Кокшетауская”;

- в 2007 г. – на ПС 1150 кВ “Алтай”;
- в 2009 г. – на ПС 500 кВ “Агадырь”;
- в 2011 г. – на ПС 750 кВ “Новобрянская”.

Согласно ряду теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов [1–4], причины аварий, повлекших разрушения ЭВ, одинаковы – первичная операция отключения ЭВ без преднамеренной выдержки времени после его включения (ВО) в цикле:  $O - t_{\sigma T} - BO - 180c - BO$ . При такой последовательности коммутаций в отключаемом токе ЭВ может содержаться значительная аperiodическая составляющая, препятствующая в течение длительного времени переходу мгновенных значений отключаемого тока через нулевое значение. Так ЭВ могут не справиться не только с отключением токов аварийных режимов с большим содержанием аperiodической составляющей, но и коммутацией токов нормальных режимов.

Наибольшее содержание аperiodической составляющей в отключаемом токе ЭВ на ПС 500 кВ и выше возникает при наличии шунтирующих реакторов.

При возникновении трехфазного КЗ в открытом распределительном устройстве (ОРУ) 500 кВ Ростовской АЭС, 4 ноября 2014 г. зафиксирована

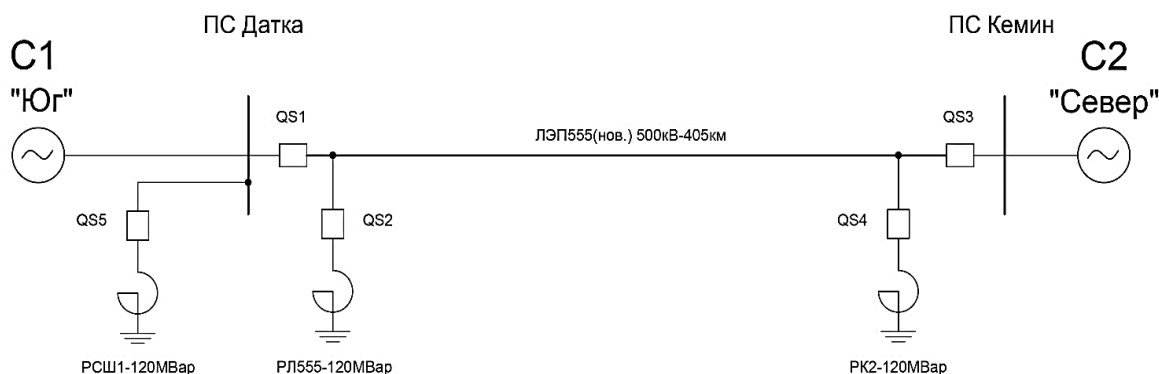


Рисунок 1 – Принципиальная упрощенная схема исследуемой ВЛ 500 кВ “Датка-Кемин”

некорректная (излишняя) работа устройств релейной защиты. Согласно [5], причиной стало насыщение трансформатора тока (ТТ) апериодической составляющей тока КЗ и наличие остаточного намагничивания его сердечников. Намагничивание произошло в процессе проведения пуско-наладочных работ.

Наличие в узлах энергосистемы мощных генераторов, трансформаторов, ШПР может создавать условия для возникновения апериодической составляющей в токе КЗ. В связи с этим, при КЗ вблизи крупных узлов повышается вероятность насыщения электромагнитных ТТ с замкнутыми сердечниками. Основными причинами насыщения ТТ при протекании через него тока КЗ являются: величина и длительность протекания апериодической составляющей тока КЗ; величина остаточной намагниченности той же полярности, которую имеет апериодическая составляющая тока КЗ [5].

В этой связи, появляется необходимость в исследовании проблемы отключающей способности ЭВ по содержанию апериодической составляющей тока КЗ.

Основные случаи, при которых в ЭВ возникают токи с большим содержанием апериодической составляющей:

- неуспешные автоматические повторные включения в линиях с ШПР;
- КЗ вблизи крупных узлов энергосистемы;
- неуспешная синхронизация генераторов [6].

При работе воздушных линий (ВЛ) с ШПР причинами, вызывающими задержку прохождения тока через нуль, являются: степень компенсации ШПР зарядной мощности ВЛ; угол напряжения на контактах ЭВ в момент включения ВЛ; величина соотношения эквивалентного активного и реактивного сопротивлений  $R_{\text{ЭКВ}} / X_{\text{ЭКВ}}$ ; параметры ВЛ; количество ШПР.

В данной работе рассмотрены переходные процессы в ВЛ с ШПР и проанализированы воздей-

ствия апериодических составляющих на отключающую способность ЭВ:

- анализ причин задержки прохождения тока через нуль в отключаемом ЭВ;
- исследование коммутационной отключающей способности ЭВ ВЛ-500 кВ “Датка-Кемин”.

#### **Моделирование ВЛ “Датка-Кемин”, оснащенной ШПР, и проверка ЭВ по отключающей способности**

Основные характеристики исследуемого объекта. На ГЭС, расположенных на юге КР, вырабатывается около 80 % от установленной генерируемой мощности электростанций. 65 % потребителей находятся на севере страны. Для обеспечения энергетической независимости КР, повышения надежности электроснабжения, расширения рынка сбыта электроэнергии, развития экономики, в связи со стратегической и социальной значимостью для КР был реализован проект “Строительство линии электропередачи 500 кВ “Датка-Кемин” и подстанций “Кемин”, “Датка”. 28 августа 2015 г. введена в эксплуатацию ВЛ 500 кВ “Датка-Кемин”. ВЛ обеспечивает функционирование межсистемной связи “Север-Юг”. От ее надежной работы зависит электроснабжение потребителей севера КР.

ВЛ 500 кВ “Датка-Кемин” длиной 405 км оснащена с двух концов ШПР типа ВКД мощностью 120 МВар и коммутируется ЭВ типа LW. Также со стороны ПС “Датка” на шинах ОРУ-500 кВ установлена такая же группа однофазных ШПР (рисунок 1).

Разработка схемы моделирования и компьютерный анализ процессов. Расчет и анализ различных переходных процессов ВЛ “Датка-Кемин” проводился с помощью канадско-американского программного комплекса EMTP-RV (Electromagnetic transients program). EMTP-RW – это широко используемый инженерами-исследователями различных стран современный инструмент при расчетах переходных процессов, который обладает мощным графическим интерфейсом EMTPWorks.

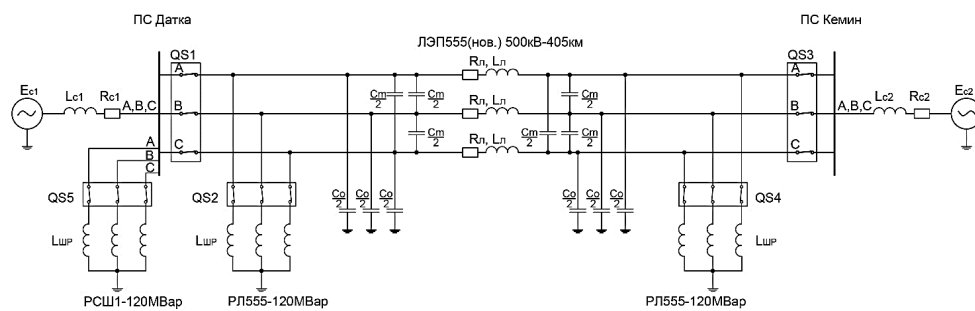


Рисунок 2 – Расчетная схема исследуемой сети

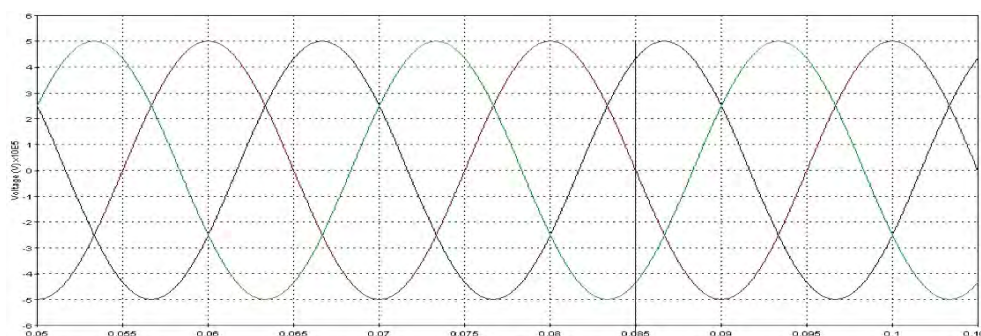


Рисунок 3 – Фрагмент осциллограммы напряжений фаз А, В, С в момент замыкания контактов ЭВ

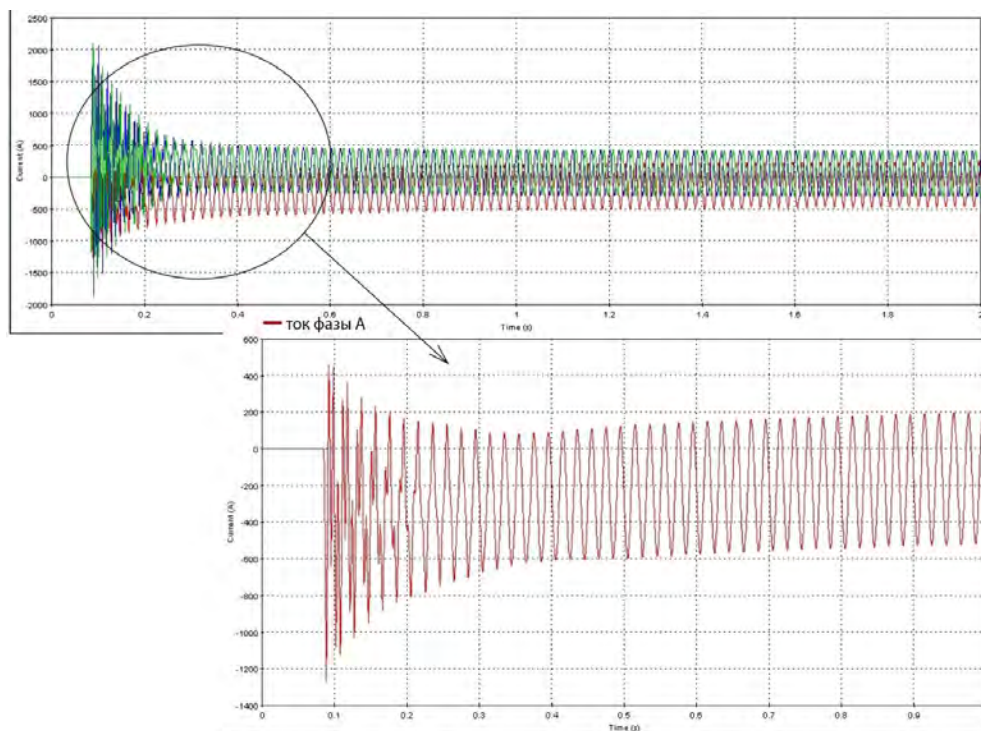


Рисунок 4 – Расчетная осциллограмма токов фаз ЭВ QS1 при его включении в условный момент времени 0,085 с (Кривые: красная – фаза А, синяя – фаза В, зеленая – фаза С)

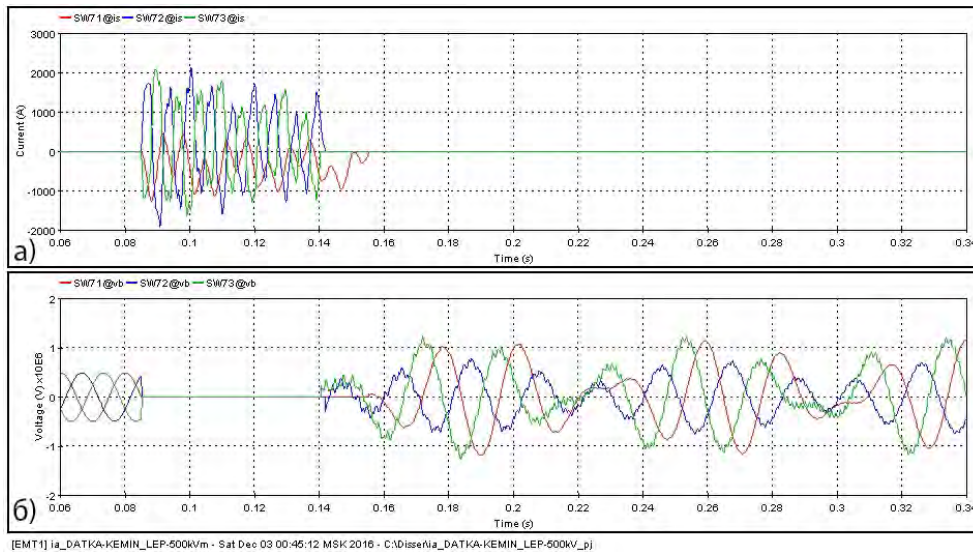


Рисунок 5 – Расчетные осциллограммы: а – фазные токи, протекающие через ЭВ QS1; б – напряжения фаз на контактах ЭВ при отключении в  $t = 0,14$  с

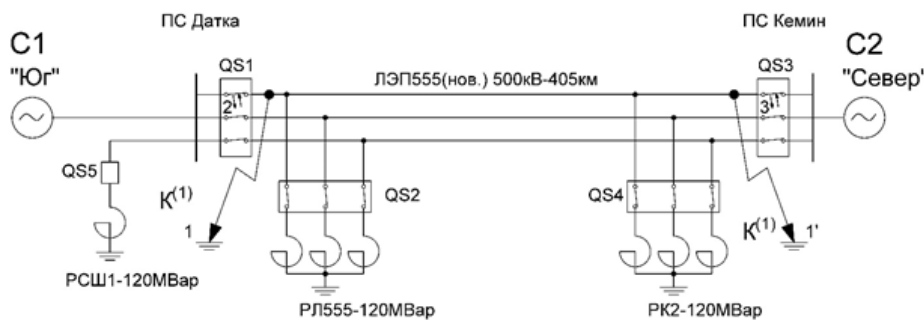


Рисунок 6 – Схема исследуемой ВЛ 500кВ “Датка-Кемин” при расчетных точках КЗ в: I – в начале и I’ – в конце

Параметры основного электрооборудования расчетной модели сети в ЕМТР-RV соответствуют параметрам электрооборудования построенных ПС и ВЛ 500 кВ “Датка-Кемин”, полученным от эксплуатирующей организации ОАО “НЭСК”, и путем анализа их электрических схем (рисунок 2).

Параметры энергосистем C1, C2 заданы эквивалентными источниками ЭДС  $E_{c1}, E_{c2}$ , активными сопротивлениями  $R_{c1}, R_{c2}$  и индуктивностью  $L_{c1}, L_{c2}$ . Параметры трёхфазной ВЛ “Датка-Кемин” рассчитаны встроенным блоком в ЕМТР-RV по справочным данным [7]: погонные активные сопротивления  $r_1, r_0$ , индуктивности  $L_1, L_0$  и емкости  $C_1, C_0$  прямой и нулевой последовательностей. ВЛ считается идеально транспонированной и представлена в виде набора емкостей – собственных на землю и междуфазных емкостей  $C_m = (C_1 - C_0)/3$ . Параметры ШП представлены индуктивностью  $L_p$ .

Расчетные случаи следующие: режим холостого хода – одностороннее включение ВЛ (в предположении отсутствия КЗ на линии), однофазное  $K^{(1)}$ , трехфазное  $K^{(3)}$  и междуфазное  $K^{(1,1)}$  КЗ на линии (продолжительностью 55 мс). Расчетные точки для каждого вида КЗ находятся в начале ВЛ у шин ПС “Датка” и в конце ВЛ – у шин ПС “Кемин” (рисунок 2).

Рассмотрим режим холостого хода (ХХ) – одностороннего включения ШП совместно с ВЛ, при котором питание осуществляется со стороны ПС “Датка”. Внезапное возникновение этого режима может быть в результате некорректной работы устройств защиты и автоматики или ошибочных действий персонала в процессе оперативных переключений. Заранее запланированный режим ХХ ВЛ может быть при выводе в ремонт и последующем ее включении или в синхронизационных режимах электропередачи [8].



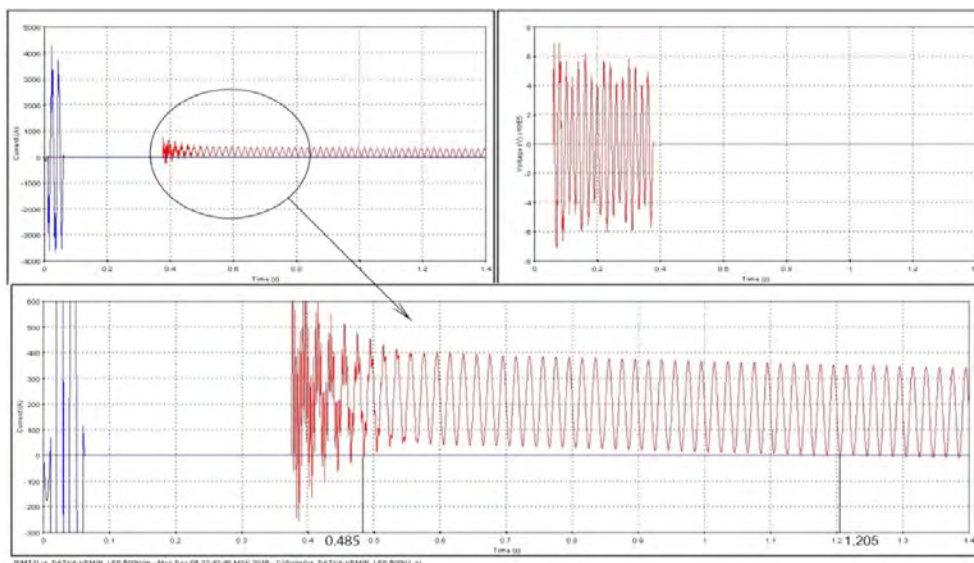


Рисунок 7 – Расчетная осциллограмма тока и напряжения поврежденной фазы А ЭВ QS1 при однофазном КЗ в конце ВЛ-500 кВ “Датка-Кемин”

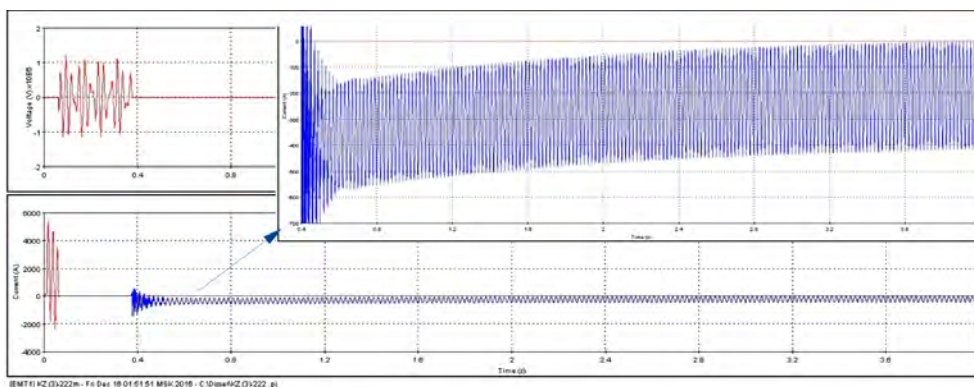


Рисунок 8 – Расчетная осциллограмма тока и напряжения фазы С ЭВ QS1 при трехфазном КЗ у шин ПС “Кемин” в моменты быстрых циклов ТАПВ ВЛ

В момент перехода напряжения фазы А через нулевое значение (рисунок 3) в момент времени  $t = 0,085$  с осуществляется включение ВЛ с ЭВ QS1. В этом режиме выключатель QS 3 находится в отключенном состоянии.

Результаты моделирования показали, что в токе ЭВ QS1 присутствует длительно затухающая аperiodическая составляющая с наложенной на нее периодической (рисунок 4). В данном случае должна настораживать не только задержка прохождения тока через нуль, но и мгновенное значение и время восстановления напряжения между контактами ЭВ. При осуществлении коммутационного цикла  $O-t_{\text{откл}}-BO$ , после операции BO в ЭВ могут возникнуть значительные перенапряжения, которые будут приложены к еще не восстановившему свою электрическую прочность межконтакт-

ному промежутку ЭВ, что может вызвать повторный пробой промежутка.

Согласно ГОСТ 1516.3–96 (2003) изоляция между контактами одного и того же полюса при отключенном положении выключателя 500 кВ испытывается кратковременным (одноминутным) напряжением промышленной частоты 50 Гц: 815 кВ – для оборудования с уровнем изоляции “А”; 1030 кВ – для оборудования с уровнем изоляции “Б”.

Так же согласно ГОСТ Р 52565–2006, выключатели  $U_{\text{ном}} \geq 110$  кВ должны быть способны производить коммутацию линий в условиях рассогласования фаз при нормированном токе отключения  $0,25I_{\text{откл.ном}}$  и возвращающемся напряжении, равном удвоенному значению наибольшего рабочего напряжения сети.

Таблица 1 – Продолжительность от момента замыкания контактов ЭВ в  $t = 0.375$  с до первого перехода тока через нуль, интервалы от начала “отрыва” тока от нуля до перехода через нуль

Место КЗ	Продолжительность и интервалы времени на осциллограмме, с		
	$K^{(1)}$ (без учета шинных ШР)	$K^{(1,1)}$	$K^{(3)}$ (с учетом всех ШР)
У шин ПС Датка (в начале ВЛ)	0,87 (0,465..1,245)	0,429 (0,545..0,805)	3,253 (0,45..3,628)
У шин ПС Кемин (в конце ВЛ)	0,81 (0,485..1,205)	0,47 (0,525..0,825)	3,473 (0,45..3,848)

С момента расхождения контактов ЭВ (в  $t = 0,14$  с) начинается переходный процесс, в течение которого напряжение на полюсе ЭВ должно восстановиться от 0 до напряжения источника  $U_{ном}$ . Из осциллограммы (рисунок 5), напряжения, воздействующие на продольную изоляцию ЭВ QS1, достигают опасных значений (по модулю):

- фазы А:  $1188 \text{ кВ} - (2,38U_{\phi})$ ,
- фазы В:  $747 \text{ кВ} - (1,5U_{\phi})$ ,
- фазы С:  $1215 \text{ кВ} - (2,43U_{\phi})$ .

Значения напряжений на разомкнутых контактах ЭВ превосходят предел кратности  $2U_{\phi}$ , что может представлять опасность для коммутационной аппаратуры. Также на основе полученных осциллограмм можно предположить, что возможны повторные разжигания дуги в ЭВ без восстановления электрической прочности межконтактного промежутка.

Рассмотрим однофазное КЗ ( $K^{(1)}$ ) на линии продолжительностью 55 мс. При возникновении КЗ на ВЛ 330 кВ и выше, используют циклы автоматического повторного включения (АПВ). АПВ является эффективной мерой повышения надежности электроснабжения по ВЛ. Основной задачей при применении АПВ является установление требуемой для успешного его осуществления длительности бестоковой паузы в каждой конкретной ВЛ. При возникновении однофазного КЗ используют ОАПВ – отключением поврежденной фазы с двух концов ВЛ, при работающих двух фазах. Для остальных случаев КЗ применяют ТАПВ – полным отключением трех фаз.

При анализе эксперимента (рисунок 6) в схеме имел место нормальный режим работы, но в  $t = 0.01$  с (момент 1) в фазе А от начала расчета у шин ПС “Кемин” (в конце ВЛ) возникало однофазное КЗ.

В  $t = 0.055$  с (момент 2) ЭВ по концам ВЛ отключают аварийную фазу на время бестоковой паузы ( $t_{от} = 0.32$  с) и в  $t = 0.375$  с (момент 3) включают, при этом обе группы ШР, установленных на ВЛ, находятся в работе. Далее был выполнен идентичный расчет для случая с КЗ в начале ВЛ у шин ПС “Датка”. Время бестоковой паузы, со-

гласно ГОСТ Р 52565–2006, находится в пределах  $t_{от} = 0,3 - 1,2$  с в цикле быстрых АПВ.

Из результатов моделирования (рисунок 7) следует: время затухания апериодической составляющей достигает более 0,7 сек; полный ток ЭВ в промежутке времени  $t = 0,485..1,205$  с не имеет нулевых значений, что затягивает процесс гашения дуги и создает трудности в дальнейшем отключении ЭВ при необходимости быстрого отключения вслед за его включением.

На рисунке 8 предоставлена осциллограмма тока и напряжения при трехфазном КЗ в начале ВЛ с учетом всех установленных ШР на ВЛ и на шинах ПС. Включение ЭВ осуществлено в момент перехода через нуль сетевого напряжения на шинах ПС. В данном эксперименте периодическая составляющая свободного тока имеет амплитуду, соизмеримую с начальным значением апериодической составляющей свободного тока. Однако амплитуда периодической составляющей быстро (в течение  $\sim 75$  мс) затухает, из-за чего полный ток ЭВ в течение  $\sim 3,178$  с не переходит через нуль. Таким образом, переход полного тока ЭВ через нуль после замыкания контактов происходит через 3,253 с в момент времени  $t = 3,628$  с.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о наличии проблем отключающей способности ЭВ по содержанию апериодической составляющей тока КЗ на ВЛ 500 кВ “Датка-Кемин”.

Смоделировано 15 возможных ситуаций на ВЛ “Датка-Кемин”: режим XX – одностороннего включения с различными расчетными видами КЗ (однофазные, междуфазные и трехфазные), с различными расчетными точками КЗ (в начале и конце ВЛ), с различными углами включения напряжения, с учетом ШР и без ШР на шинах ПС “Датка” (оценивалось влияние непосредственно линейных ШР на линии). В таблице 1 представлены результаты расчетов наиболее возможных опасных ситуаций.

Экспериментальными данными установлено, что при КЗ на ВЛ 500 кВ “Датка-Кемин” коммутации ЭВ в циклах ОАПВ и ТАПВ сопровождаются задержкой прохождения полного тока через

нулевое значение из-за большого содержания длительно затухающей апериодической составляющей.

Длительные задержки прохождения тока через нуль наблюдаются при трехфазном КЗ в конце ВЛ у шин ПС “Кемин” при учете всех ШР (шинных и линейных), установленных на исследуемом объекте.

Для обеспечения надежной и безопасной операции отключения ЭВ без преднамеренной выдержки времени после его включения (ВО) в цикле  $O-t_{от}-BO-180с-BO$  рекомендуется выбирать время бестоковой паузы цикла АПВ, равной более 1,2 с.

В режиме холостого хода напряжение на разомкнутых контактах ЭВ превосходит допустимые предельные значения, указанные в ГОСТ.

Таким образом установлено, что в действующих национальных стандартах (ГОСТ и СТО), а также в зарубежных стандартах (IEC и IEEE) не рассматривается влияние задержки прохождения через нуль полного тока КЗ с длительно затухающей апериодической составляющей на отключающую способность выключателей. Производители выключателей не рассматривают возможность появления подобных ситуаций и производят коммутационное оборудование, не рассчитанное на такие коммутации, что является причиной возможных аварий.

При проектировании ВЛ необходим комплексный подход, требующий выполнения расчетов и анализа электромагнитных переходных процессов отключения коротких замыканий, особенно на линиях, примыкающих к подстанциям с ШР. Целесообразность, количество и выбор места установки ШР (на ВЛ, либо на сборных шинах) должны обосновываться соответствующими расчетами. Выбор параметров релейной защиты и автоматики таких линий должен осуществляться на основе тщательного анализа коммутационных переходных процессов, возможных при эксплуатации.

### Литература

1. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели / Г.А. Евдокунин, М.В. Дмитриев и др. // Новости электротехники. 2008. № 3(51).
2. Элегазовые выключатели 110–750 кВ. Особенности работы при отключении ненагруженных ВЛ с шунтирующими реакторами / Г.А. Евдокунин, М.В. Дмитриев и др. // Новости электротехники. 2012. № 4 (76).
3. Моделирование процессов в цикле ОАПВ с использованием программного комплекса ЕМТР / М.В. Дмитриев, Г.А. Евдокунин // Матер. междунауч.-техн. конф. “Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования”. Вып. 3. Минск, 2004.
4. К вопросу о проектировании линий электропередач высокого напряжения, оснащенных шунтирующими реакторами / А.А. Базавлук, К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров // Матер. междунауч.-техн. конф. “ТРАВЭК-2009” (Секция коммутационное оборудование). М., 2009.
5. Протокол совместного заседания ПН “НТС ЕЭС” и НТС ПАР “Россети” секций “Управления режимами энергосистем, РЗА”, “Проблемы надежности и эффективности РЗ и АСУ в ЭС России” “Управление режимами, автоматизация и применение АУ в Электрических сетях”. По теме: Вопросы координации работы релейной защиты и трансформаторов тока. 11.09.2015.
6. Influence of dc Component during Inadvertent Operation of the High Voltage Generator Circuit Breaker during Mis-Synchronization / Kadri Kadriu, Ali Gashi, Ibrahim Gashi, Ali Hamiti, Gazmend Kabashi // Energy and Power Engineering. 2013.
7. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.
8. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю.П. Рыжов. М.: Изд. МЭИ, 2007.