# ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

АВТОРЫ:

Р.Н. ШУЛЬГА,
К.Т.Н.,
ВЭИ — ФИЛИАЛ
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»

В.А. ЛАВРИНОВИЧ,
Д.Т.Н.,
ВЭИ — ФИЛИАЛ
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»

В.П. ИВАНОВ,
ВЭИ — ФИЛИАЛ
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»

В.А. СИДОРОВ,
К.Т.Н.,
ВЭИ — ФИЛИАЛ
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»

Т. С. СМИРНОВА,
ВЭИ — ФИЛИАЛ
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»

**Генераторные выключатели предназначены для коммутации электрических цепей при нормальных и аварийных режимах в сетях переменного тока. Они необходимы для:**

- **повышения надежности электроснабжения собственных нужд (СН) энергоблока, и в первую очередь АЭС и ТЭЦ;**
- **отключения коротких замыканий, если они возникают на генераторном напряжении;**
- **снижения объема повреждения и предотвращения развития аварии в случае возникновения короткого замыкания в обмотке низшего напряжения трансформатора блока;**
- **повышения гибкости в управлении энергоблоком.**

***Ключевые слова:*** гибридный генераторный выключатель; исследование; элементная база; вакуумная дугогасительная камера; разрядник вакуумный управляемый.

Вакуумный генераторный выключатель типа НВ 3-80 на напряжение 24 кВ, ток отключения 80 кА



## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследования и разработки генераторных выключателей (ГВ) в течение последних десятков лет проводятся как в России, так и за рубежом. Высокие массогабаритные и стоимостные показатели, а также жесткие требования к надежности работы, коммутационному ресурсу этих выключателей заставляют вести поиски технических решений в области гибридных генераторных выключателей (ГГВ). Недостатки ГВ традиционных конструкций обусловлены тем, что к вакуумной или элегазовой камере одновременно предъявляются требования по малому сопротивлению в замкнутом состоянии и высокой пропускной способности по току, после отключения которого нагретая камера должна выдержать восстанавливающееся высокое напряжение. Кроме того, из-за высокой стоимости электрогенераторов камера и выключатель, несмотря на низкую вероятность события, должны отключить ток близкого трехфазного короткого замыкания (КЗ), а также предотвратить включение на близкое трехфазное КЗ. Отключение указанного КЗ сопровождается наличием апериодической составляющей, которая тем больше по амплитуде и длительности, чем ближе к выключателю место КЗ. При этом следует иметь в виду, что указанные режимы приводят к предельным воздействиям по току и напряжению на весьма дорогие и играющие важную роль электрогенераторы (ЭГ), имеющие относительно низкую электрическую прочность изоляции, а также ограниченную динамическую стойкость.

Решение задачи состоит в разделении функций в ГГВ между пропусканием нормального тока через главные контакты (ГК) с малым сопротивлением (десятки микроом) и малыми потерями на нагрев, а затем переводом тока на холодную камеру, которая должна выдержать восстанавливающееся напряжение, желательно при некотором ограничении отключаемого тока КЗ и, если возникнет предельный режим близкого трехфазного КЗ, перевести номинальный ток отключения на дополнительное устройство в виде тиристорного коммутатора (ТК) или управляемого вакуумного разрядника (РВУ) с высокой пропускной способностью, которые могут быть заперты при ближайшем переходе тока через нуль. Если перевод тока из цепи ГК на замкнутую камеру с малым сопротивлением не является проблемой, то последующий перевод тока на ТК или РВУ представляет определенную проблему, осложненную наличием апериодической составляющей тока. Необходимым условием также является использование пофазного управляемого привода, который позволяет первым отключать фазу с минимальной апериодической составляющей тока КЗ для смягчения требований к выключателю и остальному оборудованию.

Целью статьи является анализ предпосылок создания ГГВ, проблем в части традиционных ГВ, методик и нормирования ресурса выключателей в стандартах РФ и МЭК, описание возможных вариантов реализации ГГВ.

В соответствии с техническим заданием предполагается разработать макет ГГВ на номинальное напряжение 24 кВ (наибольшее рабочее напряжение 30 кВ), номинальный ток 37 500 А, ток отключения 350 кА.

### ПРИМЕР ИМИТАЦИИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ТОКА КЗ ГРУ НВ3-80 (SIEMENS) ПРИ НАЛИЧИИ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ [2]

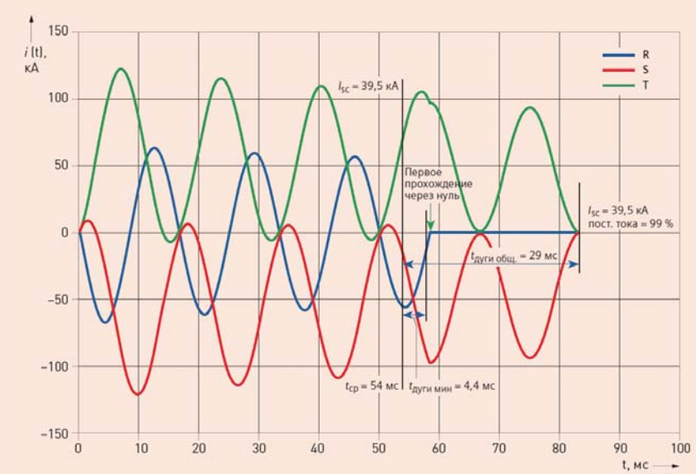



Рис. 1

# ПРОБЛЕМЫ ТРАДИЦИОННЫХ ГВ

ГВ являются одним из важнейших элементов различных типов электростанций, которые должны обеспечить защиту самых дорогих и важных единиц техники, таких как ЭГ. Типичный диапазон рабочих напряжений ГВ составляет 10,5; 15,75; 24 кВ (предельный — 31,5 кВ). Типичный диапазон рабочих токов равен 3, 5, 10 кА (предельный — 50 кА). Отключаемый ток трехфазного КЗ составляет 40, 50, 63, 80 кА. Пиковый ток включения на трехфазное КЗ может достигать 170–220 кА. Содержание апериодической составляющей в токе близкого КЗ достигает, как правило, 66 %, а иногда и 100 %. Высокие требования к надежности таких выключателей — 10 тыс. нормальных коммутаций и до 30 отключений токов КЗ, обусловливают необходимость очень высокой надежности комплектующих изделий. Если раньше в качестве ГВ использовались масляные выключатели, то в последние годы применяются элегазовые или вакуумные с пружинным приводом, которые производят разные фирмы. Высокая стоимость, важность и большие массогабаритные показатели ГВ зачастую заставляют энергетиков отказаться от их применения, например в блочных генераторах-трансформаторах, где выключатели устанавливают на стороне трансформатора высокого напряжения. Однако высокая стоимость ЭГ и ресурс до 30 лет обеспечивают высокую потребность в ГВ разных диапазонов. Так, фирма ABB с 1954 г. продала в 100 стран 8 тыс. элегазовых и вакуумных выключателей на номинальные токи 3–50 кА, токи отключения 50–300 кА напряжением 15–31,5 кВ [1]. 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 [2]. Близкие показатели имеют ГВ производства других зарубежных фирм (Alstom, Schnider Electric). Указанные разработки отличает комплексная поставка генераторных распределительных устройств (ГРУ), которые включают разъединители, заземлители, ограничители, токопроводы, измерительные трансформаторы тока и напряжения и другое оборудование. На рис. 1 в виде примера показана имитация отключения тока КЗ ГРУ НВЗ-80 (Siemens) при наличии апериодической составляющей для проверки отключающей способности [2].

Отечественные фирмы, такие как «Высоковольтный союз» и АО «ПО Электроаппарат», тоже выпускают вакуумные и элегазовые выключатели, однако в более узком диапазоне 10–20 кВ на номинальные токи от 4 до 10 кА, токи отключения от 63 до 90 кА, например вакуумный ВГГ-20-90/10000 У3 (вместо МГ-20) по ТУ3414-008-00213606-2018 [3, 4]. Продолжает выпускаться также маломасляный выключатель МГУ-20, который, однако, имеет худшие показатели сравнительно с вакуумным выключателем ВГГ-20. Если динамика отечественных и зарубежных выключателей близка и составляет по времени собственного отключения примерно 50 мс, а включения 80 мс, то комплектное исполнение отечественных ГВ полностью отсутствует, что, правда, существенно снижает цену ГВ. Например, ВГГ-10 содержит три полюса на раме с электромагнитным приводом, под которой размещаются две отключающие пружины, два масляных буфера и вал выключателя, где размещаются два механических указателя положения выключателя. Цена такого выключателя не превышает 10 млн руб., в то время как цена зарубежных ГВ в виде ГРУ достигает 4 млн долл. за счет комплексной поставки, обеспечения ручного и автоматического дистанционного режима, наличия дополнительных опций.

## ПОРЯДОК ЗАМЫКАНИЯ КОНТАКТОВ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ

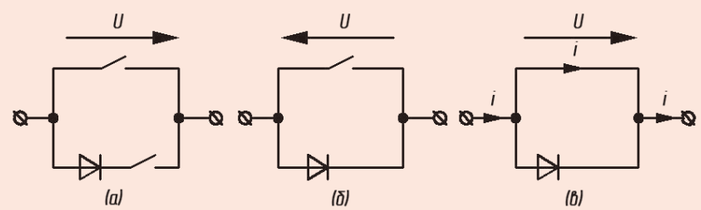
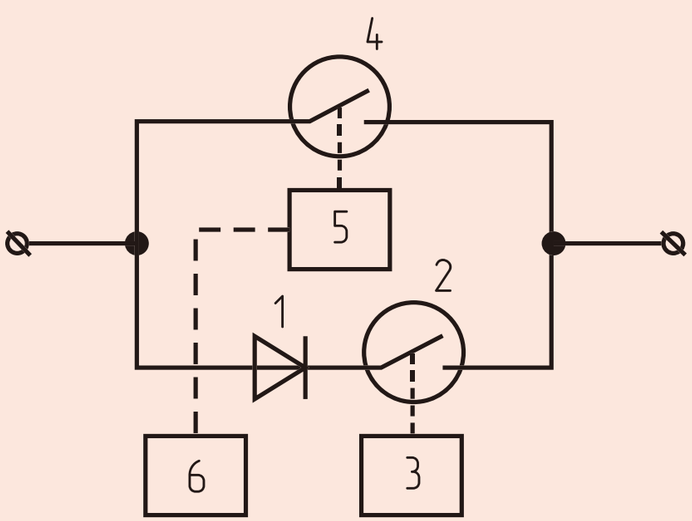



Рис. 3

## ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА КОММУТАЦИИ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ДИОДОМ




1 — полупроводниковый диод; 2 и 4 — ключи; 3, 5 — приводы ключей; 6 — система управления ключами

Рис. 2



## ПОРЯДОК РАЗМЫКАНИЯ КОНТАКТОВ ПРИ ВЫКЛЮЧЕНИИ (ДИОД ПРОВОДИТ ТОК)

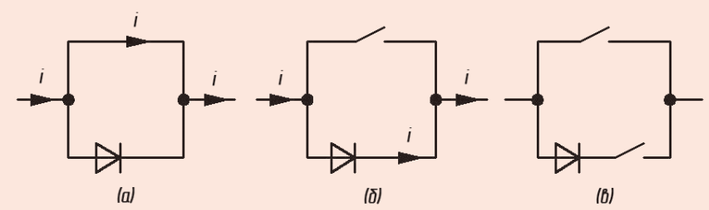



Рис. 4

# ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ГГВ

Наиболее привлекательны для применения в ГВ вакуумные выключатели, основой которых являются вакуумные дугогасительные камеры (ВДК). Наибольший вклад в их разработку внес ВЭИ. К началу 1990-х гг. в ВЭИ была разработана линейка ВДК на напряжения 12; 24; 40,5 кВ на номинальные токи от 1600 до 3150 А с токами отключения от 31,5 до 100 кА. Была разработана ВДК для генераторных выключателей 20 кВ на номинальный ток 1600 А с током отключения 100 кА. Разрывная мощность этой камеры составляла 2,4 ГВА, в то время как подобная мощность камеры Siemens была равна 0,95 ГВА (15 кВ, 63 кА). Камера КДВ-20-100/1600 имела центральную металлическую часть с диаметром, превышающим диаметр изоляторов, для лучшего теплоотвода и экранирования. Оба ввода соединялись с корпусом через сильфон, привод воздействовал на них, перемещая на 17 мм. Контакты были изготовлены из экспозиции хром–медь–вольфрам. ВДК имела контактную систему с продольным магнитным полем и должна была выпускаться на Минусинском заводе вакуумных выключателей, однако развал страны помешал освоению весьма перспективной разработки. Между тем наиболее перспективная ВДК фирмы Siemens напряжением 15 кВ с током отключения 63 кА и номинальным током 4000 А, имея тепловые радиаторы, стала основой современных выключателей 3АН374.

За последние годы в ВЭИ было проведено значительное число работ по созданию токоограничивающих устройств (ТОУ), вакуумных коммутаторов на основе РВУ и систем управления ими, элегазовых распределительных устройств КРУЭ 110–220 кВ и ГРУВ 110–220 кВ с вакуумными выключателями и др., которые отражены в многочисленных публикациях [см., напр., 5–7].

Наиболее значительные проблемы ГГВ связаны с токоограничением и переводом тока из камеры в ТК. По данным работы Д.Ф. Алферова и соавторов [8] нами создана принципиальная схема коммутации двух ключей при наличии полупроводникового диода (рис. 2). Порядок замыкания контактов показан на рис. 3, причем диод заперт обратным напряжением, что позволяет задержать на полпериода восстановление напряжения на ключе 2. Порядок размыкания контактов показан на рис. 4, в результате на ключе 2 восстанавливается обратная полуволна напряжения.

Приняв кусочно-линейную аппроксимацию вольт-амперной характе-

ристики дуги ВДК в качестве ключа, дифференциальное сопротивление диода $r_t$ = 2,3 мОм, пороговое напряжение $U_{to}$ = 5,3 В, межконтактное сопротивление ВДК $R_k$ = 80 мкОм, получим формулу (1) для времени перехода тока из ВДК в диод, равного $t_0$, и формулу (2) для обратного времени перехода из диода в ВДК:

$$t_0 = -L_{gu} / r_t \ln[1 - r_t I / (U_{vdk} - U_{t0})]; \quad (1)$$

$$t_1 = L_{gu} / [r_t + R_k] \ln[1 + (r_t + R_k) I / (U_{to} + r_t I)]. \quad (2)$$

Расчеты показали, что с ростом тока и напряжения указанные времена растут практически линейно. Например, при напряжении на дуге ВДК, равном 16 В, и токе 2500 А время коммутации с ВДК на диод составляет 160 мкс, а время обратной коммутации — 150 мкс (при индуктивности контура коммутации Lgu = 0,6 мкГн). Параболическая аппроксимация изменяет последний параметр до 200 мкс. Приведенные значения соответствуют последовательному включению четырех диодов Д143-500, а для четырех диодов ВЛ-200, благодаря меньшему прямому сопротивлению, указанные значения примерно на 20 мкс меньше.

В работе Д.Ф. Алферова и соавторов [9] исследовалась коммутация ВДК, шунтированного либо диодной сборкой из 2–4 диодов, либо запираемым тиристором на номинальное напряжение 1200 В, рабочий ток 600 А с блоком управления. Время перехода тока из ВДК в диоды растет с ростом тока от 1 до 3 кА в диапазоне от 10 до 200 мкс и при этом не зависит от скорости разведения контактов в диапазоне 1,7–3,2 м/с [8]. Рост числа диодов до четырех увеличивает длительность коммутации вдвое, до 400 мкс. Для коммутации с запираемым тиристором оптимальным является его включение перед разведением контактов ВДК. При этом характеристики коммутации совпадают с характеристиками диодного блока. Включение тиристора перед разведением контактов сопровождается высокочастотными (ВЧ) колебаниями и заметно увеличивает длительность коммутации.

Время коммутации оценивается как

$$t = -1 / b \ln[1 - b / a I], \quad (3)$$

где

$$a = [U_d - U_s + IR_1] / [L_1 + L_2];$$

$$b = [R_1 + R_2 + R_s] / [L_1 + L_2];$$

$[L_1 + L_2]$ — индуктивность контура коммутации;

$[R_1 + R_2]$ — сопротивление контура коммутации;

$U_d$ — напряжение на тиристоре при малом токе;

$R_s$ — объемное сопротивление тиристора.

В результате при малых токах время коммутации изменяется линейно:

$$t = [L_1 + L_2] I / [U_d - U_s], \quad (4)$$

т.е. определяется только суммарной индуктивностью контура коммутации и падением напряжения на дуге, которое заметно больше начального напряжения тиристора при малом токе. С увеличением тока время коммутации растет, приближаясь к предельному значению, равному a/b, которое граничит с бесконечным периодом коммутации.

Расчет переходного процесса при отключении тока тиристора определяется скоростью нарастания восстанавливающегося напряжения, которое удовлетворительно описывается зависимостью:

$$dU / dt = I_{ot} / C_3, \quad (5)$$

где $I_{ot}$ — отключаемый ток; $C_3$ — шунтирующая тиристор емкость.

Выполненная работа показала возможность создания выключателей постоянного тока, которые по коммутационным свойствам близки ГВ, что отражено в ТУ на выключатель постоянного тока на напряжение до 20 кВ [10].

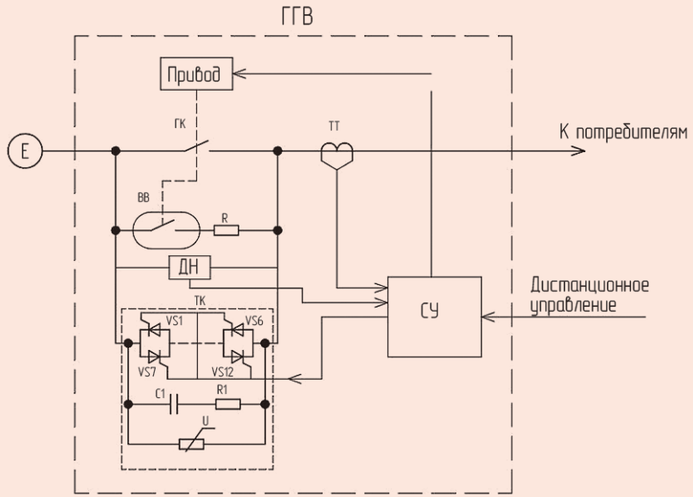
Применение ТК для шунтирования ВДК наряду с введением в него токоограничивающего сопротивления для снижения апериодической составляющей тока исследовалось в ряде работ [см., напр., 11], где было показано, что за счет применения ТОУ в составе ТК и ограничивающего резистора для сети 6/10 кВ с двигательной нагрузкой удается ограничить ток КЗ до приемлемого уровня с последующим отключением в момент перехода тока через нуль. Указанные ТОУ, преимущественно шунтового типа, были разработаны и применены в сетях 6/10 кВ и показали надежную работу и высокое быстродействие. На рис. 5 приведено изображение трехфазной сборки трехфазного коммутатора ТК 10 кВ, который вместе с системой управления может служить прототипом ТК для ГГВ путем увеличения числа последовательно-параллельно включенных тиристоров. Величина ограничивающего сопротивления будет определяться компромиссом между мощностью резистора и допустимым значением тока КЗ на выходе ЭГ.

## ТИРИСТОРНЫЙ СИЛОВОЙ ТРЕХФАЗНЫЙ КОММУТАТОР 10 КВ

Рис. 5



## ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА ГГВ С ТК




ТТ — трансформатор тока; ДН — датчик напряжения; С1 — демпфирующий конденсатор; R1 — демпфирующий резистор; U — ограничитель перенапряжения ОПН

Рис. 6

## МЕТОДИКА И НОРМИРОВАНИЕ РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В СТАНДАРТАХ РФ И МЭК [12]

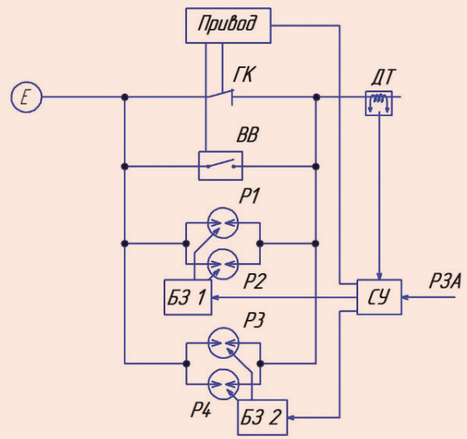
Действующий стандарт РФ на выключатели — ГОСТ Р 52565-2006 [13], в отличие от предыдущих стандартов, привязал допустимое число отключений токов КЗ к конкретным значениям тока. Для тока КЗ, равного 0,6 $I_{о.ном}$, минимальное число отключений должно быть более нормированного в 1,7 раза. Минимальное допустимое число включений должно быть не менее 50 % допустимого числа отключений. Допустимое число отключений (ед.) зависит от типа выключателей (газовый или вакуумный) и, соответственно, должно составлять для Io.ном 40 кА — 15, 20, для $I_{о.ном}$ 50 кА — 12, 18, для $I_{о.ном}$ 63 кА — 8, 10. При испытаниях на коммутационную способность проводится одна серия коммутационных испытаний с выполнением нормированного ГОСТ Р 52565 для коммутационного ресурса числа отключений и включений.

В зарубежных стандартах применяется другой подход. В стандарте МЭК 62271-100, выпущенном в 2001 г. [14], выключатели до 52 кВ по показателю коммутационного ресурса делятся на два класса — E1 и E2, которые определяются необходимостью обслуживания в течение срока службы, принятого МЭК, — 25 лет.

Для выключателей класса E2 предусматривается только минимальное обслуживание в виде смазки, замены и пополнения элегаза, чистки наружных поверхностей. Остальные выключатели, которые не попадают в класс E2, относятся к классу E1. В документе МЭК TR62271-310 [15] допустимые для выключателей числа операций отключения и включения обосновываются статистическими данными по работе выключателей на энергообъектах 13 ведущих стран. Данные показывают, что с вероятностью 90 % за 25 лет работы при токе менее 0,1 Io.ном происходит от 21 до 34 отключений для выключателей от 40 до 80 кА, при токе 0,3 Io.ном — от 25 до 24, при токе до 0,6 Io.ном — от 4 до 2. Число отключений при токе свыше 0,6 Io.ном вообще не зарегистрировано при общем числе отключений от 51 до 60 за 25 лет работы. Коммутационные испытания по МЭК делятся на износовые и контрольные. При износовых испытаниях обеспечивается требуемый уровень нагрузки и износ дугогасительных устройств, и их количество определяется по возможному числу отключений за 25 лет работы, которые составляют для токов 0,6 $I_{о.ном}$ от 10 до 5 для выключателей от 40 до 80 кА. Для больших токов отключения испытания на коммутационный ресурс не проводятся.

В контрольных испытаниях проверяется способность изношенных выключателей обеспечить коммутацию токов в отдельных наиболее слож-

## ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА ГГВ С ВАКУУМНЫМ КОММУТАТОРОМ Р




Е — генератор электрической энергии; ГК — главные контакты; ВВ — вакуумный выключатель; Р — вакуумный управляемый разрядник; БЗ — блок запуска; ДТ — датчик тока; СУ — система управления ГГВ; РЗА — релейная защита и автоматика

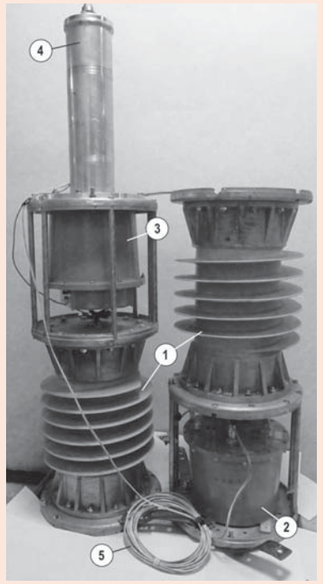
Рис. 7

ных для выключателей режимах по четыре отключения токов 0,1 $I_{о.ном}$, четыре отключения токов 0,6 $I_{о.ном}$ и отключений емкостного тока ненагруженной линии. Износовые и контрольные испытания выполняются после типовых (квалификационных) испытаний при номинальных значениях цепей управления и номинальном давлении газа.

Например, для выключателя на ток отключения 40 кА износовые испытания включают 9 отключений с током 4 кА и 10 отключений с током 24 кА. Контрольные испытания включают 4 отключения с током 4 кА, 4 отключения с током 0,75 × 24 кА = 18 кА, 24 цикла включение-отключение для выключателей класса С1 или 48 аналогичных циклов для выключателей класса С2, а для трехполюсных испытаний класса С2 — 24 цикла. Для сокращения объема испытаний по определению коммутационного ресурса могут использоваться результаты типовых испытаний. Износ выключателя при этом приводится к износу при отключении с током 0,6 $I_{о.ном}$ с учетом коэффициентов эквивалентного износа, которые изменяются от 0,01 для тока 0,1 $I_{о.ном}$ до 1,0 для тока 0,6 $I_{о.ном}$. Указанная методика испытаний позволяет обеспечить работоспособность выключателя без ремонта дугогасительного устройства в течение 25 лет с вероятностью 90 %.

Требования ГОСТ 52565 к числу коммутационных испытаний заметно превышают требования МЭК. Так, для выключателя 40 кА ГОСТ требует выполнить 26 отключений тока 24 кА, а МЭК — 10 отключений тока 24 кА и некоторое число отключений при меньших токах. Кроме того, ГОСТ требует проведения испытаний для всех выключателей, а МЭК только для выключателей классов Е2, не требующих обслуживания в течение 25 лет. Испытания зарубежных выключателей по методике ГОСТ 52565 показали, что выключатели разных фирм классов Е2 и Е1 выдерживают испытания в исходном виде или при небольших изменениях. Испытания на токи КЗ практически

## МАКЕТ НА ОСНОВЕ ВАКУУМНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАЗРЯДНИКОВ Р 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. 8



не влияют на частоту ремонтного обслуживания дугогасительных устройств из-за небольшого числа токов КЗ, превышающих 0,6 $I_{о.ном}$.

В результате ремонт выключателя обусловливается в первую очередь работоспособностью привода, который имеет высокую доступность узлов и небольшой объем эксплуатационных работ, что в ряде случаев позволяет упростить схемы подстанций с элегазовыми и вакуумными выключателями с отказом от резервных и обходных систем шин. После наработки коммутационного ресурса возможно осуществление замены выключателей на более перспективные гибридные выключатели новых поколений, расходы на монтаж и эксплуатацию которых ниже. Актуальной проблемой является замена отечественных ГВ на ГРУ с комплектной поставкой, а также разработка стандартов по ГВ.

## ГГВ С ТК

За основу ГГВ с ТК принята схема, состоящая из ГК, вакуумного выключателя (ВВ), токоограничивающего резистора (R) и трехфазного силового ТК, системы управления (СУ), привода. Однолинейная схема ГГВ показана на рис. 6. При этом привод должен иметь как ручное (не показано), так и дистанционное управление. ГГВ должен содержать также разъединители, заземлители и другие вспомогательные устройства, которые не показаны. Данная схема предложена НПО РИФ (Санкт-Петербург) [11] и была использована для анализа на первом этапе разработки ГГВ.

Предлагаемая схема при отключении работает следующим образом: в режиме нормального электроснабжения потребителей ГК находятся в замкнутом состоянии, и ток протекает через них, контакты ВВ находятся в замкнутом состоянии, ТК отключен.

При возникновении со стороны потребителей аварийного режима КЗ на выходе трансформатора тока ТТ возникает сигнал, соответствующий режиму КЗ, который поступает в СУ ГГВ. После этого на привод, который управляет ГК, поступает команда на отключение. Привод срабатывает и размыкает ГК. При этом происходит их размыкание, и ток переходит в цепь ВВ, контакты которого механически связаны с главными контактами и размыкаются через время, достаточное для полного восстановления прочности межконтактного промежутка ГК. На контактах ВВ при их размыкании некоторое время горит электрическая дуга. С помощью R происходят ограничение тока КЗ и падение напряжения. Величина сопротивления резистора рассчитывается исходя из падения напряжения на нем при протекании

## ОТКЛЮЧЕНИЕ ГГВ В ТРЕХ ФАЗАХ

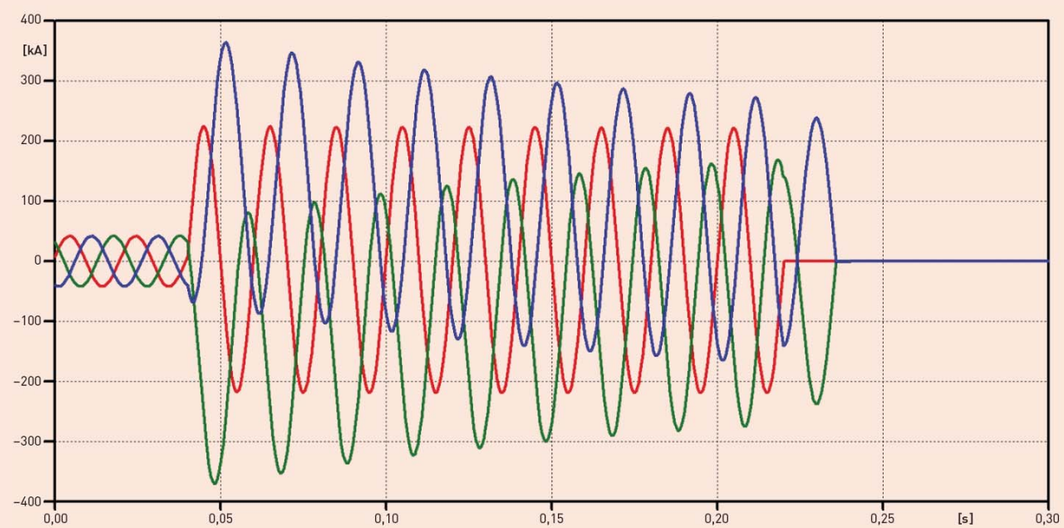



Рис. 9

## ОТКЛЮЧЕНИЕ ГГВ В ФАЗЕ В

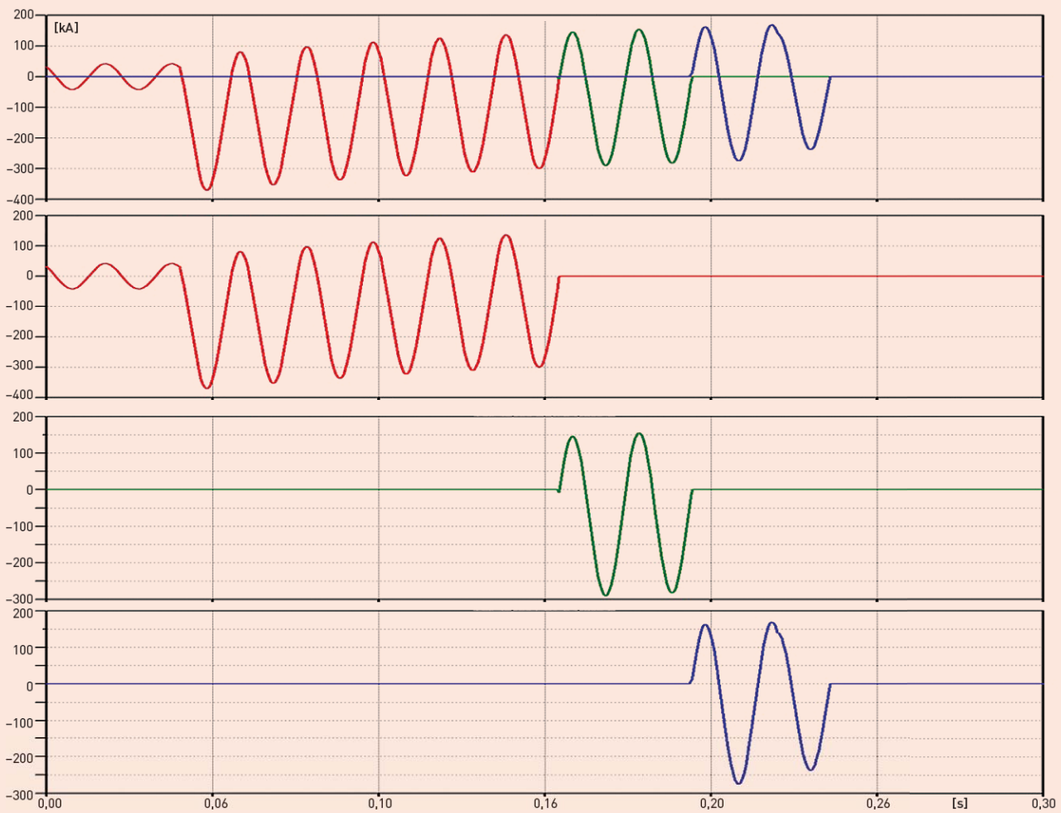



Рис. 10

тока, необходимого для открытия ТК. При этом падение напряжения на контактах ВВ измеряется датчиком напряжения, и сигнал от него передается в систему управления, которая формирует управляющий сигнал на открытие ТК, как только падение напряжения на контактах ВВ достигнет необходимой величины.

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 открытия ТК, что составляет доли миллисекунды, а коммутация тока осуществляется ТК при первом переходе тока через нуль (естественная коммутация) после полного отключения ГК и ВВ. Также надо отметить, что современные силовые тиристоры способны совершать огромное количество циклов коммутации токов КЗ при соблюдении определенных условий их работы, а именно при обеспечении охлаждения и ограничении скорости нарастания напряжения и нарастания тока. Все это приводит к увеличению ресурса ГГВ.

Для ограничения скорости нарастания напряжения на ТК предусмотрены конденсатор (C1) и резистор (R1), а для ограничения возможных перенапряжений — ограничитель перенапряжений (U), который подключен параллельно ТК.

Работа схемы при включении выполняется в обратном порядке: контакты ГК и ВВ разомкнуты, ТК отключен, от СУ на ТК дистанционно или с помощью ручного управления поступает сигнал включения, после набора тока включается ВВ с определенной задержкой, определяемой собственным временем включения ГК. В случае КЗ ТК можно блокировать релейной защитой (РЗА), что препятствует полному набору тока КЗ. В результате ЭГ и ГГВ в отличие от традиционных ГВ не испытывают пики включения в виде сотен килоампер, что обеспечивает их высокую надежность.



Преимущества рассматриваемого ГГВ таковы:

- в мире применяются только традиционные конструкции с большими воздействиями на выключатель и остальное оборудование, что снижает их ресурс, в то время как предлагаемая конструкция ограничивает воздействия, например, за счет предотвращения включения при близком КЗ;
- высокая пропускная способность определяется ресурсом ТК, который сопоставим с миллионом коммутаций номинального тока благодаря бездуговой коммутации ТК в нуле тока;
- модульная структура ГГВ позволяет реализовать модульную структуру ГРУ.

Недостатками применения ТК в составе ГГВ являются: высокая стоимость тиристоров; сложности деления тока по параллельным ветвям тиристоров; необходимость применения делительных цепочек при последовательном соединении тиристоров; разнотипность используемых компонентов в составе ГГВ.

В результате на втором этапе разработки была произведена замена ТК на вакуумные коммутаторы Р в виде РВУ, которые гораздо дешевле ТК, имеют более высокую пропускную способность и проверены на функционирование в составе быстродействующих токоограничителей 35 и 110 кВ.

В соответствии с техническим заданием предполагается реализовать макет ГГВ на номинальное напряжение 24 кВ (наибольшее рабочее напряжение 30 кВ), номинальный ток 37 500 А, номинальный ток отключения и ток термической стойкости 3 с — 180 кА, ток электродинамической стойкости до 480 кА. Собственное время отключения составляет 40 мс, полное время отключения — 60 мс.

Разработка предполагает использование воздушных или элегазовых ГК, способных перевести номинальный ток отключения на ВВ. При этом ВВ с большим допустимым током отключения и последовательно включенной индуктивностью в виде нескольких витков токовой шины должна обеспечить перевод тока КЗ в РВУ.

## ГГВ С ВАКУУМНЫМ КОММУТАТОРОМ

На втором этапе реализуется макет ГГВ с вакуумным коммутатором Р на основе РВУ-57. Однолинейная схема ГГВ приведена на рис. 7 и отличается от схемы на рис. 6 наличием сдвоенного комплекта разрядников РВУ [6]. Прототипом ВВ по-прежнему является ВДК [5]. Ожидается, что меньшая стоимость и большая пропускная способность Р по сравнению с ТК обеспечат пре-

## ВКЛЮЧЕНИЕ ГГВ

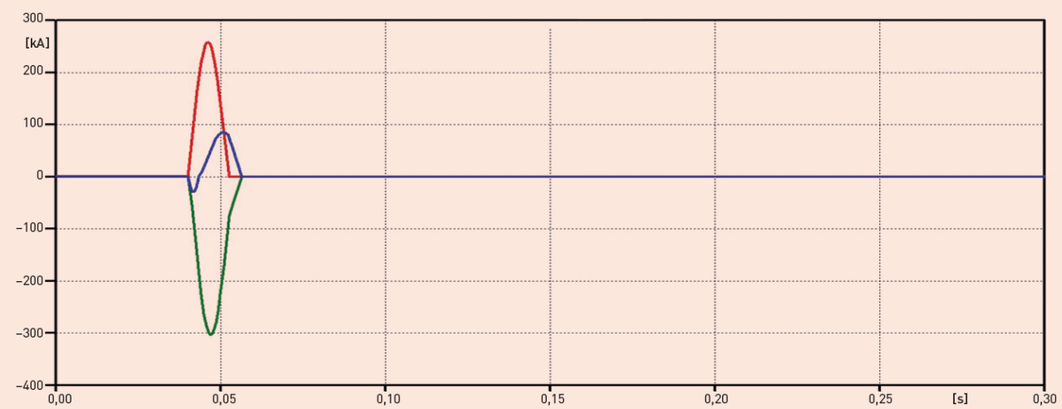



Рис. 11

имущества применения новой схемы (см. рис. 7), которая также позволяет решить проблему деления токов между ветвями тиристоров.

На рис. 8 показан макет, созданный на основе вакуумных управляемых разрядников Р и блоков запуска (БЗ), показанных на рис. 7, который прошел апробацию в составе высоковольтного быстродействующего коммутатора 35 и 110 кВ.

С помощью математической модели синхронного турбогенератора ТВВ-1200 4У3 напряжением 24 кВ с блочным трансформатором ОДЦ-533000/750 (330)-У1 были выполнены исследования отключения ГГВ, приведенные на рис. 9 [16]. Амплитуда ударного тока достигает 370 кА, при аналитическом расчете без затухания периодической составляющей — 390 кА, а с учетом затухания — 330 кА. Спустя шесть периодов частоты сети РЗА дает сигнал на отключение красной фазы, в которой отсутствует апериодическая составляющая тока КЗ, а спустя примерно период отключаются в момент перехода тока через нуль обе оставшиеся фазы (см. рис. 9).

Более наглядно процесс отключения тока КЗ показан на рис. 10 для фазы В с наибольшей апериодической составляющей. В исходном состоянии номинальный ток амплитудой 47 кА протекает через ГК (показано красным цветом). Спустя шесть периодов включается ВВ непосредственно перед отключением ГК, и ток переходит на холодные контакты ВВ (показаны зеленым цветом). Спустя два периода подается сигнал на включение разрядников Р, и ток амплитудой до 300 кА переходит в цепь указанных разрядников благодаря падению напряжения на дуге ВВ примерно 200 В (кривая синего цвета). После снятия импульса с БЗ происходит запирание Р и отключение ГГВ.

На рис. 11 показана попытка включения ГГВ на трехфазное КЗ. При этом вначале включаются разрядники Р трех фаз, которые после достижения аварийного тока в 300 кА запираются при первом переходе тока через нуль, блокируя срабатывание ВВ и ГК. В результате убирается из числа расчетных режим включения на ток амплитудой до 800 кА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен анализ существующих зарубежных и отечественных ГВ и показано отсутствие разработок ЭГ с заданными параметрами (номинальный ток 37,5 кА и ток отключения 350 кА) для АЭС мощностью свыше 1000 МВт. Решение проблемы сводится либо к запараллеливанию выключателей и их удорожанию, либо к разработке гибридных конструкций, что представляется более перспективным для ЭГ мощностью свыше 1200 МВт. Также выполнен анализ стандартов для выключателей, который показал необходимость их усовершенствования. Проведен обзор ранее выполненных наработок по гибридизации линейных выключателей и показаны возможности создания ГГВ в виде трехступенчатых конструкций с параллельным соединением горячих главных контактов, холодных вакуумных выключателей или их сборок, а также ТК. Однако более предпочтительно применение вместо ТК вакуумных управляемых разрядников. Приведены структурные схемы указанных ГГВ, описаны алгоритмы их работы и приведены результаты математического моделирования режимов отключения и включения трехфазного КЗ. Выполненные исследования и разработки требуют проведения макетирования и отладки, а также испытаний комплектующих и опытных образцов ГГВ на испытательном стенде.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Элегазовые генераторные распределительные устройства HECS. URL: www.new.abb.com.
2. Генераторные распределительные устройства НВЗ-80 с автоматическими выключателями. Каталог НВЗ-80. URL: www/siemens.ru/lmv.
3. Генераторные выключатели. «Высоковольтный союз». URL: www.vsoyuz.com.
4. АО ВО «Электроаппарат». URL: www. ea.spb.ru/catalog/4/14/.
5. Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Перцев А.А. и др. Вакуумные дугогасительные камеры, разработанные Всесоюзным электротехническим институтом имени В.И. Ленина // Электротехника. 1991. № 12. С. 9–15.
6. Сидоров В.А., Домашенко Г.Д., Ахметгареев М.Р. и др. Высоковольтный быстродействующий коммутатор переменного тока на основе вакуумных управляемых разрядников // Электричество. 2018. № 4. С. 4–13.
7. Акинин А.А. и др. Ограничение токов короткого замыкания в электрических сетях 110–220 кВ // Энергоэксперт. 2013. № 1 (36). С. 34–38.
8. Алферов Д.Ф., Евсин Д.В., Иванов В.П. Изучение перехода тока между диодным блоком и вакуумной дугогасительной камерой // Труды IX-го симпозиума «Электротехника 2030». 2001. Доклад 5.16.
9. Алферов Д.Ф., Ермилов И.В., Иванов В.П. Высоковольтный сильноточный выключатель постоянного тока // Электричество. 2001. № 11. С. 14–19.
10. ТУ 16-674.068-86. Выключатель постоянного тока вакуумный типа ВПТВ-15-5/400.
11. Рубашев Г.Н., Аптекарь Д.И., Чиканков Д.В. и др. Тиристорное токоограничивающее устройство для сетей 6, 10 кВ переменного напряжения // Электротехника. 2002. № 1. С. 10–13.
12. Шлейфман И.Л. Нормирование коммутационного ресурса выключателей на напряжение 110 кВ и выше в стандартах РФ и стандартах МЭК // Энергоэксперт. 2015. № 2 (49). С. 36–39.
13. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.
14. IEC 62271-100. High-voltage switchgear and controller-Part 100; Alternating-current circuit-breakers.
15. IEC 62271-310. High-voltage switchgear and controller-Part 310; Electrical endurance testing for circuit-breakers above a rated voltage 52 kV.
16. ATP Rule Book 1992. P. 247.

- Программно-технический комплекс ССПИ ПС 110/35/10/6 кВ ARIS MT;
- Программно-технический комплекс АСУ ТП/ССПИ ПС 110/35/10/6 КВ ARIS MC (в том числе для создания систем коммерческого учета электроэнергии);
- Программно-технический комплекс ССПИ ПС 750/500/220/110 КВ, АСУ ТП 110/35 КВ ARIS MD.

**Программно-технические комплексы ССПИ и АСУ ТП серии ARIS:**

- разработаны в соответствии со стандартом МЭК 61850;
- прошли аттестационные испытания ПАО «Россети» и ПАО «ФСК ЕЭС»;
- обладают широкими возможностями интеграции;
- предназначены для многолетней работы в жестких условиях электромагнитных помех и в широком температурном диапазоне.

Подробная информация о реализованных проектах – на сайте **prosoftsystems.ru**

Инженерная компания ООО «Прософт–Системы»
620102, г. Екатеринбург, ул. Волгоградская, 194а
тел.: +7 (343) 3-565-111, факс: +7 (343) 3-100-106
info@prosoftsystems.ru
prosoftsystems.ru

реклама