

# Защита оборудования ВЛ 330–750 кВ от апериодических токов и резонансных перенапряжений

Михаил ДМИТРИЕВ,  
доцент Санкт-Петербургского политехнического  
университета, к.т.н.

Применение колонковых элегазовых выключателей на воздушных линиях 330–750 кВ, оснащённых шунтирующими реакторами, потребовало изучения некоторых специфических особенностей этих ВЛ — например, наличия в токе линии при её включении под сетевое напряжение так называемой апериодической составляющей.

Недооценка опасности апериодической составляющей тока привела к тому, что за последние годы произошла серия повреждений выключателей 500–750 кВ:

- в 2006 и 2007 годах на ПС 500 (1150) кВ «Кокшетауская»;
- в 2007 году на ПС 500 (1150) кВ «Алтай»;
- в 2009 году на ПС 500 кВ «Агадырь»;
- в 2011 году на ПС 750 кВ «Новобрянская».

Сетевые компании не смогли оперативно отреагировать на повреждения 2006–2007 гг., о причинах которых говорилось в работе [1], и с тех пор произошло ещё несколько повреждений (2009, 2011 г.). Однако в настоящее время ситуация изменилась — ПАО «ФСК ЕЭС» тре-

бует при установке или замене выключателей обязательного расчёта апериодической составляющей тока и обоснования мероприятий по её ограничению до безопасных уровней. В частности, в 2012 году введена в действие «Методика расчёта и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащённых шунтирующими реакторами» [2].

Методика [2] хотя и неудобна для повседневного использования инженерами-проектировщиками, но, тем не менее, позволяет выполнить расчёты апериодической составляющей тока выключателей для каждой конкретной линии и выбрать, в случае необходимости, мероприятия по её ограничению, среди которых оснащение выключателей по концам линии предвключаемыми резисторами или устройствами управляемой коммутации.

Методика распространяется и на воздушные линии электропередачи (ВЛ), и на кабельные. Поскольку подавляющее число шунтирующих реакторов (ШР) у нас в стране установлено на ВЛ, то далее не будем говорить о кабелях.

К сожалению, на страницах [2] нет разъяснений относительно резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах питания ВЛ, таких, например, как ОАПВ [3]. Вместе с тем проблема резонансных перенапряжений и проблема апериодических токов неразрывно связаны друг с другом, так как являются следствием одного и того же правила — оснащения ВЛ реакторами, число и мощность которых выбираются на близкую к 100% компенсацию зарядной мощности ВЛ.

В статье [4] достаточно просто и наглядно показано, что рекомендуемые в [2] мероприятия (резисторы и управляемая коммутация) не всегда способны ограничить апериодические токи до безопасных для выключателя значений. Также следует отметить, что известны случаи, когда о необходимости оснащения выключателя ВЛ средствами борьбы с апериодическими токами задумывались не до, а после его покупки, монтажа и ввода в эксплуатацию, и это оказывалось равнозначно замене на новый. Кроме того, не стоит забывать, что зачастую ВЛ 330—750 кВ с каждой из двух своих сторон присоединяется к шинам через два выключателя, и, следовательно, мероприятия нужны не для одного, а сразу для нескольких выключателей.

Прямо скажем: управляемая коммутация и предвключаемые резисторы так и не стали особо успешными и привлекательными техническими решениями даже для борьбы с апериодическими токами, не говоря уже о том, что они в принципе не могут влиять на уровень резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах ВЛ. Учитывая изложенное, было бы неправильно считать, что в настоящее время удалось решить проблемы ВЛ 330—750 кВ с реакторами, и что с появлением [2] можно ставить точку.

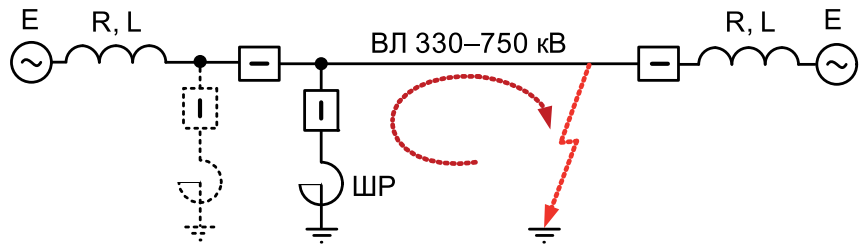
По моему мнению, действующая методика [2] должна быть взята за основу нового документа, разработчиком которого предстоит переосмыслить резисторы и управляемую коммутацию, а также обязательно предложить эффективные меры защиты оборудования ВЛ не только от апериодических токов, но и от резонансных перенапряжений.

Пока такого документа не создано, приходится делиться соображениями на страницах отраслевых изданий. Если о недостатках предвключаемых резисторов и управляемой коммутации подробно сказано в статье [4], то здесь хотелось бы обсудить те мероприятия, которые претендуют на роль универсальных решений всех проблем ВЛ с реакторами.

### ВЫБОР МОЩНОСТИ РЕАКТОРОВ И МЕСТ ИХ УСТАНОВКИ

В сетях напряжением 330—750 кВ основное назначение ШР — обеспечение приемлемых напряжений в режимах малых нагрузок (например, ограничение напряжения промышленной частоты в конце ВЛ при её одностороннем питании от сети), а также обеспечение баланса реактивной мощности.

**Рис. 1. Схема электропередачи с реактором, подключённым к линии**



На рис. 1 показана принципиальная схема электропередачи 330—750 кВ, где к линии присоединён один шунтирующий реактор. Пунктиром показан реактор, если бы он был присоединён не к самой линии, а к сборным шинам распределительного устройства.

В Методических рекомендациях [5] (п. 5.37) указано, что «Мощность, число и размещение шунтирующих реакторов уточняется при проектировании конкретных линий электропередачи. При отсутствии данных степень компенсации зарядной мощности линий следует принимать не менее 80—100% — на ВЛ 500 кВ, 100—110% — на ВЛ 750 кВ...».

Прочитав этот п. 5.37, можно сделать вывод, что сеть лучше проектировать именно со 100% компенсацией зарядной мощности линии индуктивностью ШР. Но из п. 5.37 вовсе не следует, что ШР обязательно надо присоединять к самой линии, а не к сборным шинам конечных распределительных устройств.

Размещение реакторов на линии (вместо шин) необходимо, прежде всего, для установления приемлемого уровня напряжения на ВЛ в режимах её одностороннего питания. Однако в работах, выполненных ещё десятки лет назад, было показано, что на ВЛ 330—750 кВ длиной менее 300—400 км повышение напряжения промышленной частоты на разомкнутом конце при одностороннем питании составляет не более 10—15% от наибольшего рабочего напряжения сети (кратность повышения напряжения 1,10—1,15 о.е.), что согласно [6] допустимо для оборудования по меньшей мере на 20 мин (а этого времени вполне достаточно для завершения процесса синхронизации и замыкания линии в транзит).

Несмотря на указанные в [6] допустимые повышения напряжения с учётом их длительности, некоторые специалисты ошибочно полагают, что реактор на ВЛ надо ставить тогда, когда напряжение промышленной частоты на её разомкнутом конце даже на немного превзошло наибольшее рабочее напряжение сети. Например, если в расчётах напряжение в конце односторонне питаемой ВЛ 500 кВ составит 526 кВ (это на 1 кВ превосходит наибольшее рабочее напряжение для оборудования класса 500 кВ, составляющее 525 кВ), то такие специалисты уже «бьют тревогу» и ставят на линии реактор.

Отказ от учёта заложенной производителями оборудования сетей 330—750 кВ и закреплённой нормативными документами способности выдерживать временное повышение напряжения сверх наибольшего рабочего приводит к тому, что при выборе мест установки реакторов их чаще устанавливают на линии, а не на сборных шинах. Считаю, что такой

подход не вполне верен, так как появление реактора именно на ВЛ (а не на шинах) является коренной причиной возникновения проблем с апериодическими токами и резонансными напряжениями.

Если бы зарядная мощность ВЛ компенсировалась линейными реакторами не более чем на 50—70%, а остальная часть зарядной мощности ВЛ компенсировалась бы реакторами, присоединяемыми не к линии, а к сборным шинам концевых распределительных устройств, то ВЛ не имели бы проблем с апериодическими токами и резонансными перенапряжениями. Преимущества такого правила выбора мест установки ШР подробно описаны в [4], и в случае его реализации уже не будет требоваться ни расчётов переходных процессов на ВЛ, ни создания каких-либо методик вроде [2] и её новых редакций.

### РЕЗИСТОРЫ В НЕЙТРАЛИ ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА

Вместо того чтобы признать нежелательной массовую установку реакторов на ВЛ 330—750 кВ и хотя бы на новых объектах отдавать предпочтение размещению реакторов на шинах, в нашей стране продолжают поиск такого способа, который решил бы проблему апериодических токов и резонансных перенапряжений как-то иначе. Тем самым путаются причина и следствие, и вместо борьбы с причинами аварий (они заключаются в строительстве и эксплуатации линий с близкой к 100% компенсацией зарядной мощности ВЛ линейными реакторами) мы наблюдаем малоэффективную борьбу с её следствиями (проявляют себя в виде апериодических токов и резонансных перенапряжений).

Одной из попыток создания устройства защиты ВЛ от апериодических токов и резонансных перенапряжений является работа [7], где описываются конструкция и принцип действия специальных резисторов, устанавливаемых в нейтрали линейного шунтирующего реактора. Поясним, почему такие резисторы вряд ли получат у нас широкое распространение.

Резисторы, установленные параллельно контактам выключателей по концам ВЛ, предназначены для ограничения апериодических токов на ВЛ и бесполезны для борьбы с резонансными перенапряжениями в неполнофазных режимах. Вместе с тем, резисторы

[7], установленные на ВЛ в цепи заземления (в нейтрали) каждого шунтирующего реактора, входят в контур «линия-реактор» и поэтому, на первый взгляд, позволят влиять не только на апериодические токи, но и на резонансные перенапряжения.

При отсутствии повреждений изоляции линии сумма токов трёх фаз ШР равна нулю. В том числе равна нулю сумма апериодических токов фаз ШР при включении ВЛ под напряжение. Следовательно вариант общего резистора (рис. 2а) не будет эффективен, ведь в случае ложной работы релейной защиты ВЛ и формирования команды на быстрое её отключение вслед за включением, такой резистор никак не ограничит апериодические токи выключателей ВЛ. Поэтому рассматривать надо вариант сразу трёх резисторов (рис. 2б).

Очевидно, что чем выше сопротивление резистора, тем сильнее его влияние на апериодическую составляющую тока и резонансные перенапряжения. Но применять резисторы высоких номиналов мешает ограниченная прочность изоляции реактора со стороны его нейтрали (для реактора 500 кВ нейтраль выполнена на 35 кВ).

Для реактора 500 кВ мощностью 3х60 МВАр активное сопротивление фазы составляет  $R_{\text{ф}} = 3,1 \text{ Ом}$ , а индуктивное  $X_{\text{ф}} = 1531 \text{ Ом}$ . При наибольшем рабочем напряжении сети 525 кВ и сопротивлении резистора  $R = 440 \text{ Ом}$  напряжение промышленной частоты на нейтрали реактора достигнет 85 кВ — значения, отвечающего одноминутному испытательному напряжению изоляции нейтрали класса 35 кВ.

Сопротивление  $R = 440 \text{ Ом}$ , как может показаться, является предельным для резисторов в нейтрали реакторов класса 500 кВ, однако на самом деле обоснование предельной величины сопротивления резистора гораздо сложнее. Дело в том, что 85 кВ — это всего лишь одноминутное испытательное напряжение для изоляции нового оборудования класса напряжения 35 кВ, т.е. эта величина имеет мало общего с теми условиями, в которых 30—40 лет будут работать резисторы, вводимые в работу многократно за срок эксплуатации линии, но на время не более нескольких секунд.

По различным соображениям можно полагать, что сопротивление резистора по условиям воздействия на изоляцию нейтрали ШР не должно быть более 300 Ом.

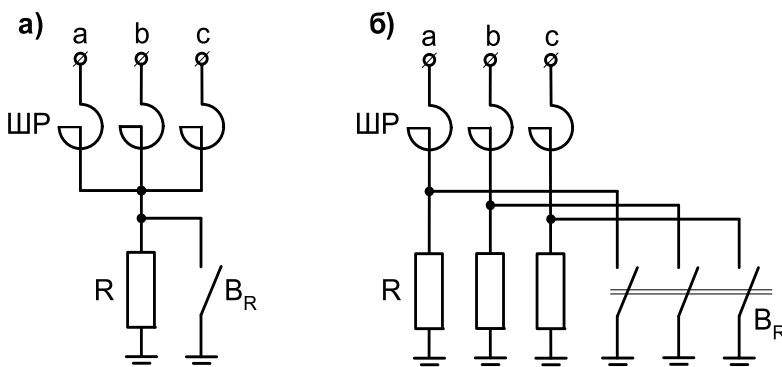
В статье [7] резистор представлен как способ ограничения апериодических токов, однако очевидно, что было бы неплохо путём установки резисторов решить ещё и проблему резонансных перенапряжений в неполнофазных режимах (ОАПВ и другие). Покажем, что резистор не способен решить проблему перенапряжений. Это происходит из-за противоречий в логике его работы в циклах ТАПВ и ОАПВ.

#### Цикл трёхфазного АПВ

Пусть в схеме рис. 1 имел место нормальный режим работы, но на линии

**Рис. 2. Варианты заземления нейтрали шунтирующих реакторов на ВЛ**

а — через общий резистор    б — через три резистора



возникло однофазное короткое замыкание. Если короткое замыкание возникло вблизи от перехода через ноль синусоиды сетевого напряжения, то в элементах схемы появятся апериодические токи. Они будут:

- в токе короткого замыкания и токе выключателя линии (рис. 3а);
- в токе фазы ШР, одноимённой с повреждённой фазой линии (рис. 3б).

В токе выключателя ВЛ, кроме апериодической составляющей тока короткого замыкания, есть периодическая составляющая (рис. 3а), протекающая под действием напряжения промышленной частоты сети. Поэтому кривая тока выключателей ВЛ имеет в отдельные моменты времени нулевые значения, и выключатели ВЛ не будут иметь трудностей с отключением от сети аварийной фазы ВЛ.

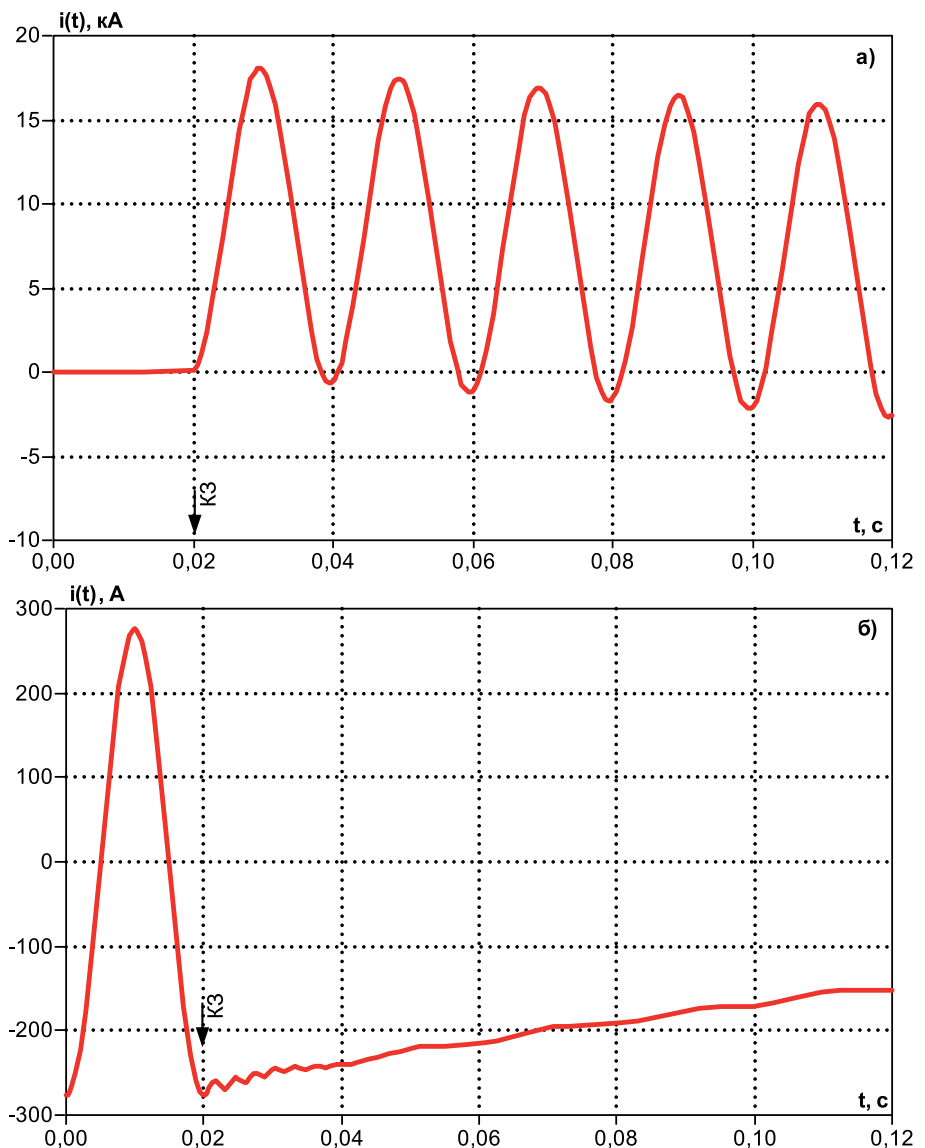
В токе же ШР, как это показано на рис. 3б, в отличие от тока выключателя ВЛ, периодическая составляющая отсутствует, поскольку фаза реактора оказалась шунтирована местом короткого замыкания, и напряжение сети уже не вызывает в реакторе переменного тока промышленной частоты. Это значит, что в токе реактора есть лишь апериодический ток, который замыкается по контуру «ШР — линия — место КЗ — земля — ШР» (рис. 1), и будет протекать в этом контуре даже некоторое время после отключения линии от сети, пока апериодический ток не затухнет или пока не погаснет дуга в месте повреждения.

Следует отметить, что форма тока реактора (рис. 3б) не зависит от длины ВЛ и коэффициента компенсации её зарядной мощности.

Поскольку до попытки подачи напряжения на линию в цикле АПВ резисторы в нейтрали ШР должны быть введены в работу путём их дешунтирования (чтобы влиять на апериодический ток ВЛ в момент её включения), то выключателю  $V_R$  во время размыкания своих контактов придётся гасить дугу апериодического тока, протекающего через ШР, величина которого может достигать 200—300 А (рис. 3б). Вакуумный или элегазовый выключатели 35 кВ вряд ли справятся с этой задачей.

Единственная возможность снизить риск отказа резисторного выключателя  $V_R$  — это дешунтировать резистор не в начале паузы ТАПВ, когда апериодический ток реактора значителен, а в конце паузы ТАПВ, когда апериодический ток реактора уже достаточно

**Рис. 3. Ток выключателя ВЛ (а) и ток реактора ВЛ (б) при коротком замыкании на ВЛ, возникшем в момент времени 0,02 секунды (схема рис. 1)**



затух или вовсе пропал из-за самоустранения короткого замыкания на ВЛ и связанного с ним контура для протекания апериодического тока. Видимо, риск отказа выключателя 35 кВ — это одна из причин, по которой разработчики резисторной установки дешунтируют резистор не сразу после отключения ВЛ, а только непосредственно перед подачей напряжения на ВЛ от сети — за 0,2 сек до подачи (в частности, за 0,2 сек до конца паузы ТАПВ).

### Цикл однофазного АПВ

Известно [3], что если апериодические токи представляют наибольшую опасность для выключателей ВЛ при коэффициенте компенсации зарядной мощности, равном 1,0, то наиболее опасные резонансные перенапряжения в цикле ОАПВ возникают при компенсации около 0,9 о.е. Если коэффициент 1,0 для типовой ВЛ 500 кВ с одним реактором достигается при длине около 175 км, то коэффициент 0,9 — при длине около 200 км. Именно такой рассмотрена длина ВЛ 500 кВ, для которой на рис. 4 показано напряжение аварийной фазы в цикле ОАПВ.

При ОАПВ (это частный случай неполнофазного режима), так же как и при ТАПВ, выключателю  $B_R$  резистора для ввода его в работу может потребоваться гасить дугу апериодического тока реактора. Из-за риска повредить выключатель резистора, его коммутацию и ввод в работу надо было бы производить в конце паузы ОАПВ, непосредственно перед подачей на ВЛ напряжения. Однако в таком случае резистор на протяжении всей паузы ОАПВ был бы зашунтирован выключателем  $B_R$  и никак не мог бы принять участие в ограничении резонансных перенапряжений, которые появляются в паузу ОАПВ после гашения дуги (случай «R нет» на рис. 4).

Согласно рис. 4 гашение дуги произошло в самом начале паузы ОАПВ, и на ВЛ стали развиваться резонансные перенапряжения «фаза-земля». Если бы резистор не успели ввести в работу (дешунтировать) в самом начале паузы ОАПВ, то тогда перенапряжения продолжили бы развиваться и могли повредить оборудование.

**Сравнение циклов ТАПВ и ОАПВ**

При коротких замыканиях на линии перед АПВ требуется ввод в работу резисторов в нейтрали ШР, но их дешунтирование может не состояться из-за наличия в токе реактора апериодической составляющей и невозможности гашения дуги этого тока резисторным выключателем  $B_R$ . По этой причине при ТАПВ и ОАПВ вводить в работу резисторы надо в самом конце бестоковой паузы, однако при ОАПВ это исключит какое-либо влияние резистора на резонансные перенапряжения в течение всей бестоковой паузы.

Также можно показать, что если каким-то образом удастся научиться вводить резисторы в работу, не дожидаясь конца ОАПВ, то в этом случае проявится иная проблема — недостаточная энергоёмкость резисторов, особенно при запуске в течение суток сра-

зу нескольких ОАПВ за время, недостаточное для полного остывания резисторов (для их остывания нужны несколько часов).

**КОММУТАЦИИ РЕАКТОРА**

В настоящее время для борьбы с апериодическими токами предлагаются следующие мероприятия:

- оснащение выключателей ВЛ предвключаемыми резисторами;
- оснащение выключателя ВЛ устройством управляемой коммутации;
- размещение резисторной установки в нейтрали шунтирующего реактора.

Было показано, что эти мероприятия не годятся для ограничения резонансных перенапряжений, а значит — не способны решить всех проблем реактированных ВЛ. Поэтому надо продолжать изучение мероприятий по ограничению апериодических токов и резонансных перенапряжений.

Пока не приходится рассчитывать на то, что произойдёт массовый перенос реакторов с ВЛ на шины, особенно для уже действующих линий электропередачи. Однако, как вариант, можно рассмотреть защиту ВЛ от апериодических токов и резонансных перенапряжений не за счёт переподключения реактора с ВЛ на шины, а путём отключения ШР от ВЛ лишь на определённое время, необходимое для подачи напряжения на ВЛ и для проведения циклов ТАПВ и ОАПВ.

Алгоритм коммутаций выключателя ШР должен учитывать, что при наличии на ВЛ короткого замыкания в токе реактора есть апериодическая составляющая (рис. 3б), и отключать ШР желательно в конце паузы АПВ. Тогда логика управления реакторным выключателем может быть такой:

- за 0,15—0,2 с до подачи напряжения на ВЛ (планово или в цикле ТАПВ) отключить три фазы реактора от ВЛ, а подключить их обратно уже

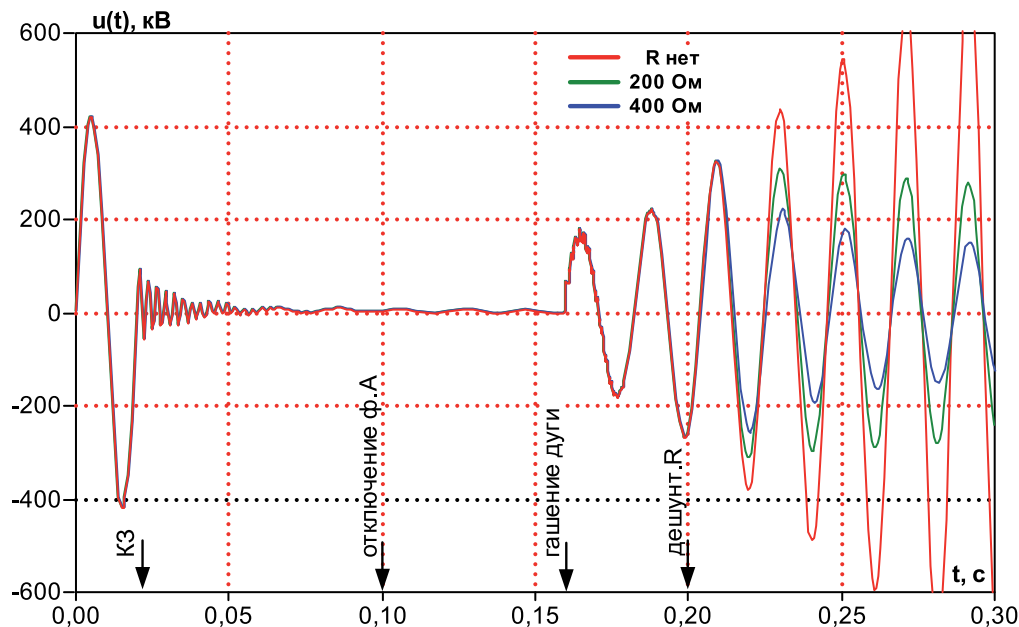
после успешной подачи напряжения на ВЛ, а лучше — после замыкания линии в транзит;


- в случае же выявления на ВЛ неполнофазного режима (ОАПВ или другого) надо предусмотреть «ускорение» и отключать фазу реактора не ожидая конца ОАПВ, а раньше — тогда, когда измеренное трансформаторами напряжение «фаза-земля» на отсоединённых от сети фазах ВЛ превосходит, скажем, 0,5 от нормального рабочего фазного напряжения.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. В сетях 330—750 кВ сложилась практика, согласно которой на многих

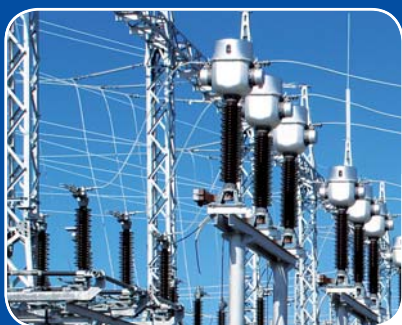
**Рис. 4. Напряжение аварийной фазы ВЛ 500 кВ длиной 200 км с одним ШР в бестоковую паузу ОАПВ в зависимости от сопротивления резисторов R в нейтрали ШР**



- ВЛ имеется высокая (близкая к 100%) компенсация зарядной мощности линейными ШР, что приводит к появлению опасных для выключателей ВЛ аперiodических токов, а также опасных для всего оборудования ВЛ резонансных перенапряжений при неполнофазных режимах питания (например, ОАПВ). Как правило, обе проблемы проявляются вместе и, соответственно, обе требуют решения.
- Для ограничения аперiodических токов выключатели ВЛ 330—750 кВ можно оснащать предвключаемыми резисторами или устройствами управляемой коммутации. Такие устройства влияют только на аперiodические токи и в принципе не способны ограничить перенапряжения в неполнофазных режимах, а для линий с компенсацией около 80—120% они неэффективны даже для борьбы с токами.
  - Установка специальных резисторов, размещаемых в нейтрали реакторов ВЛ 330—750 кВ, не способна защитить ВЛ от резонансных перенапряжений, а может использоваться лишь для ограничения аперiodических токов.
  - До настоящего времени единственное мероприятие, позволяющее даже для самых неблагоприятных линий с 80—120% компенсацией ограничить до безопасных значений и токи, и напряжения — это отключение на время коммутаций ВЛ 330—750 кВ какого-либо из линейных реакторов его выключателем. Ну а самым идеальным решением мог быть стать полный перенос реактора с линии на сборные шины, что возможно почти на всех ВЛ длиной менее 300—400 км (при наличии свободного места в распределительном устройстве). 

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гольдштейн С., Дмитриев М., Евдокунин Г., Иващенко Ю. Высоковольтные ВЛ: коммутации и воздействия на выключатели // *Новости электротехники*, № 3 (51), 2008. — С. 64—68.
- Методика расчёта и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащённых шунтирующими реакторами // Москва, ОАО «ФСК ЕЭС», введена приказом № 838р в 2012 г.
- 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.
- Дмитриев М.В. Требования к компенсации зарядной мощности линий электропередачи 500—750 кВ // *Энергетик*, № 11, 2014. — С. 3—8.
- СО 153-34.47.43-2003. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. — М.: Минэнерго России.
- Правила технической эксплуатации электростанций и сетей РФ. (Утв. Приказом по Минэнерго России от 19.06.2003 г. № 229, введены в действие с 30.06.2003 г.) — М.: Изд-во «Энергосервис», 2003.
- Наумкин И.Е. и др. Опыт обеспечения работоспособности элегазовых выключателей при коммутации компенсированных линий электропередачи // *Энергетик*, № 3, 2015. — С. 40—47.



Издательство журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» выпустило книгу академика РАЕН, профессора Владимира Абрамовича Непомнящего

## «НАДЕЖНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ»

В монографии исследована надёжность оборудования электростанций и электрических сетей напряжением 1150–10(6) кВ, разработана методика сбора и статистической обработки информации о надёжности оборудования. На основе статистических данных и расчётов определены основные параметры надёжности и динамика их изменения в процессе эксплуатации. Выявлены статистические законы распределения отказов и времени восстановления элементов энергосистем. Проведено их сравнение с зарубежными данными.

Тираж книги 5000 экз.,  
объём 196 с., формат 170x235 мм.  
Для приобретения издания  
необходимо позвонить по  
многоканальному телефону  
+7 (495) 645-12-41 или написать  
по e-mail: info@eepir.ru