

Генераторные выключатели для атомных электростанций

ШУЛЬГА Р. Н., ЛАВРИНОВИЧ В. А., ИВАНОВ В. П., СИДОРОВ В. А., СМИРНОВА Т. С.

Проведен сопоставительный анализ характеристик зарубежных и отечественных генераторных выключателей. Показана необходимость разработки отечественного генераторного выключателя для вновь строящихся АЭС с мощностью энергоблоков свыше 1200 МВт. В качестве наиболее перспективного решения представляется разработка гибридных генераторных выключателей с использованием главных контактов, вакуумных выключателей и управляемых разрядников. Приведена схема и описана работа элементов гибридных выключателей в режимах отключения трехфазного тока короткого замыкания. Разработана математическая модель гибридных выключателей в составе генератора, токопровода и трансформатора для энергоблока АЭС и приведены переходные процессы отключения тока короткого замыкания в различных режимах. Предлагается разработать гибридные выключатели для замены масляных и воздушных выключателей на этапах модернизации АЭС, а при новом строительстве целесообразно использовать генераторные распределительные устройства, в качестве прототипа которых приведено элегазовое устройство разработки фирмы ABB. Сформулированы основные электрические соотношения для оценки коммутационной способности генераторных выключателей в виде амплитуды тока отключения трехфазного тока короткого замыкания, степени его асимметрии, амплитуды, а также скорости нарастания переходного восстанавливающегося напряжения.

Ключевые слова: генераторный выключатель, атомная электростанция, вакуумный выключатель, генераторное распределительное устройство

Если современные (вакуумные и элегазовые) сетевые (высоковольтные) выключатели (СВ) классов напряжения 10–110 кВ на токи отключения до 63 кА выпускаются отечественной промышленностью, то генераторные выключатели (ГВ) для крупных АЭС и ТЭС практически не разработаны и не освоены. В России в энергоблоках мощностью до 400 МВт стоят масляные выключатели типа МГГ и ВГГ или воздушные выключатели типа ВВГ, ВВОА на номинальные токи 2000–13000 А и токи отключения 45–160 кА. Эти выключатели в большинстве выработали свой ресурс, морально и физически устарели и требуют замены.

Отечественный стандарт [1] во многом не учитывает особенности работы ГВ. Зарубежные производители и испытатели ориентированы на стандарт IEEE Std 37.013-1997 «Высоковольтные генераторные выключатели переменного тока», основанный на симметричных токах, который недостаточно учитывает специфику ГВ. Стандарт [2] более полно учитывает специфику ГВ, которую отличает от СВ: большее число ступеней номинальных токов и напряжений, высокое значение аperiodической составляющей в токе короткого замыкания (КЗ) на шинах генераторного напряжения, большее значение скорости переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) на контактах ГВ при отключении токов КЗ вблизи генератора, коммутация в ре-

жиме рассогласования фаз генератора и сети, вызванная неисправностью синфазирования, выпадением генератора из синхронизма, при работе релейной защиты при потере возбуждения. Кроме того, для генераторов, работающих в пиковом режиме, присущим для ГЭС, ГТЭС, ГАЭС, требуется более высокий механический и коммутационный ресурсы генераторных выключателей по сравнению с сетевыми выключателями.

Разработка новых образцов ГВ с использованием элегазовой и вакуумной техники взамен устаревших масляных и воздушных ГВ требует разработки новых отечественных стандартов, комплексных решений и схем для коммутационных испытаний (КИ) указанных выключателей. Так, благодаря наличию указанных решений фирма ABB с 1954 г. продала в 100 стран 8 тыс. элегазовых и вакуумных ГВ на номинальные токи 3–50 кА, токи отключения 50–300 кА напряжением 15–31,5 кВ [3]. Фирма Siemens в качестве ГВ использует преимущественно вакуумные выключатели 3АН374 на номинальные токи до 10 кА, токи отключения 63 или 80 кА напряжением до 24 кВ [4]. Близкие показатели имеют ГВ производства других зарубежных фирм (Alstom, Schneider Electric). Отечественные фирмы, например «Высоковольтный Союз» и АО «ПО Электроаппарат», также выпускают вакуумные и элегазовые ГВ соответственно, однако в бо-

лее узком диапазоне напряжений (10–20 кВ) на номинальные токи от 4 до 10 кА, номинальные токи отключения от 63 до 90 кА, например, вакуумный ВГГ-20-90/10000 У3 (вместо МГ-20) по ТУ3414-008-00213606-2018 [5, 6]. Разруха 90-х годов предыдущего века привела к практической утере испытательной базы для КИ, состояние которой оценивается в [7, 8], которая необходима для отладки ГВ.

Выполненный анализ существующих зарубежных и отечественных ГВ показал отсутствие разработок ГВ на параметры: по номинальному току 33,5 кА и выше, номинальному току отключения 350 кА и выше, требуемые для АЭС мощностью, равной 1200 МВт и выше. Решение проблемы сводится либо к запараллеливанию выключателей, либо к разработке гибридных конструкций, что представляется более перспективным для АЭС более 1200 МВт. В условиях подпитки со стороны сети и рассогласования фаз ток КЗ может достигать 700–800 кА, что требует разработки новых подходов как к ГВ, так и к реализации КИ.

В статье рассмотрен новый подход к разработке и испытанию ГВ для создания линейки гибридных генераторных выключателей (ГГВ) энергоблоков АЭС мощностью 200, 600, 1200 кВт и выше. Суть подхода частично отражена в [9–11], в которых используется гибридная конструкция ГВ с трёхступенчатой коммутацией тока.

Разработка гибридного ГВ. Предполагаемое решение задачи состоит в разделении функций в ГГВ между пропусканием номинального и аварийного тока через главные контакты (ГК) с малым сопротивлением (десяток микроом) и малыми потерями на нагрев, а затем шунтированием и отключением тока вакуумным выключателем (ВВ), который должен выдержать восстанавливающееся напряжение желательно при некотором ограничении отключаемого тока КЗ и если возникнет предельный режим близкого трехфазного тока КЗ, перевести номинальный ток отключения на дополнительное устройство в виде управляемого вакуумного разрядника (УВР) с высокой отключающей способностью, который по принципу его действия способен отключить ток при ближайшем переходе через нуль.

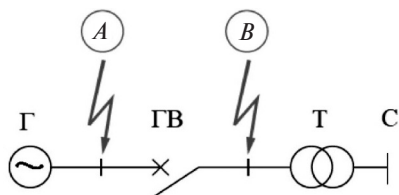


Рис. 1. Расчетная схема трехфазного КЗ для ГВ: Г – генератор; ГВ – генераторный выключатель; Т – трансформатор; С – сборные шины; А – КЗ на шинах генератора; В – КЗ между генераторным выключателем и трансформатором [12]

Если перевод тока из цепи ГК в замкнутый ВВ с малым сопротивлением не совсем проблематичен, то последующий перевод тока в УВР представляет определенную проблему, осложненную наличием апериодической составляющей тока. Ещё одной задачей для успешной работы гибридного ГВ является разработка синхронизированного управляемого пофазно привода с тем, чтобы первым отключать фазу с минимальной апериодической составляющей тока КЗ для облегчения требований к выключателю и остальному оборудованию.

На рис. 1 по данным [12] приведена расчетная схема трехфазного КЗ для ГВ, включенного между генератором Г и трансформатором Т, причем А – соответствует КЗ на выводах генератора, а В – КЗ между ГВ и трансформатором. Вариант В является наилучшим для выключателя в части амплитуды и степени асимметрии и ниже принимается в качестве расчетного.

На рис. 2 приведена однолинейная схема ГГВ с УВР, причем в части ВВ и УВР при необходимости предполагается сборка из составных элементов.

Предлагаемая схема при отключении работает следующим образом: в режиме нормального электроснабжения контакты ГК и ВВ замкнуты и ток протекает через них; контакты УВР находятся в разомкнутом состоянии.

При возникновении КЗ со стороны нагрузки на выходе ДТ появляется сигнал, соответствующий режиму КЗ, который поступает в СУ и от него на привод, который отключает ГК. При этом происходит размыкание контактов и ток переходит в цепь предварительно включенного ВВ, контакты которого механически связаны с ГК и начинают размыкаться через время, достаточное для полного восстановления прочности межконтактного промежутка ГК. На контактах ВВ при их размыкании загорается электрическая дуга. Падение напряжения на контактах ВВ измеряется датчиком напряжения,

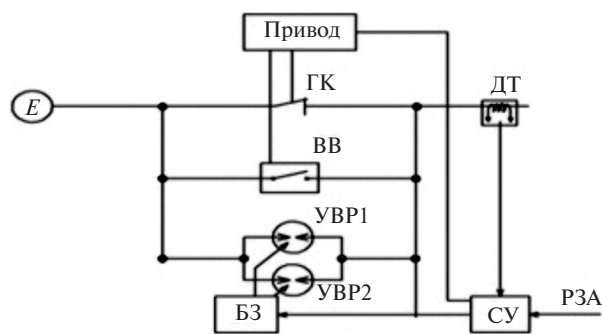


Рис. 2. Однолинейная схема ГГВ с вакуумным разрядником: Е – генератор; ГК – главные контакты; ВВ – вакуумный выключатель; УВР – управляемый вакуумный разрядник; БЗ – блок запуска; ДТ – датчик тока; СУ – система управления ГГВ; РЗА – релейная защита и автоматика

и сигнал от него передается в систему управления, которая формирует управляющий сигнал на выключение УВР (Р), как только падение напряжения на контактах ВВ достигнет порядка 100–200 В.

Во время отключения тока основной дуговой разряд возникает на контактах ВВ, при этом время горения дуги ограничено временем от момента размыкания контактов ВВ до момента включения УВР, что составляет доли миллисекунды, а отключение тока осуществляется УВР при первом переходе тока через нуль (естественная коммутация) после полного отключения ГК и ВВ.

На рис. 3 приведен макет на основе вакуумных управляемых разрядников УВР и блоков запуска (рис. 2), который прошел апробацию в составе высоковольтного быстродействующего коммутатора 35 и 110 кВ [13–15].

Математическое моделирование и макетирование ГВ. На математической модели синхронного турбогенератора ТВВ-1200 4УЗ напряжением 24 кВ с блочным трансформатором ОДЦ-533000/750 (330)-У1 были исследованы отключения трехфазного КЗ за схемой ГВ (рис. 4) [16]. Амплитуда ударного тока достигает 370 кА, при аналитическом расчете без затухания периодической составляющей – 390 кА, а с учетом затухания – 330 кА. Через шесть периодов частоты сети РЗА дает сигнал на отключение фазы В, в которой отсутствует

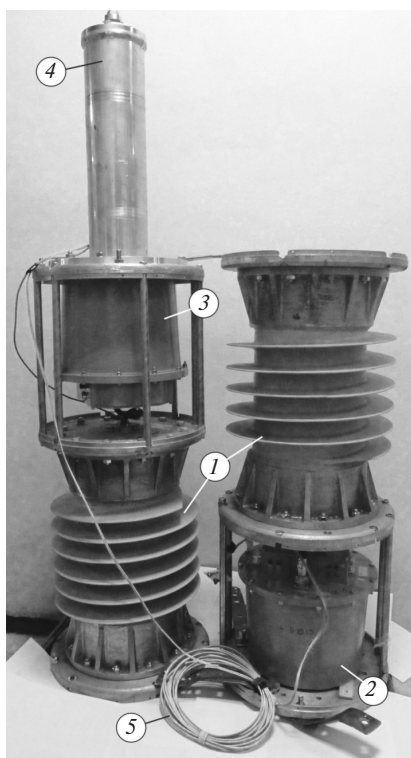


Рис. 3. Макет на основе вакуумных управляемых разрядников и блоков запуска БЗ: 1 – изоляционная оболочка, в которой расположены вакуумные управляемые разрядники; 2, 3 – блоки запуска; 4 – цилиндр, в котором расположен коаксиальный измерительный шунт; 5 – оптоволоконный кабель

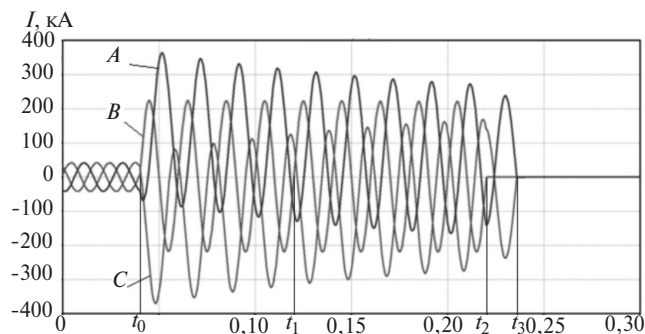


Рис. 4. Осциллограммы отключения токов КЗ ГВ: t_0 – момент возникновения КЗ; t_1 – момент подачи команды от релейной защиты на отключение выключателя; t_2 – момент отключения тока в фазе В; t_3 – то же в фазах А и С

апериодическая составляющая тока КЗ, а спустя примерно период отключаются в момент перехода тока через нуль обе оставшиеся фазы А и С (см. рис. 4).

Более наглядно процесс отключения тока КЗ показан на рис. 5 для фазы С с наибольшей апериодической составляющей. В исходном состоянии номинальный ток амплитудой 47 кА протекает через ГК фазы С. Спустя шесть периодов включается вакуумный выключатель ВВ непосредственно перед отключением ГК и ток переходит на холодные контакты ВВ. Спустя два периода подается сигнал на включение разрядников УВР и ток амплитудой до 300 кА переходит в цепь указанного разрядника благодаря падению напряжения на дуге ВВ, которое составляет примерно 200 В. После снятия им-

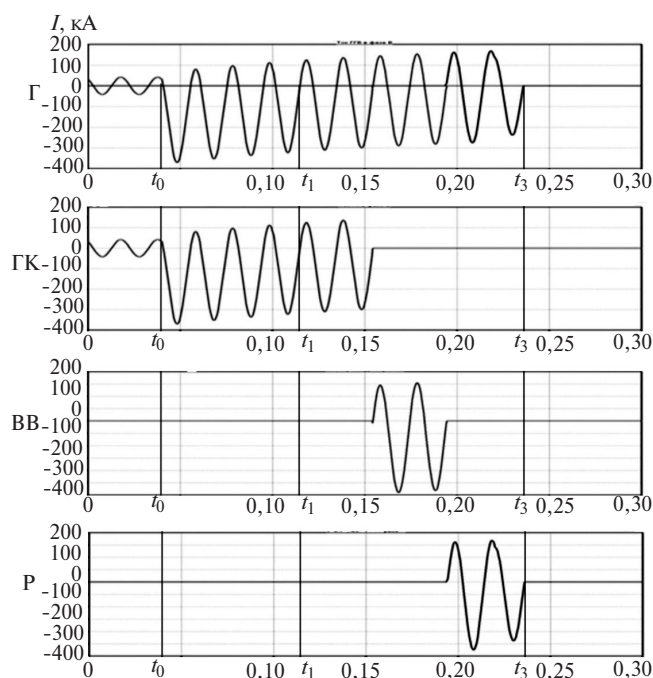


Рис. 5. Отключение ГВ в фазе С: токи в цепях: Г – генератора, ГК – главных контактов; ВВ – вакуумного выключателя; Р – вакуумного разрядника

пульса управления с блока запуска происходит за-
пираание УВР и отключение ГВ. Для выключате-
лей генераторов мощностью менее 200 МВт выше-
указанные временные интервалы могут быть вдвое
короче.

Наряду с полученными значениями тока отклю-
чения ГВ другим важнейшим параметром являет-
ся значение ПВН и скорости его нарастания срав-
нительно с заданным в ТЗ значением 6 кВ/мкс,
причем для наихудшего случая трехфазного КЗ и
противофазного питания со стороны сети. На
рис. 6 показано напряжение ПВН (кВ) между кон-
тактами ГВ при его отключении в момент
 $t_3=0,14$ с и отключении КЗ в момент $t_4=0,2$ с. На
рис. 7 показан начальный фронт ПВН (кВ) во вре-
мени. Для худшего случая минимальных емкостей
системы скорость нарастания ПВН не превышает
2,5 кВ/мкс, что вполне допустимо.

В соответствии со стандартом [12] для опреде-
ления скорости нарастания ПВН вводятся на рис. 7
две прямые линии, которые изображают нижние и
верхние пределы восходящей формы сигнала ПВН.
Верхняя линия начинается в начале координат и
является касательной к кривой ПВН, а заканчи-
вается в точке пересечения с горизонтальной линией,
соответствующей u_c . Длительность фронта ПВН
между указанными точками соответствует t_3 . Время
задержки ПВН соответствует значению t_d , которое
зависит от номинального напряжения и может со-
ставлять порядка микросекунд. Значение u' равно
 $u_c/3$ и наряду со значением $t'=t_d+t_3/3$ определяет
начальную скорость ПВН. Скорость ПВН в зави-
симости от мощности энергоблока в диапазоне от
10 до 1000 МВА нормируется от 3 до 6 кВ/мкс [12].

Наиболее тяжелым воздействиям подвергаются
выключатели по току при трехфазном КЗ и проти-
вофазном питании со стороны сети, приведенные
на рис. 8, где в модели принята последовательность
коммутаций: 0 – включение ГВ; 0,01 с – включе-
ние сети; 0,04 с – трехфазное КЗ между ГВ; 0,14 с
– отключение ГВ; 0,2 – отключение КЗ.

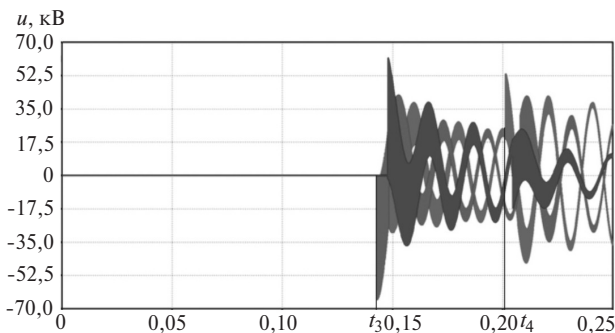


Рис. 6. Напряжение между контактами ГВ при отключении
трехфазного КЗ (0,2 с) и противофазного питания со стороны
сети

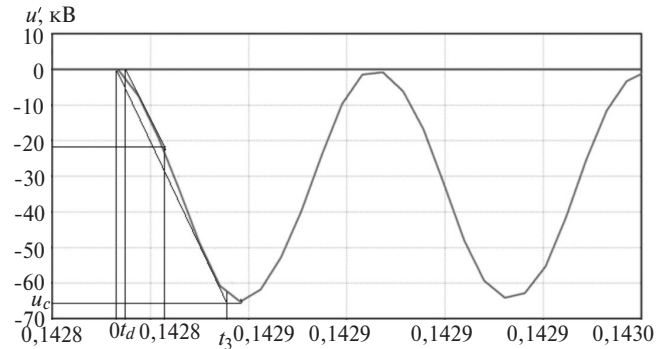


Рис. 7. Начальный фронт ПВН между контактами ГВ: 0 – от-
ключение ГВ; t_d – задержка ПВН; t' – участок кривой ПВН с
начальной скоростью восстановления; t_3 – длительность фронта
ПВН; u_c – амплитуда ПВН; u' – начальное значение ПВН,
равное $u_c/3$ [12]

Амплитуда ударного тока ГВ не превышает
300 кА, что несколько меньше 350 кА приведенных
на рис. 4, однако амплитуда тока в месте КЗ дости-
гает 650 кА (см. рис. 8, б) и может быть даже выше
при металлическом КЗ. Ток подпитки со стороны
сети сопоставим с током ГВ (см. рис. 8, в).

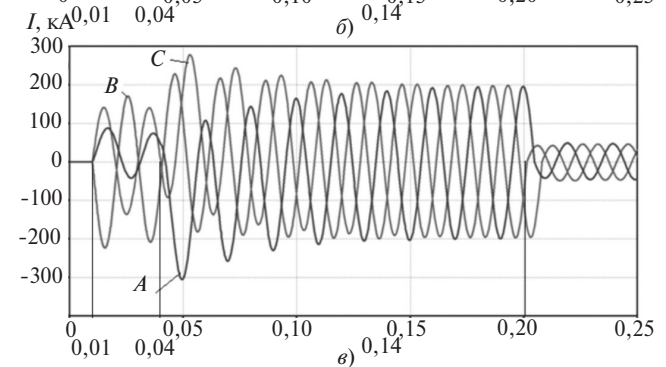
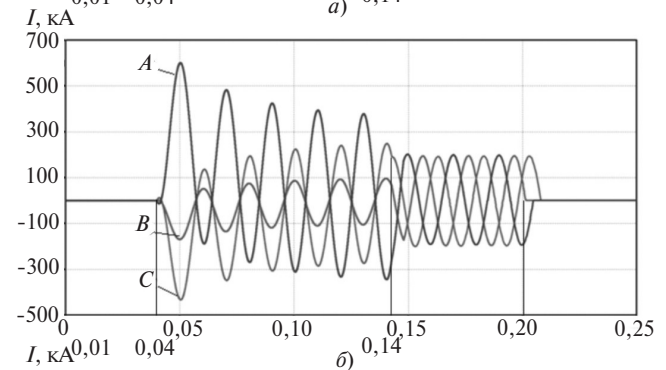
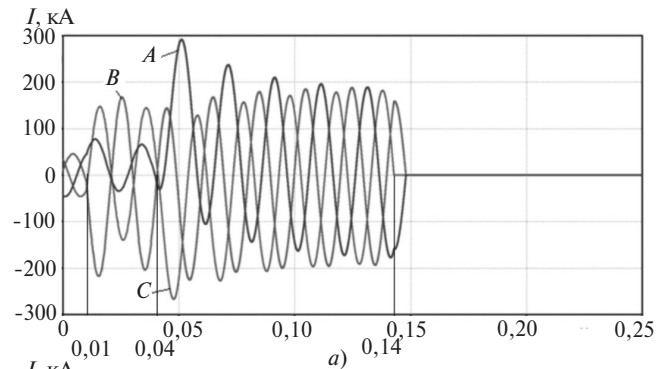


Рис. 8. Ток через ГВ (а); то же в месте КЗ (б) и ток от сети, ра-
ботающей в противофазе с генератором (в)

Генераторное распределительное устройство (ГРУ). Если для модернизации АЭС достаточно из экономических соображений применение ГВ, то при новом строительстве необходимо использовать ГРУ, являющееся коммутационно-защитным комплексом со средствами управления, защиты, измерения и диагностики, причем ГРУ может быть как с использованием вакуумных коммутационных аппаратов, так и элегазовых. На рис. 9 приведены схема элегазового генераторного распределительного устройства (ЭГРУ) типа HECS-130L, полюс выключателя и трехфазное исполнение ЭГРУ [17]; ЭГРУ содержит генераторный выключатель ГВ, разъединитель, заземлители, трансформаторы тока, трансформаторы напряжения с обеих сторон от ГВ с одной или двумя обмотками; пусковой выключатель (с пониженным напряжением) для пуска газовой турбины от статического преобразователя частоты; импульсные конденсаторы (с обеих сторон от ГВ) для защиты от перенапряжений и снижения амплитуды ПВН; разрядник со стороны трансформатора. Наличие указанных конденсаторов позволяет в 2–3 раза снизить скорость ПВН сравнительно с приведенным значением на рис. 7.

В дугогасительной камере генераторного выключателя типа HECS-130L элегаз используется как для гашения дуги, так и для обеспечения внутренней изоляции выключателя. Внешняя изоляция воздушная. Для отключения тока используется сочетание принципов автодутья и поршневого дутья; конструкция оптимизирована с целью существенного снижения потребляемой энергии привода. Принцип автодутья позволяет достигнуть большой отключающей способности, а также обеспечить отключение небольших индуктивных токов почти без перенапряжений. В выключателе применены отдельные дугогасительные контакты и главные токопроводящие контакты для проведения тока во включенном положении выключателя. Такое решение дает возможность избежать износа (эрозии) главных контактов и гарантировать их токопроводящую способность даже после большого количества операций.

Гидропружинный привод выключателя объединяет преимущества гидравлического привода и аккумуляции энергии в пружинах. Аккумуляция энергии происходит с помощью комплекта тарельчатых пружин, который гарантирует долговременную стабильность, безотказность и устойчивость работы в широком диапазоне температур. Для срабатывания механизма привода и освобождения энергии пружин используются испытанные элементы гидравлической техники, такие как клапаны управления и гидроцилиндры.

Разъединитель установлен со стороны трансформатора в том же самом кожухе. Он имеет подвижной контакт в виде телескопически перемещающейся трубы. Подвижный контакт расположен со стороны вывода, неподвижный — со стороны выключателя. Такое расположение гарантирует свободный доступ к элементам выключателя и делает более простым техническое обслуживание и ремонт.

Заземлитель может быть установлен с одной или обеих сторон выключателя. Заземлитель и его соединения предназначены для защитного заземления, т.е. он рассчитан на полный аварийный ток, но не обладает включающей способностью или способностью длительного пропускания тока. Заземлитель является конструкцией с рубящим ножом на шарнире, соединенным с кожухом, и с неподвижным контактом на токоведущем контуре.

Основные качественные соотношения для оценки коммутационной способности ГВ. В соответствии с [12] основными для электрических расчетов ГВ являются: амплитуда тока отключения трехфазного КЗ, степень асимметрии, амплитуда и скорость нарастания ПВН. Для оценочных расчетов с погрешностью порядка 15% можно пренебречь затуханием периодической составляющей тока, неучетом действия АРВ, влиянием дуги и другими общепринятыми допущениями. Задаваясь значением номинального тока генератора $I_{\text{ном}}$, сверхпереходным реактансом X_d'' , коэффициентом мощности φ , постоянной времени апериодической составляющей T_a , получим:

сверхпереходную ЭДС, равную

$$E'' = \sqrt{(U_0 + X_d'' \sin \varphi)^2 + (X_d'' \cos \varphi)^2};$$

начальное значение периодической составляющей:

$$I_{\text{по}} = E'' / I_{\text{ном}};$$

ударный коэффициент

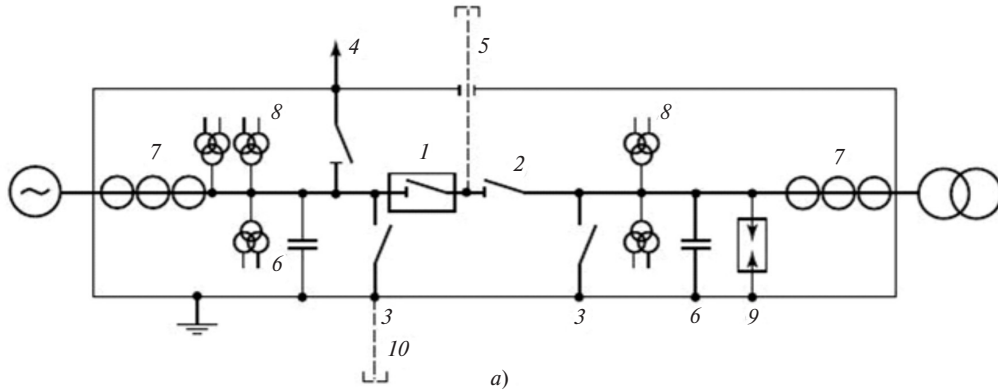
$$\alpha = 1 + e^{-0,01/T_a};$$

ударный ток

$$i_{\text{уд}} = \alpha \sqrt{2} I_{\text{по}}.$$

В результате для заданных параметров схемы получим: $E'' = 1,145$ отн.ед., $I_{\text{по}} = 4,16$ отн.ед., $i_{\text{уд}} = 11,5$ отн.ед., а с учетом затухания $i_{\text{уд}} = 10,0$ отн.ед., что хорошо согласуется с данными моделирования, приведенными в [9].

Степень асимметрии в соответствии с [12] определяется соотношением (%) постоянной состав-



б)



в)

Рис. 9. Схема элегазового генераторного распределительного устройства (а), полюс выключателя (б) и трехфазное исполнение ЭГРУ (в): 1 – генераторный выключатель; 2 – линейный разъединитель; 3 – заземлитель; 4 – пусковой выключатель для соединения со статическим преобразователем частоты; 5 – ручное короткозамыкающее соединение (при снятой крышке); 6 – конденсатор для защиты от перенапряжений; 7 – трансформатор тока; 8 – трансформатор напряжения; 9 – разрядник; 10 – короткозамыкающее соединение с приводом от двигателя (только для HECS с заземлителем со стороны генератора)

ляющей трехфазного тока КЗ к действующему значению периодической составляющей тока $I_{по}$ в момент отключения ГВ.

Амплитуда ПВН (кВ) в соответствии с [12] определяется соотношением

$$U_c = k_{pp} k_{af} U_r \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}},$$

где коэффициенты k_{pp} и k_{af} определяются порядком подключения полюсов ГВ и характером заземления нейтрали трансформатора и их значения равны 1,5; $U_r \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ – амплитуда фазного напряжения генератора.

Для генераторов мощностью 100 МВА амплитуда ПВН принимается равной $1,84U_r$, а для противофазного режима сети относительно генератора при отключении КЗ – $2,6U_r$, причем ПВН представляет косинусоиду одной частоты. Скорость

ПВН соответственно принимается равной 1,6 кВ/мкс и 3,3 кВ/мкс.

Влияние дуги, которая появляется после разделения главных контактов ГК, и отражается в переходном процессе тока ГВ за счет дополнительного активного сопротивления R_{arc} , которое вместе с сопротивлением статора генератора резко снижает постоянную составляющую тока КЗ примерно за один период частоты сети. Применение вакуумных выключателей и разрядников упрощает расчет влияния дуги, так как падение напряжения на дуге может быть принято постоянным на уровне до 200 В, что способствует гашению ГВ.

Выводы: 1. Наиболее перспективным решением для генераторных выключателей для использования на АЭС с мощностью энергоблоков свыше 1200 МВт является разработка гибридных генераторных выключателей с использованием главных контактов для длительного режима работы с парал-

лельной работой вакуумных выключателей и разрядников при отключении номинальных токов и номинальных токов отключения. Приведена схема и описана работа элементов ГГВ в режимах отключения трехфазного тока КЗ.

2. Предлагаемые к разработке гибридные генераторные выключатели предназначаются для замены масляных и воздушных генераторных выключателей на этапах модернизации АЭС, а при новом строительстве целесообразно их использовать в составе генераторных распределительных устройств, в качестве прототипа которых приведено элегазовое генераторное распределительное устройство разработки фирмы АВВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52565-2006 Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.
2. IEC/IEEE 62271-37-013. High Voltage Alternating Current-Breakers.
3. Элегазовые генераторные распределительные устройства НЭС, с. 6 [Электрон. ресурс] <http://www.new.abb.com> (дата обращения 05.09.2019).
4. Генераторные распределительные устройства НВ3-80 с автоматическими выключателями. — Каталог НВ3-80, 2015, с. 28 [Электрон. ресурс] <http://www.siemens.ru/lmv> (дата обращения 05.09.2019).
5. Генераторные выключатели. Высоковольтный союз [Электронный ресурс]: <http://www.vsoyuz.com> (дата обращения 05.09.2019).
6. АО ВО Электроаппарат [Электрон. ресурс] <http://www.ea.spb.ru/catalog/4/14/> (дата обращения 05.09.2019).
7. Испытательный Центр ВЭИ. Всероссийский электротехнический институт — филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» [Электрон. ресурс] <https://dostup1.ru/> (дата обращения 05.09.2019).
8. Испытательный Центр НТЦ ФСК [Электрон. ресурс] <https://an-babushkin.livejournal.com/> (дата обращения 05.09.2019).
9. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Разработка гибридного генераторного выключателя. — XXVIII Международная научно-техническая конференция ТРАВЭК «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования», 5–6 июня 2019 г., Москва.

10. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Исследования и разработка гибридного генераторного выключателя. — Энергия единой сети, июнь–июль 2019, No. 3 (45), с. 63–72.

11. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Гибридный генераторный выключатель и испытательный стенд. — Энергоэксперт, июль 2019, No. 3, с. 14–20.

12. Technical Application Paper № 22, Medium voltage generator circuit-breaker [Электрон. ресурс] <https://www.library.e.abb.com/public/>, 2017.03/pdf (дата обращения 05.09.2019).

13. Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Перцев А.А., Потокин В.С., Ромочкин Ю.Г., Шохин Е.А. Вакуумные дугогасительные камеры, разработанные Всесоюзным электротехническим институтом имени В.И. Ленина. — Электротехника, 1991, No. 12, с. 9–15.

14. Сидоров В.А., Домашенко Г.Д., Ахметгареев М.Р., Щербиков Ю.В. Высоковольтный быстродействующий коммутатор переменного тока на основе вакуумных управляемых разрядников. — Электричество, 2018, No. 4, с. 4–13.

15. Акинин А.А. и др. Ограничение токов короткого замыкания в электрических сетях 110–220 кВ. — Энергоэксперт, 2013, т. 1 (36), с. 34–38.

16. ATP Rule Book. Leuven EMTP Center, 1992, p. 247.

17. Генераторные выключатели [Электрон. ресурс] <https://www.ozlib.com/87847/tehnika/> (дата обращения 05.09.2019).

18. R.P.P. Sweets, L.H. te Paske, S. Kuivenhoven, R. Thomas, V. Royot, P. Robin-Joan, J.M. Willieme, F. Jacquer, Interruption Phenomena and Testing of Very Large SF6 Generator Circuit-Breaker, CIGRE 2014, F3-306, pp. 1–19.

[11.09.2019]

А в т о р ы: Шульга Роберт Николаевич — доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник ВЭИ, защитил диссертацию в 1970 г.

Лавринович Валерий Александрович — доктор техн. наук, главный конструктор ВЭИ, диссертацию защитил в 1972 г.

Иванов Валерий Павлович — главный специалист ВЭИ.

Сидоров Владимир Алексеевич — кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник ВЭИ, защитил диссертацию в 1990 г.

Смирнова Татьяна Сергеевна — инженер-конструктор ВЭИ.

Electrichestvo, 2020, No. 9, pp. 20–27

DOI:10.24160/0013-5380-2020-9-20-27

Generator Circuit-Breakers for Nuclear Power Plants

SHUL'GA Robert N. (All-Russian Institute of Electrical Engineering (ARIEE), Moscow, Russia) — Leading Researcher, Dr. Sci. (Eng.)

LAVRINOVICH Valery A. (ARIEE, Moscow, Russia) — Main Designer, Dr. Sci. (Eng.)

IVANOV Valery P. (ARIEE, Moscow, Russia) — Main Specialist

SIDOROV Vladimir A. (ARIEE), Moscow, Russia) — Leading Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

SMIRNOVA Tat'yana S. (ARIEE, Moscow, Russia) — Engineer-Designer

A comparative analysis of the characteristics of foreign and domestic generator circuit breakers is carried out. The necessity of developing a domestic generator circuit breaker for newly constructed nuclear power plants with a power unit capacity of over 1200 MW is shown. The most promising solution is the

development of hybrid generator circuit breakers using main contacts, vacuum circuit breakers and controlled arresters. The scheme and operation of elements of hybrid circuit breakers in modes of shutdown of three-phase short-circuit current is resulted. The developed mathematical model of hybrid breakers consisting of generator, busbar and transformer for power plant and given transients disable the short-circuit current in different modes. It is proposed to develop hybrid circuit breakers to replace oil and air circuit breakers at the stages of modernization of nuclear power plants, and in the new construction it is advisable to use generator circuit breakers, as a prototype of which the gas-insulated device developed by ABB is given. Basic electrical formulas for estimation of the switching capacity of the circuit breaker of the generator in the amplitude of the current gap three-phase short-circuit current, degree of asymmetry, amplitude and rate of rise of transient recovery voltage formulated.

Key words: generator circuit breaker, nuclear power plant, vacuum circuit breaker, generator switchgear

REFERENCES

1. **GOST R 52565-2006.** *Vyklyuchateli peremennogo toka na napryazheniye ot 3 do 750 kV. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* (Circuit breakers AC voltage from 3 to 750 kV. General specifications).
2. **IEC/IEEE 62271-37-013.** (High Voltage Alternating Current-Breakers).
3. **Elegazovyye generatormyye raspreditel'nyye ustroystva NES, p. 6** (Elegazovyye gas-insulated switchgear is CARRIED, p. 6) [Electron. Resource] [https:// www.new.abb.com](https://www.new.abb.com) (Data of appeal 05.09.2019).
4. **Generatormyye raspreditel'nyye ustroystva HB3-80 s avtomaticheskimi vyklyuchatelyami.** – *Katalog HB3-80, 2015, p. 28* (Generator switchgear HB3-80 breaker, Catalog HB3-80, 2015, p. 28) [Elektron. Resource] [https:// www.siemens.EN/lmv](https://www.siemens.EN/lmv) (Data of appeal 05.09.2019).
5. **Generatormyye vyklyuchateli. Vysokovol'tnyy soyuz** (The generator circuit breakers-high voltage Union) [Electron. Resource] [http:// www.vsoyuz.com](http://www.vsoyuz.com) (Data of appeal 05.09.2019).
6. **AO VO Elektroapparat** (AO IN Elektroapparat) [Electron. Resource] [https:// www.ea.spb.ru/catalog/4/14/](https://www.ea.spb.ru/catalog/4/14/) (Data of appeal 05.09.2019).
7. **Ispytatel'nyy Tsentr VEI. Vserossiyskiy elektrotekhnicheskiy institut – filial FGUP «RFYATs-VNIITF»** (Test Center VEI. All-Russian electrotechnical Institute-branch of FSUE «RFYaTs-VNIITF») [Electron. Resource] <https://dostup1.ru/> (Data of appeal 05.09.2019).
8. **Ispytatel'nyy Tsentr NTTS FSK** (Test Center the NTC) [Electron Resource] [https:// an-babushkin.livejournal.com/](https://an-babushkin.livejournal.com/) (Data of appeal 05.09.2019).
9. **Shulga R.N., Lavrinovich V.A., Ivanov V.P., Sidorov V.A., Smirnova T.S.** *Razrabotka gibridnogo generatornogo vyklyuchatelya.* – XXVIII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya TRAVEK «Perspektivy razvitiya elektroenergetiki i vysokovol'nogo elektrotekhnicheskogo oborudovaniya (Development of hybrid generator circuit breaker. XXVIII international scientific and technical conference of TRAVEC «Prospects of development of electric power industry and high-voltage electrical equipment»), June 5–6, 2019, Moscow.
10. **Shulga R N., Lavrinovich V.A., Ivanov V.P., Sidorov V.A., Smirnova T.S.** *Energiya edinoy seti – in Russ. (Unified Grid Energy)*, June–July 2019, No. 3 (45), pp. 63–72.
11. **Shulga R.N., Lavrinovich V.A., Ivanov V.P., Sidorov V.A., Smirnova T.S.** *Energexpert – in Russ. (Energexpert)*, July 2019, No. 3, pp. 14–20.
12. **Technical Application Paper No. 22, Medium voltage, generator circuit-breaker** [Electron Resource] [https:// www.library.e.abb.com /public/ 2017.03/pdf](https://www.library.e.abb.com/public/2017.03/pdf) (Data of appeal 05.09.2019).
13. **Belkin G S., Lukacka I.A., Pertsev A.A., Potokin V.S., Romochkin Yu.G., Shokhin E.A.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical engineering)*, 1991, No. 12, pp. 9–15.
14. **Sidorov V.A., Domashenko G.D., Akhmetgareev M.R., Shcherbakov Yu.V.** *Elektrichestvo – in Russ (Electricity)*, 2018, No. 4, pp. 4–13.
15. **Akinin A.A. et al.** *Energexpert – in Russ. (Energexpert)*, 2013, vol. 1 (36), pp. 34–38.
16. **ATP Rule Book.** Leuven EMTP Center, 1992, p. 247.
17. **Generatormyye vyklyuchateli** (The generator circuit breakers) [Electron. Resource] [https:// www.ozlib.com/87847/tehnika/](https://www.ozlib.com/87847/tehnika/) (Data of appeal 05.09.2019).
18. **P.P.P. Sweets, L.H. te Paske, SW. Kuivenhoven, R. Thomas, V. Royot, P. Robin-Foan, J.M. Willieme, F. Jacquer.** *Interruption Phenomena and Testing of Very Large SF6 Generator Circuit-Breaker*, CIGRE 2014, A3-306, pp. 1–10.

[11.09.2019]