

## **Коммутации воздушных линий высокого напряжения и воздействия на выключатели**

Евдокунин Г.А. (СПбГПУ), Дмитриев М.В. (ЗАО «ЗЭУ»),  
Гольдштейн С.Г., Иваницкий Ю.М. (KEGOC)

В сетях 330-1150 кВ для обеспечения баланса реактивной мощности и регулирования уровней напряжения традиционно применяются шунтирующие реакторы 330-1150 кВ. В ряде случаев такие реакторы оказываются присоединенными к сборным шинам распределительных устройств, а в ряде случаев – к воздушным линиям (ВЛ).

Оснащение ВЛ шунтирующими реакторами (ШР) заметно усложняет процессы при коммутациях воздушных линий и способно приводить к резонансным явлениям, обусловленным наличием емкости у линии и индуктивности у реактора. В частности, широко известны проблемы [1-2] применения цикла однофазного повторного включения (ОАПВ) воздушных линий с реакторами, когда после погасания дуги тока подпитки напряжение на отключенной фазе ВЛ может представлять серьезную опасность для оборудования линии, для ее ограничителей перенапряжений, измерительных трансформаторов напряжения, реакторов и выключателей.

Опыт эксплуатации сетей 500 и 1150 кВ (при работе на 500 кВ), накопленный за последние годы казахской сетевой компанией KEGOC, свидетельствует о необходимости широкого обсуждения и других, помимо ОАПВ, режимов и коммутаций воздушных линий с реакторами. Прежде всего, речь идет о серии повреждений, произошедших на ПС «Кокшетауская» (рис.1) с выключателем В-504 при коммутациях им воздушной линии 1150 кВ «Кокшетауская-Костанайская» №1102, работающей на напряжении 500 кВ.

В качестве В-504 до недавнего времени использовался воздушный выключатель типа ВВБК-500, а затем он был заменен на колонковый элегазовый выключатель типа НРЛ-550-В2 с автокомпрессионным дугогасительным устройством, после чего интенсивность повреждений фаз В-504 резко возросла. Поэтому для всестороннего анализа причин повреждений В-504 были привлечены ведущие специалисты KEGOC, а также российские эксперты. В результате совместной работы удалось установить, что виновниками повреждений выключателя являлись как дефекты его изготовления и конструкции, так и нетиповые условия и режимы, в которые он попадал.

Исследования, положенные в основу статьи, показали, что неблагоприятные условия для выключателя возникают при коммутациях воздушных линий с присоединенными реакторами, когда коэффициент компенсации индуктивностью реактора емкости линии близок к единице. Среди таких коммутаций следует отметить:

– быстрые циклы «включение-отключение» ВЛ, когда на момент отключения в токе выключателя присутствует, главным образом, апериодическая составляющая, величина которой составляет не более нескольких сотен ампер; наличие такой малой апериодической составляющей затягивает

время гашения дуги, что особенно опасно для выключателей автокомпрессионного типа, где интенсивность гашения зависит от величины тока;

- неполнофазные коммутации ВЛ, когда опасные напряжения возникают не только на изоляции «фаза-земля» линии, но и на продольной изоляции выключателя, приводя к ее повторным пробоям и повреждению; при этом возможны случаи, когда значительные напряжения на продольной изоляции выключателя существуют при относительно безопасном уровне напряжения «фаза-земля» линии.

Серьезность проблемы заключается, во-первых, в высокой стоимости высоковольтного оборудования, и, во-вторых, в том, что в соответствии со сложившейся практикой число шунтирующих реакторов на ВЛ подбирают как раз на компенсацию, близкую к полной.

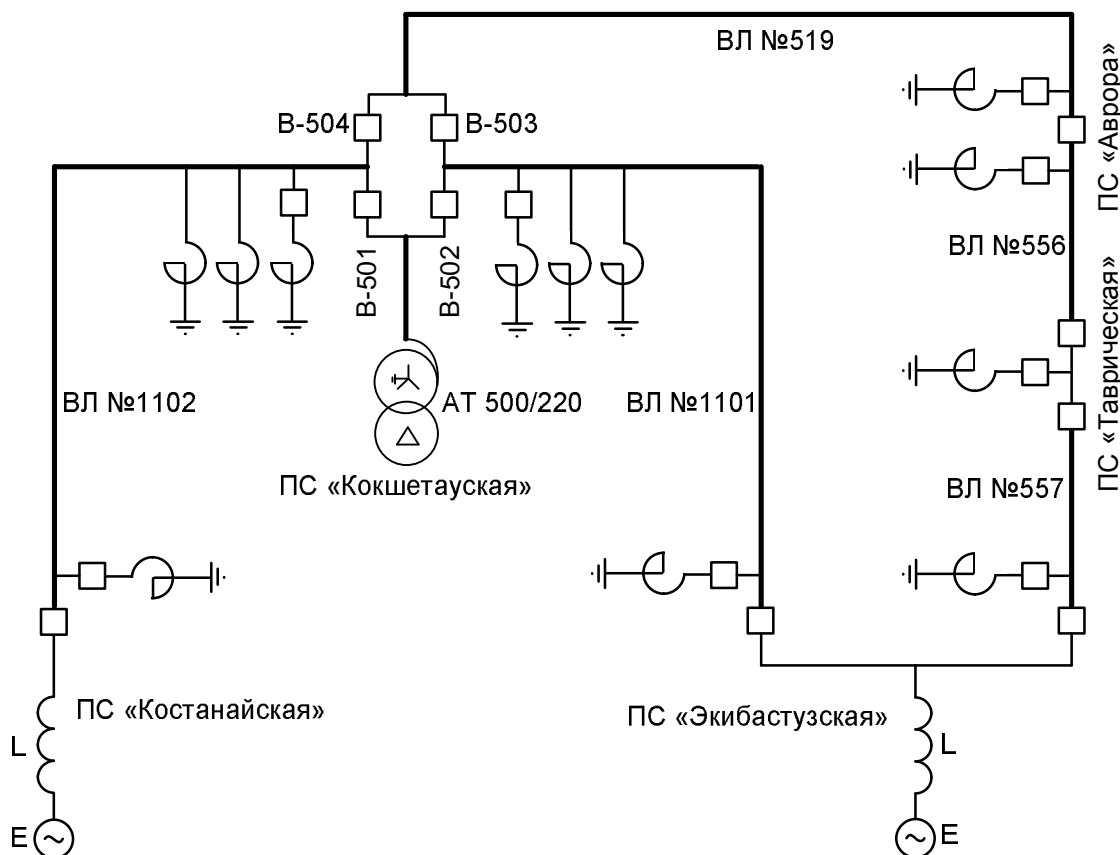


Рис.1. Воздушная линия №1102 с учетом сети, примыкающей к ней на ПС «Кокшетауская».

### 1. Коэффициент компенсации индуктивностью реакторов емкости линии

Пусть к воздушной линии присоединено  $N = N_H + N_K$  шунтирующих реакторов –  $N_H$  реакторов в начале и  $N_K$  в конце. Для анализа перенапряжений, возникающих на каждой из ВЛ, можно пользоваться схемой замещения, показанной на рис.2, при приближенном эквивалентировании конечных элементов сети.

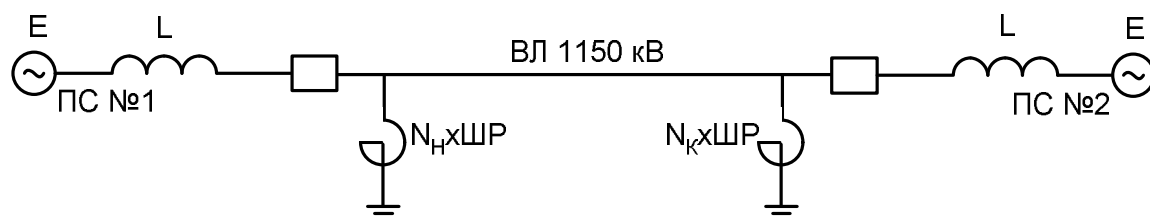


Рис.2. Принципиальная схема электропередачи 1150 кВ.

Индуктивное сопротивление одного реактора

$$x_p = \frac{U_{HP}^2}{Q_p} \text{ (Ом)},$$

где  $U_{HP}$  – наибольшее рабочее (линейное, действующее) напряжение сети (кВ),  $Q_p$  – мощность шунтирующего реактора (МВАр).

Проводимость одного реактора составляет  $b_p = \frac{1}{x_p}$  (См), суммарная проводимость  $N$  реакторов составляет  $b_{p\sum} = N \cdot b_p$ .

Степень компенсации индуктивностью реакторов емкостной проводимости ВЛ определяется выражением:

$$K = \frac{b_{p\sum}}{b_1},$$

где  $b_1 = b_1^* \cdot L_{ВЛ}$  – емкостная проводимость ВЛ по прямой последовательности (т.е. в нормальном симметричном режиме);  $b_1^*$  – погонная емкостная проводимость ВЛ по прямой последовательности;  $L_{ВЛ}$  – длина ВЛ.

Помимо коэффициента компенсации важной характеристикой является частота  $f_c$  свободных колебаний ВЛ с реакторами

$$f_c = \frac{1}{2p\sqrt{L_{p\sum}C_1}},$$

где  $L_{p\sum} = x_{p\sum} / w = 1 / (wb_{p\sum})$  – эквивалентная индуктивность присоединенных к линии реакторов;  $C_1 = b_1 / w$  – эквивалентная емкость линии по прямой последовательности;  $w = 2pf$ ,  $f = 50$  Гц.

Соотношение  $K$  и  $f_c$  дано в таблице.

$K < 1$	$f_c < 50$
$K = 1$	$f_c = 50$
$K > 1$	$f_c > 50$

Для ВЛ определенной длины при определенном числе ШР коэффициент  $K$  компенсации емкостной проводимости линий может быть близок к единице, т.е. частота свободных колебаний близка к частоте вынужденных колебаний 50 Гц, и линия способна проявлять свои резонансные свойства, которые могут приводить к опасным явлениям, таким как перенапряжения на изоляции оборудования линии или отсутствие нулей в отключаемом токе выключателя линии. Рассмотрим эти явления далее.

## 2. Коммутации ВЛ и напряжение на изоляции выключателей

При реальных длинах ВЛ резонансные свойства линии с реакторами проявляются, как правило, не в нормальном симметричном режиме работы, а во всевозможных несимметричных режимах – например, при неполнофазном питании ВЛ от сети.

### Квазиустановившийся режим

Определим квазиустановившиеся напряжения на отключенных фазах ВЛ в различных несимметричных (неполнофазных) режимах. Вначале рассмотрим режим неполнофазного питания ВЛ по двум фазам. Расчетная схема показана на рис.3. Воздушная линия считается идеально транспонированной и представлена в виде набора емкостей – собственных емкостей фаз на землю  $C_0$  (емкость нулевой последовательности) и междуфазных емкостей  $C_m$ . Взаимосвязь собственной емкости фазы, междуфазной емкости и емкости прямой последовательности определяется как  $C_1 = C_0 + 3C_m$  или как  $b_1 = b_0 + 3b_m$ , откуда  $b_m = \omega C_m = (b_1 - b_0)/3$ .

Все присоединенные к линии шунтирующие реакторы представлены в виде трехлучевой звезды эквивалентных индуктивностей  $L_{PЭ}$ . Питающая система представлена в виде набора фазных эдс  $E_A, E_B, E_C$ , соединенных в звезду.

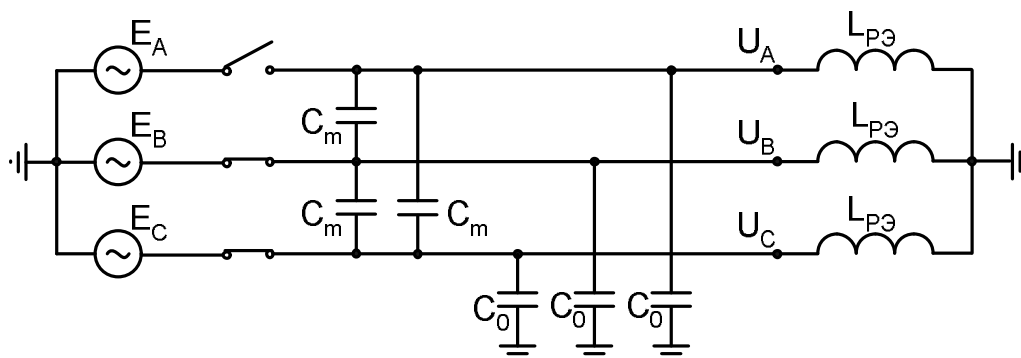


Рис.3. Схема для определения напряжения на отключенной фазе ВЛ при питании линии по двум фазам.

С использованием метода симметричных составляющих [2] для схемы рис.3 можно получить условия резонансного повышения напряжения на отключенной фазе

$$K = \frac{C_0 + 2C_m}{C_0 + 3C_m}.$$

Для ВЛ 1150 кВ по данным табл.1 и выражению  $C_1 = C_0 + 3C_m$  несложно определить соотношение емкостей как  $C_0 = 11.3 \cdot C_m$ , что дает условие резонанса напряжения на отключенной фазе

$$K = \frac{13.3}{14.3} = 0.93.$$

Таблица 1. Параметры воздушной линии 1150 кВ.

Название величины	Размерность	Прямая последовательность	Нулевая последовательность
активное сопротивление	Ом/км	$r_1^* = 0.014$	$r_0^* = 0.16$
индуктивное сопротивление	Ом/км	$x_1^* = 0.27$	$x_0^* = 0.99$
емкостная проводимость	См/км	$b_1^* = 4.3 \cdot 10^{-6}$	$b_0^* = 3.4 \cdot 10^{-6}$
волновое сопротивление	Ом	$Z_{1B} = \sqrt{\frac{x_1}{b_1}} = 250$	$Z_{0B} = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = 540$

Одним из характерных примеров неполнофазного включения ВЛ 1150 кВ является однофазное автоматическое повторное включение, при котором на некоторое время одна из фаз ВЛ отключается от сети. Расчеты квазистационарного режима бестоковой паузы при ОАПВ воздушных линий проводят для оценки возможности самопогасания дуги подпитки (и выбора специальных мер, обеспечивающих гашение), а также для проверки отсутствия недопустимого повышения напряжений на отключенной фазе после погасания дуги, что важно:

- для исключения повреждений изоляции присоединенного к ВЛ оборудования (ОПН, трансформаторов напряжения, реакторов);
- для исключения повторных пробоев в месте повреждения изоляции, т.е. необходимо для повышения вероятности успешности ОАПВ.

При ОАПВ на процессы на ВЛ влияет индуктивность нулевых реакторов, включаемых на время ОАПВ в нейтраль шунтирующих. В КЕГОС на ВЛ нулевые реакторы в нейтрали шунтирующих в настоящее время выведены из работы, законсервированы и при ОАПВ не используются. Учитывая это, на рис.3 в нейтрали ШР нулевых реакторов не показано.

Теперь рассмотрим режим неполнофазного питания ВЛ по одной фазе. Расчетная схема показана на рис.4. Такой несимметричный режим может возникать, например, при плановом отключении ВЛ, когда одна из фаз выключателя отказала в отключении и осталась во включенном состоянии.

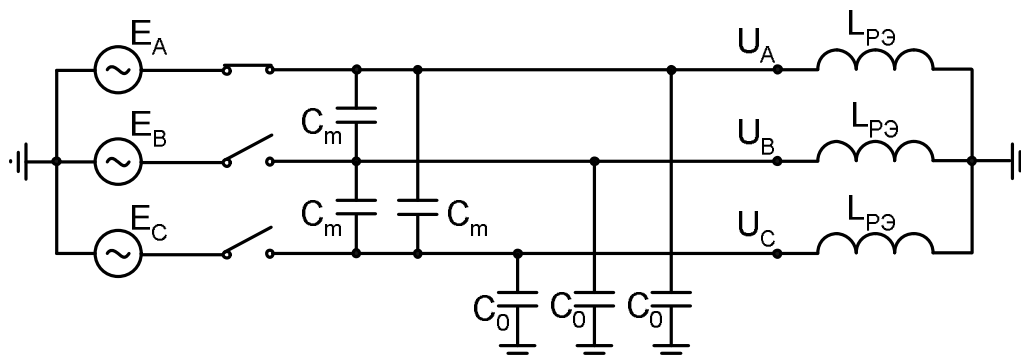


Рис.4. Схема для определения напряжения на отключенных фазах ВЛ при питании линии по одной фазе.

С использованием метода симметричных составляющих для схемы рис.4 можно получить условия резонансного повышения напряжения на отключенных фазах

$$K = \frac{C_0 + C_m}{C_0 + 3C_m}.$$

Для ВЛ 330-1150 кВ по данным табл.1 и выражению  $C_1 = C_0 + 3C_m$  можно определить соотношение емкостей как  $C_0 = 11.3 \cdot C_m$ , что дает условие резонанса напряжения на отключенных фазах

$$K = \frac{12.3}{14.3} = 0.86.$$

Итак, в квазиустановившемся режиме несимметричного (неполнофазного) питания ВЛ 330-1150 кВ напряжение на отключенных фазах ВЛ может достигать значительных величин в следующих случаях:

- для  $K = 0.93$  при питании ВЛ от сети двумя фазами;
- для  $K = 0.86$  при питании ВЛ от сети по одной фазой.

Можно показать [2], что при коэффициенте компенсации, отличающемся более чем на 10% от указанных значений, квазиустановившееся напряжение 50 Гц на отключенной фазе не превосходит фазного напряжения сети, т.е. формально неопасно для изоляции «фаза-земля» оборудования. Поэтому при проектировании ВЛ и оснащении ее шунтирующими реакторами неблагоприятным считается диапазон коэффициента, ограниченный снизу значением  $K = 0.9 \cdot 0.86 = 0.77$ , а сверху – значением  $K = 1.1 \cdot 0.93 = 1.02$ . Для ухода от резонансных явлений, опасность которых проверяется, к сожалению, только при ОАПВ, на время ОАПВ возможна реализация одного из следующих мероприятий:

- отключение или подключение одного ШР;
- ввод в работу нулевого реактора в нейтрали ШР.

Воздушная линия «Кокшетауская-Костанайская» имеет коэффициент  $K$ , приведенный в табл.2. При всех значениях  $N$  коэффициент компенсации лежит вне упомянутого заведомо опасного диапазона значений, т.е. на первый взгляд резонансные процессы на этой ВЛ не представляют угрозы. Однако если рассмотреть не квазиустановившийся режим неполнофазного включения, а переходный режим, то напряжение «фаза-земля» имеет сложную форму биений и, в ряде случаев, может представлять серьезную опасность. Поэтому рассмотрим далее переходные режимы неполнофазного включения.

Таблица 2. Коэффициент  $K$  компенсации реактивной мощности для ВЛ 1150 кВ.

Название ВЛ	Длина ВЛ, км	Общее число ШР на ВЛ			
		$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
1102 «Кокшетауская- Костанайская»	395	0.37	0.74	1.10	1.47

### Переходный режим

На рис.5-6 приведены осциллограммы, соответствующие успешному ОАПВ (все расчеты переходных процессов проведены с помощью программного комплекса ЕМТР). По рис.5 видно, что напряжение «фаза-земля» формально неопасно, поскольку не превосходит амплитуды фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети  $\sqrt{2} \cdot 525 / \sqrt{3} = 428$  кВ. Однако разность напряжения линии, совершающего свободные колебания с частотой  $f_c$ , и напряжения сети  $f = 50$  Гц достигает величины удвоенного наибольшего рабочего напряжения, т.е. приблизительно 860 кВ (см. рис.6).

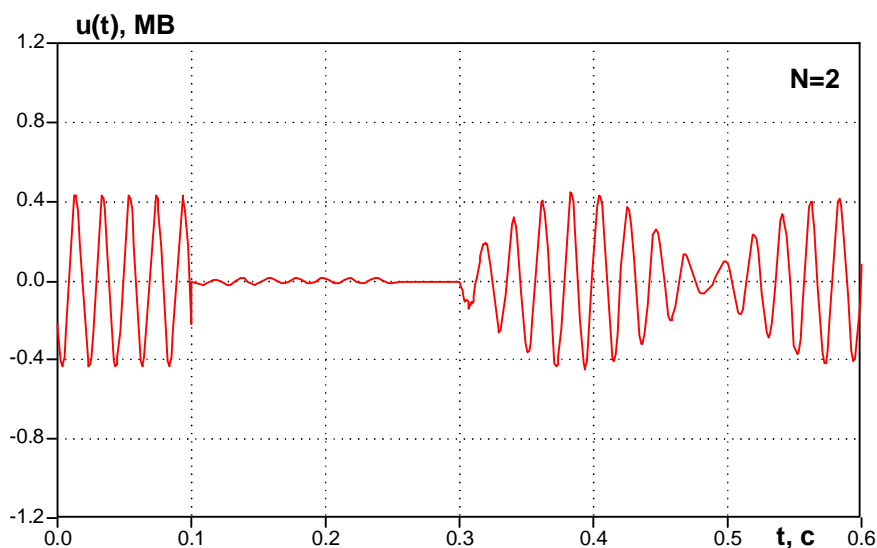


Рис.5. Расчетная осциллограмма напряжения «фаза-земля» отключенной фазы ВЛ-1102 «Кокшетауская-Костанайская» при успешном ОАПВ при  $N = 2$  присоединенных к линии реакторов.

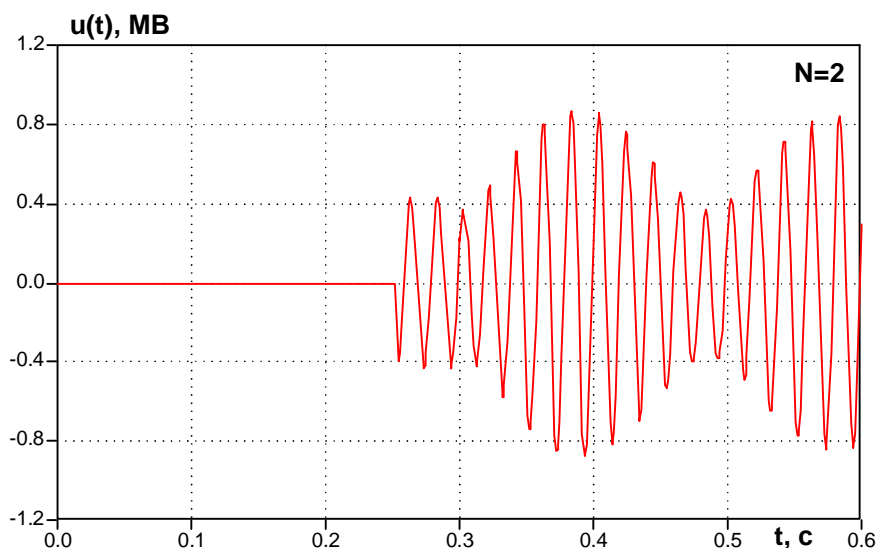


Рис.6. Расчетная осциллограмма напряжения, воздействующего на продольную изоляцию выключателя В-504 на ПС «Кокшетауская», при успешном ОАПВ ВЛ-1102 при  $N = 2$  присоединенных к линии реакторов.

Согласно ГОСТ 1516.3-96 [3] изоляция между разомкнутыми контактами выключателей и разъединителей 500 кВ испытывается одноминутным напряжением промышленной частоты:

- с амплитудой 815 кВ – для оборудования с изоляцией класса «А» (облегченная изоляция);
- с амплитудой 1030 кВ – для оборудования с изоляцией класса «Б» (полная изоляция).

Согласно ГОСТ-Р 52565-2006 на выключатели [4] в условиях рассогласования фаз и токе, равном  $0.25 \cdot I_{o,n}$ , выключатель должен выдерживать воздействие возвращающегося напряжения, равного удвоенному значению наибольшего рабочего напряжения сети. Для выключателя класса 500 кВ это соответствует амплитудному значению напряжения 860 кВ.

Как видно из расчетов (см. например, рис.6), возможная коммутация в таком режиме выключателя В-504 при  $N=2$  дает воздействие на его продольную изоляцию напряжения, близкого испытательному, а потому потенциально опасного.

Значительные перенапряжения на одной из фаз ВЛ могут проявляться не только при ОАПВ, но и в других несимметричных режимах:

- при неполнофазном включении (отключении) ВЛ, ставшем следствием отказа одного или двух полюсов (полуполюсов) выключателя;
- при кратковременном неполнофазном включении (отключении) ВЛ, вызванном разбросом в действии полюсов выключателя;
- при задержке в отключении одного или двух полюсов, вызванных наличием апериодической составляющей в токе выключателя.

Необходимость расчетов переходных процессов, возникающих в разных режимах и неполнофазных схемах, следует из отличия начальных условий при образовании даже одной и той же неполнофазной схемы и, как следствие, получения различных кратностей максимальных перенапряжений.

Кроме того, максимальное напряжение на продольной изоляции увеличивается за счет переходных процессов в питающей сети. Для ПС «Кокшетауская» речь идет о показанных на рис.1 линиях ВЛ-519 и ВЛ-1101, учет которых приводит к увеличению расчетного напряжения на продольной изоляции до 100 кВ.

В качестве примера напряжения, воздействующего на продольную изоляцию выключателя В-504 в переходном процессе неполнофазного отключения ВЛ (отключение 2-х фаз из 3-х), на рис.7 даны расчетные осциллограммы, для которых характерен момент времени 0.1 сек – неполнофазное отключение.



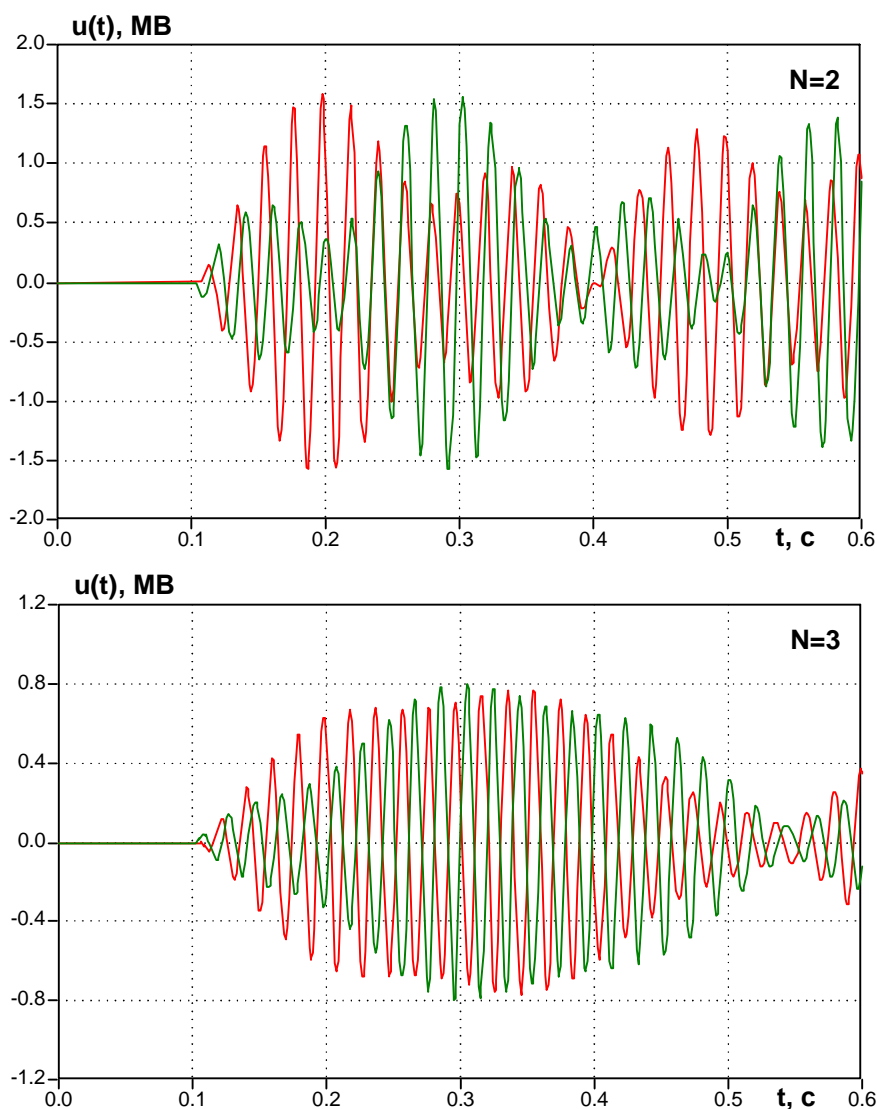


Рис.7. Расчетные осциллограммы напряжения, воздействующего на продольную изоляцию отключенных фаз «В» и «С» выключателя В-504 на ПС «Кокшетауская», при неполнофазном отключении ВЛ-1102, когда фаза «А» осталась в работе. Варьируется число  $N$  реакторов, присоединенных к ВЛ-1102.

Из осциллограмм рис.7 видно, что наиболее опасные перенапряжения на продольной изоляции выключателя возникают при отключении ВЛ-1102 ( $N=2$ ) и отказе одной из фаз. В этом случае согласно рис.7 (случай  $N=2$ ) сравнительно быстро мгновенное значение напряжения, приложенного к продольной изоляции В-504, достигает 1600 кВ!

Как следует из неприведенных здесь расчетов, напряжения, воздействующие на продольную изоляцию выключателей линии, могут быть опасными не только при неполнофазном отключении ВЛ, но и при ее неполнофазном включении. Однако при отключении напряжения, как правило, выше и, кроме того, они приложены к межконтактному промежутку, только что закончившему гашение дуги и еще не вполне восстановившему свою электрическую прочность.

Приведенные выше осциллограммы и опыт эксплуатации КЕГОС свидетельствуют о необходимости при проектировании выполнять расчеты не

только квазиустановившегося напряжения при ОАПВ, как это делается, но и расчеты напряжения в других режимах с учетом возможности присоединения к ВЛ различного числа реакторов. При этом надо обращать внимание не только на напряжение «фаза-земля», но и на напряжение, воздействующее на продольную изоляцию выключателя линии!

Для ухода от резонансных явлений, выявленных в расчетах, возможна реализация одного из следующих мероприятий:

- отключение или подключение одного ШР;
- ввод в работу нулевого реактора в нейтрали ШР.

### 3. Коммутации ВЛ и ток в выключателе

Повреждения В-504 происходили в том числе в тех случаях, когда отключению ВЛ-1102 с малым интервалом времени предшествовало ее включение.

В переходном процессе включения ВЛ с шунтирующими реакторами ток в выключателе будет содержать затухающую апериодическую составляющую и наложенную на нее периодическую.

Соотношение периодической и апериодической составляющей в токе выключателя имеет принципиальное значение и зависит от длины ВЛ в сочетании с числом реакторов  $N$  на ней. В случае, когда в токе доминирует апериодическая составляющая, суммарный ток в выключателе может сравнительно долго (пока в достаточной степени не затухнет апериодическая составляющая) не иметь «нулей», что создает трудности в его отключении. Иными словами, если отключение резонансно настроенной ВЛ с реакторами следует с малым интервалом времени вслед за ее включением, то отключаемый ток определенное время может не иметь нулей, т.е. будет затянут процесс гашения дуги. Более того, процесс гашения дуги может завершиться в разных фазах по-разному быстро, что приведет к возникновению несимметричной схемы питания ВЛ даже при штатной работе выключателя.

В ГОСТ 12450-82 на выключатели [5] не дается каких-либо ограничений на отключение выключателями апериодической составляющей тока в несколько десятков Ампер.

Согласно табл.2, где указаны коэффициенты компенсации реактивной мощности, ВЛ-1102 относится к тем линиям, у которых при целом числе реакторов практически полностью компенсируется зарядная мощность (для ВЛ-1102 при  $N = 3$  имеет место  $K = 1.1$ ). Учитывая, что параметры воздушных линий электропередачи невозможно определить точно, можно полагать, что ВЛ-1102 при  $N = 3$  близка к резонансной настройке или даже настроена точно в резонанс. Это означает, что при установившемся симметричном режиме одностороннего питания ВЛ-1102 через В-504 в случае  $N = 3$  тока промышленной частоты в выключателе не будет (или он будет незначительным).

Примеры расчетных осциллограмм тока В-504 при включении ВЛ-1102 с реакторами показаны на рис.8 (включение В-504 происходит в условный момент времени 0.1 сек). Реально, на скорость затухания апериодической

составляющей существенно влияет дуга в выключателе: ее учет приводит к более быстрому затуханию апериодической составляющей. В данной работе расчеты выполнены без учета дуги. В дальнейшем, необходимо провести уточненные расчеты времени затухания апериодических составляющих на основании данных завода изготовителя выключателей, либо получить их с помощью специально проведенных экспериментов.

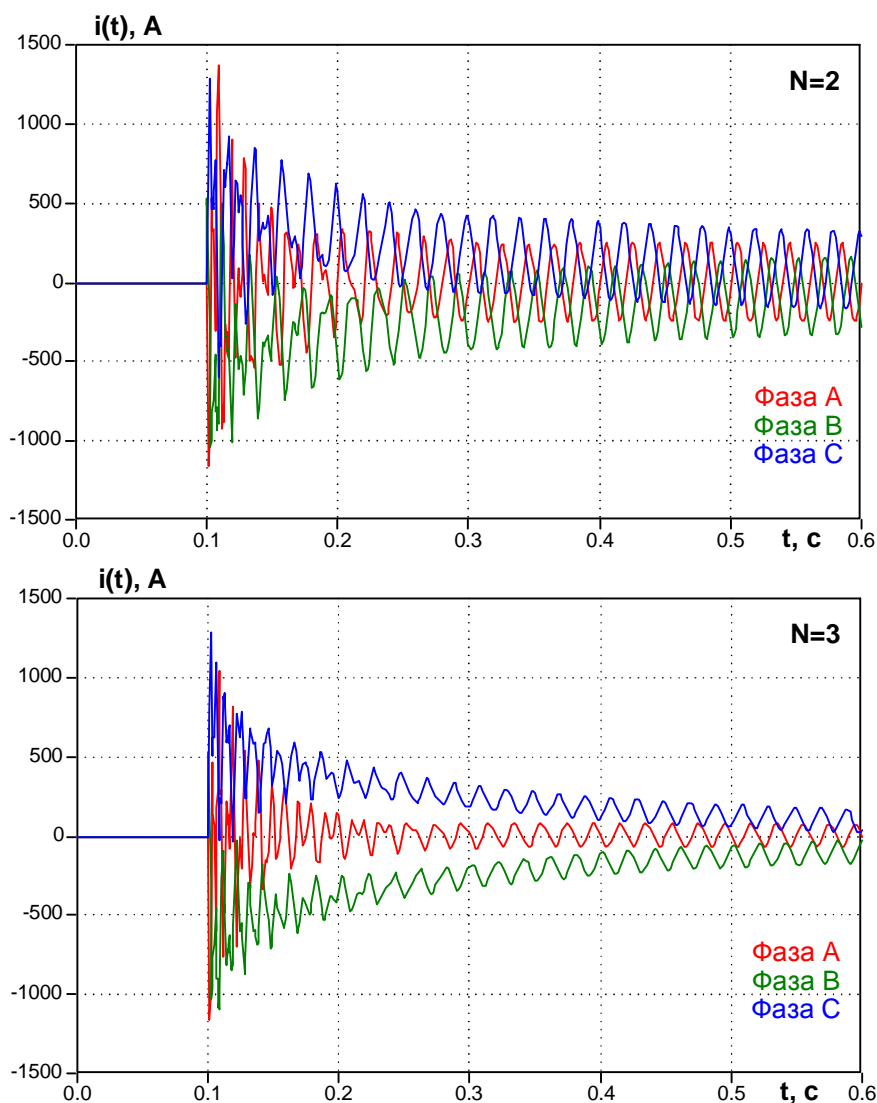


Рис.8. Расчетные осциллограммы токов фаз выключателя В-504 на ПС «Кокшетауская» при его включении в условный момент времени 0.1 сек. Варьируется число реакторов  $N$ , присоединенных к ВЛ-1102.

На рис.9 для случая  $N = 3$  показаны осциллограммы токов выключателя В-504, когда его включение происходит в момент 0.105 сек, т.е. при других мгновенных значениях напряжения питающей сети. Видно, что если сразу после включения В-504 дать команду на его отключение, то при  $N = 3$  первые нули тока (в которые наиболее вероятно его гашение) в различных фазах будут в разное время:

- на рис.8 при  $N = 3$  первым отключится фаза «А»;
- на рис.9 при  $N = 3$  первыми отключатся фазы «В» и «С».

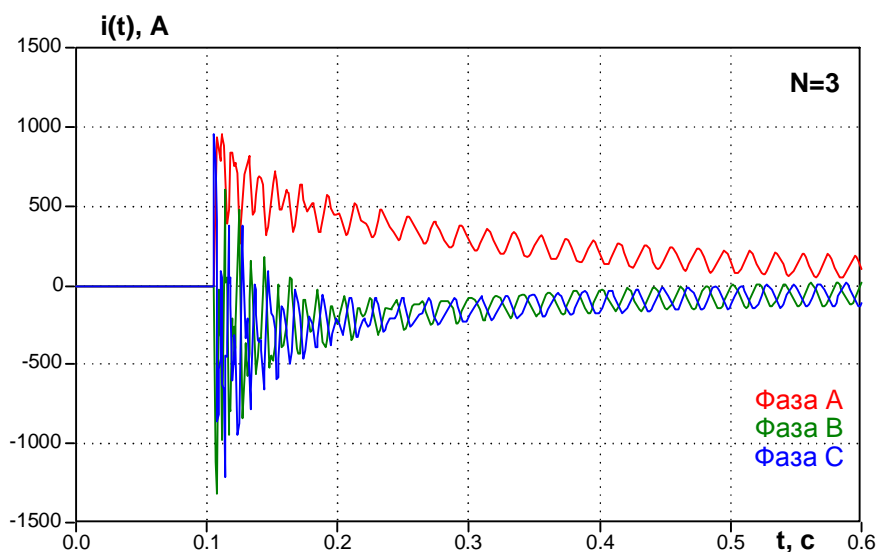


Рис.9. Расчетные осциллограммы токов фаз выключателя В-504 на ПС «Кокшетауская» при его включении в условный момент времени 0.105 сек. К линии ВЛ-1102 присоединено  $N = 3$  шунтирующих реактора.

В компьютерных расчетах и при анализе аварийных осциллограмм исследование переходных процессов в цикле «включение - отключение» ВЛ затруднено, так как у нас нет достоверных данных:

- по скорости затухания аperiodической составляющей тока реакторов и линии;
- о погрешности, с которой измерительный трансформатор тока передает аperiodическую составляющую тока в измерительные цепи.

Отключение сравнительно небольшого по величине медленно затухающего аperiodического тока, составляющего десятки-сотни ампер, является непростой задачей для выключателей автокомпрессионного типа, интенсивность дугогашения в которых зависит от величины тока. В случае применения на линии таких выключателей отключение ВЛ должно проводиться:

- или с достаточной задержкой после включения;
- или при коэффициенте компенсации, заметно отличном от единицы, что при резонансной настройке достигается предварительным введением или выводением из работы одного шунтирующего реактора.

### Заключение

1. В различных неполнофазных режимах питания ВЛ в зависимости от числа реакторов на этих линиях на изоляции «фаза-земля» отключенных фаз возможно развитие опасных квазистационарных перенапряжений резонансного характера (и при ОАПВ, и в других случаях).

2. Даже если напряжение «фаза-земля» не представляет особой опасности, расчетным путем следует проверять напряжение на продольной изоляции выключателя линии в различных переходных процессах, сопровождающих образование неполнофазных режимов.

3. Следует избегать быстрых циклов «включение-отключение» (симметричных или неполнофазных) в тех случаях, когда к линии присоединено столько шунтирующих реакторов, что коэффициент компенсации близок к единице. В частности, в таких случаях следует обратить внимание на цикл быстрого трехфазного автоматического повторного включения (ТАПВ), в котором возможно повреждение выключателя.

#### **Список использованных источников**

1. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. –2-е изд. –СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. –355 с.
2. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб.: Издательство Сизова М.П., 2004.
3. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции: Межгос. стандарт. –Введ. 01.01.99. –М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. –50 с.
4. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. Издание официальное. Москва, Стандартинформ, 2007.
5. ГОСТ 12450-82. Выключатели переменного тока на номинальные напряжения от 110 до 750 кВ. Технические требования к отключению ненагруженных воздушных линий и методы испытаний.