

## Высоковольтный быстродействующий коммутатор переменного тока на основе вакуумных управляемых разрядников

СИДОРОВ В.А., ДОМАШЕНКО Г.Д., АХМЕТГАРЕЕВ М.Р., ЩЕРБАКОВ Ю.В.

*Представлены результаты испытаний высоковольтного коммутационного устройства, предназначенного для коммутации цепей переменного тока. Особенностью данного устройства является наличие в нём силовых коммутирующих элементов на основе быстродействующих управляемых вакуумных разрядников (РВУ), а также интеллектуального ядра на основе микроконтроллеров, которое управляет устройством в режиме реального времени. На примере высоковольтного быстродействующего коммутатора ВБК-35 на основе РВУ-61 подробно описан принцип действия, приведены результаты измерений и расчета отключающей способности и электрической прочности коммутатора.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** управляемый разрядник, высоковольтный коммутатор, отключающая способность, ток отключения, напряжение пробоя, электрическая прочность, длительность коммутации

Сильноточные вакуумные управляемые разрядники со стержневой электродной системой типа РВУ-47 и РВУ-43 успешно применяются для коммутации емкостных накопителей энергии в электрофизических и технологических установках [1–3]. Это связано с тем, что они просты и удобны в эксплуатации, а также с их высокой надёжностью, обусловленной стойкостью к перегрузкам как по току, так и по напряжению.

В последние годы разработаны более мощные разрядники этого типа: РВУ-43-1 [4], РВУ-61. Вакуумные управляемые разрядники по сравнению, например, с газонаполненными имеют следующие важные преимущества:

низкий порог напряжения включения при поджиге на катоде (100 В);

широкий диапазон рабочих напряжений 0,1÷50 кВ, при этом время включения практически не изменяется ( $1\pm 0,1$ ) мкс;

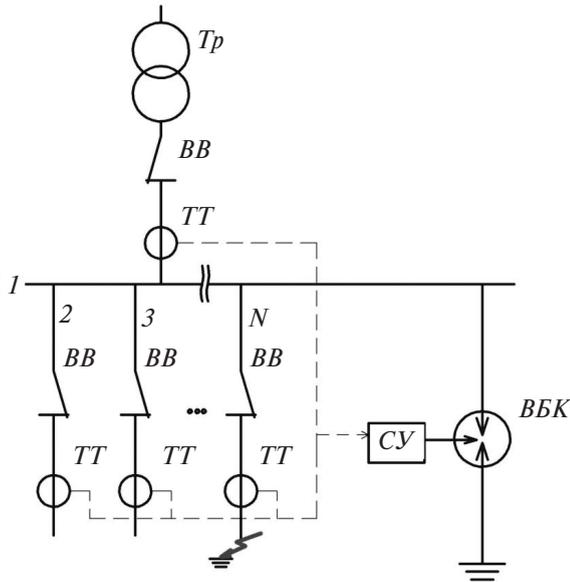
РВУ обладают вентильными свойствами, т.е. отключают переменный ток при его переходе через нуль.

Перечисленные свойства РВУ открывают возможность создавать на их базе быстродействующие коммутационные устройства с уникальными характеристиками. Например, высоковольтный коммутатор на основе РВУ способен, в отличие от сетевых выключателей, включать переменный ток за время менее 0,5 мс и в заданный момент времени быстро, за время, меньшее полупериода тока, отключать его. Такой коммутатор может надёжно включаться при пониженном напряжении в сети – очень важное свойство при создании защитных устройств, шунтирующих место возникновения короткого замыкания (КЗ).

Одной из возможных областей применения такого быстродействующего коммутатора может быть использование его в качестве замыкателя–отключателя для защиты оборудования от воздействия сверхтоков КЗ [5 – 7]. Необходимость в таких устройствах связана с тем, что из-за роста мощностей энергосистем максимальные токи КЗ становятся больше отключающей способности стоящих в линиях выключателей. Применение ВБК позволит продолжить эксплуатацию этих выключателей.

На рис. 1 представлена схема подключения ВБК к шинам распределительной подстанции; ВБК подключается к сборной шине фазы распределительной подстанции  $I$ , тем самым защищая все отходящие от сборной шины  $I$  линии ( $2, 3, N$ ). При возникновении КЗ фазы в какой-либо линии  $N$  по значению тока, превышающему отключающую способность стоящего в этой линии высоковольтного выключателя, ВБК по команде замыкает шину  $I$  на «землю» и тем самым берёт на себя часть тока КЗ. Шунтирование повреждённой линии облегчает условия отключения тока выключателем, стоящим в данной линии, так как уменьшает значение тока КЗ через выключатель (до 50%) и значительно снижает значение восстанавливающегося напряжения на выключателе. После отключения выключателем повреждённой линии подаётся команда на отключение ВБК. Время включения ВБК не превышает 0,1 мс, время отключения – не более 10 мс (полупериод тока), что значительно меньше времени включения и отключения высоковольтных выключателей.

Применение такого метода защиты именно от максимальных токов КЗ не приводит к значительному росту суммарного тока КЗ через шину под-



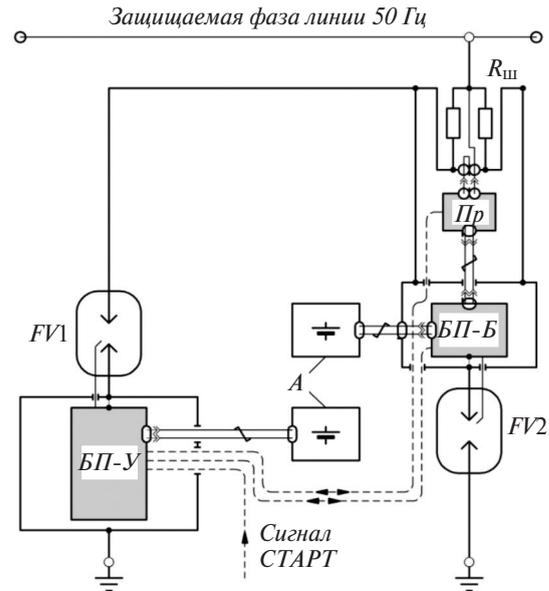
**Рис. 1.** Принципиальная схема включения ВБК для защиты от токов КЗ: *Тр* – высоковольтный трансформатор; *ВВ* – высоковольтные выключатели; *ТТ* – трансформаторы тока; *СУ* – система управления *ВБК*; *1* – сборная шина подстанции; *2–4* – отходящие линии

станции. Оценки, проведённые для высоковольтных сетей 35 кВ и 110 кВ показывают, что при возникновении максимальных токов КЗ дополнительное замыкание сборной шины на «землю» увеличивает суммарный ток КЗ через шину не более чем на 5%.

Проведено исследование отключающей способности и электрической прочности быстродействующего коммутатора, состоящего из двух встречно-параллельно соединённых вакуумных управляемых разрядников РВУ-61. Рассчитана отключающая способность коммутатора в зависимости от длительности коммутации переменного тока при различных уровнях восстанавливающегося напряжения.

**Схема и конструкция ВБК.** На рис. 2 представлена структурно-функциональная схема одной ячейки («фазы») коммутатора ВБК. Она состоит из двух соединённых встречно-параллельно ветвей, каждая из которых содержит разрядник и запускающий его блок поджига. Одна ветвь (*БП-У*, *FV1*) коммутирует положительную полуволну тока, а другая (*БП-Б*, *FV2*) – отрицательную. В соответствии с функциональным назначением блок поджига *БП-У* называется «управляющим» (ведущим), а блок *БП-Б* – «базовым» (ведомым). Управляющий блок, помимо запуска соединённого с ним РВУ, подаёт команды управления на базовый блок.

В цепь полного тока полюса ВБК включён шунт *R<sub>ш</sub>*. Сигнал с шунта поступает на блок преобразования *Пр*. Блок *БП-У* соединён с блоками *БП-Б* и *Пр* дуплексными оптоволоконными линиями связи. Это позволяет с максимальной помехоза-



**Рис. 2.** Структурно-функциональная схема одного полюса ВБК-35; *FV1*, *FV2* – управляемые вакуумные разрядники; *БП-У* – управляющий блок поджига; *БП-Б* – базовый блок поджига; *R<sub>ш</sub>* – датчик тока (шунт); *Пр* – блок преобразования; *А* – аккумуляторы; - - - – оптические дуплексные линии связи

щищённостью осуществлять обмен управляющей информацией между частями ВБК, находящимися под разным быстроменяющимся потенциалом. Питание блоков поджига осуществляется от аккумуляторных батарей *А* либо от защищаемой линии с помощью ёмкостного делителя (на рис. 2 не показан). Блок преобразования также имеет два варианта питания: от аккумулятора или от отдельного выхода модуля питания близлежащего блока поджига *БП-Б*.

На рис. 3 представлен коммутатор ВБК-35. Каждая ветвь ВБК выполнена в виде отдельного коммутационного модуля. Модули ВБК идентичны по форме, размерам и основным характеристикам работы в части коммутации тока и электрической прочности.

Коммутационный модуль содержит вакуумный управляемый разрядник, размещённый в полимерном изоляторе, и блок поджига, помещённый в алюминиевый цилиндр, который одновременно является экраном для блока поджига и токопроводящим элементом. Полимерный изолятор представляет собой сборную конструкцию, состоящую из стеклопластиковой трубы, защитной оболочки и фланцев. Для обеспечения необходимой внешней и внутренней электрической прочности защитная оболочка изолятора изготавливается из кремнеорганической резины и имеет ребристую поверхность, а полость изолятора заполняется изоляционным гелем, который имеет хорошую адгезию как с внешней поверхностью РВУ, так и с внутренней поверхностью изолятора и высокую электропрочность. Соединение РВУ с блоком поджига осуще-

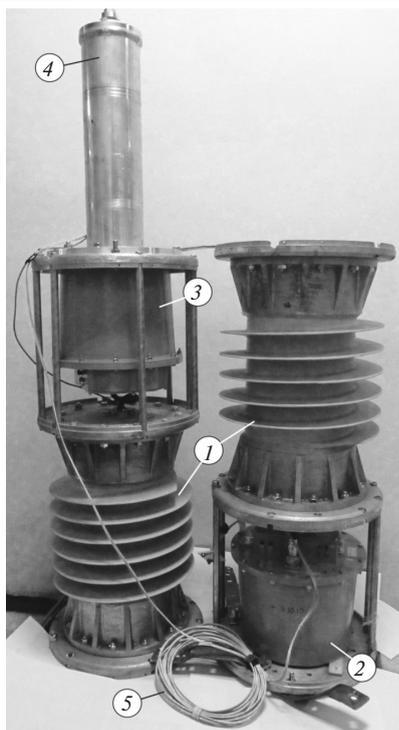


Рис. 3. Макет образца ВБК-35: 1 – коммутационные модели с разрядниками РВУ-61; 2 – управляющий блок поджига; 3 – базовый блок поджига; 4 – полый токопровод с шунтом и блоком преобразования внутри; 5 – оптические линии связи (цилиндрические экраны, закрывающие блоки поджига, не показаны)

ствляется с помощью высоковольтного коаксиального кабеля, проходящего сквозь фланец изолятора через гермоввод.

Модульная конструкция позволяет создавать различные варианты ВБК. Последовательное соединение модулей позволяет повысить класс напряжения защищаемой сети до 110–220 кВ, например, для защиты трёхфазной сети 110 кВ от токов КЗ достаточно трех ячеек, аналогичных ВБК-35.

**Составные части ВБК.** Управляемые вакуумные разрядники. В описываемом ВБК используются РВУ-61, которые представляют собой трехэлектродный герметизированный прибор с давлением остаточного газа, не превышающим  $10^{-4}$  Па. Электродная система разрядника из композиции Cu-Cr выполнена в виде шести стержней чередующейся полярности, размещенных по окружности. Узел поджига, расположенный в центре основания катода, инициирует запуск РВУ за время не более 2 мкс. Сильноточная вакуумная дуга, в основном, горит в межстержневых промежутках разрядника. Магнитное поле, формируемое собственным током дуги, способствует развитию ее многоканальной моды. Это свойство стержневой электродной системы обеспечивает низкое падение напряжения на дуге разряда и вследствие этого возможность многократной коммутации больших токов.

### Характеристики РВУ-61:

межэлектродное расстояние	10 мм;
рабочее напряжение	0,20–60,0 кВ;
рабочий ток	10–500 кА;
максимальное количество электричества в импульсе	200 Кл

Блоки поджига – основа системы управления ВБК. Для ВБК были разработаны специальные блоки поджига, обеспечивающие надёжный запуск РВУ при низких напряжениях анод–катод. Основные технические характеристики блоков:

Параметр	Значение
Импульсное выходное напряжение (при отсутствии нагрузки, не менее)	6 кВ
Амплитуда тока поджигающего импульса (не менее)	350 А
Максимальное число импульсов в пачке	10
Тип канала управления	оптический в диапазоне 1310 нм
Диапазон температур внешней среды	от –45 до +40 °С

Блоки поджига собраны в литых алюминиевых корпусах цилиндрической формы. Габаритные размеры блока: диаметр 305 мм, высота 275 мм.

Как отмечалось ранее, ВБК содержит блоки поджига двух типов: управляющий и базовый, имеющие различное функциональное назначение.

На рис. 4 приведена упрощённая принципиальная схема базового блока поджига. Основными элементами, формирующими выходные импульсы блока, являются силовой IGBT-ключ  $VT1$  и импульсный повышающий трансформатор  $T1$ . При открывании IGBT-ключа через накопительный конденсатор  $C1$  и трансформатор  $T1$  начинает заряжаться промежуточный конденсатор  $C2$ . Магнитный ключ  $T2$  подключает конденсатор  $C2$  к нагрузке с задержкой 10–15 мкс, позволяя  $C2$  за это время зарядиться до максимального напряжения 6–7 кВ. Диод  $VD2$  превращает форму выходного импульса тока из колебательной в апериодическую.

При коммутации колебательных токов блок поджига должен вырабатывать серию выходных импульсов с интервалом, равным периоду тока. Поэтому ёмкостный накопитель  $C1$  рассчитан так, что запасённой в нём энергии достаточно для формирования не менее десяти подряд идущих импульсов запуска. После завершения серии происходит заряд накопителя  $C1$  от модуля питания и блок возвращается в исходное состояние.

Кроме высоковольтной части, блок содержит два электронных узла, выполненные в виде отдельных печатных плат – модуля питания и модуля контроллера.

Модуль питания содержит встроенную батарею ионисторов ёмкостью около 2,5 Ф. Это позволяет блоку поджига в течение нескольких минут сохра-

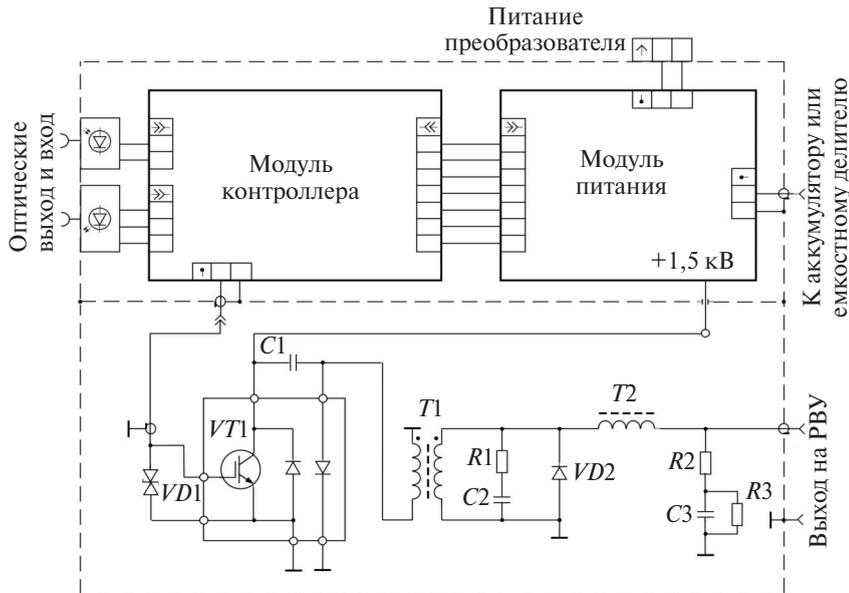


Рис. 4. Схема блока поджига

нять работоспособность при исчезновении внешнего питания в аварийных ситуациях.

Модуль контроллера осуществляет обмен информацией по дуплексной оптической линии с контроллером управляющего блока, а также по командам от управляющего контроллера вырабатывает импульсы включения IGBT. В модуле использован программируемый микроконтроллер ATmega8-16AU производства Atmel.

Управляющий блок поджига выполнен по идентичной схеме, за исключением модуля контроллера. В нём используется программируемый микроконтроллер ATmega16-16AI. Контроллер управляющего блока содержит пять оптических пар «вход/выход» и при добавлении в линии связи пассивных оптических разветвителей способен управлять двумя группами базовых блоков по восемь блоков в каждой из них. Это даёт возможность модификации коммутатора до более сложного, чем ВБК-35, варианта.

**Датчик тока (шунт) и блок преобразования.** Получение информации о коммутируемом токе осуществляется с помощью быстродействующего токового шунта  $R_{ш}$  и блока преобразования сигнала шунта  $Пр$  (см. рис. 2). В ВБК был использован коаксиальный теплостойкий шунт с дифференциальным выходом [8]. Конструктивно шунт вместе с блоком преобразования размещается в токоведущем цилиндре, исполняющем также функции экрана, к которому непосредственно подключается шина от защищаемой линии присоединения.

Блок преобразования предназначен для подавления синфазной помехи в сигнале шунта, обнаружения моментов перехода тока ВБК через нуль и определения его полярности. Блок содержит встроенный микроконтроллер ATmega8-16AU. В резуль-

тате его работы аналоговое напряжение с шунта, пропорциональное суммарному току ВБК, преобразуется в «псевдодифровой» трёхуровневый оптический сигнал (эпюра  $P_{ш}$  на рис. 5), передаваемый далее по линии связи к управляющему блоку. Более детально алгоритм этого преобразования описан в следующем разделе.

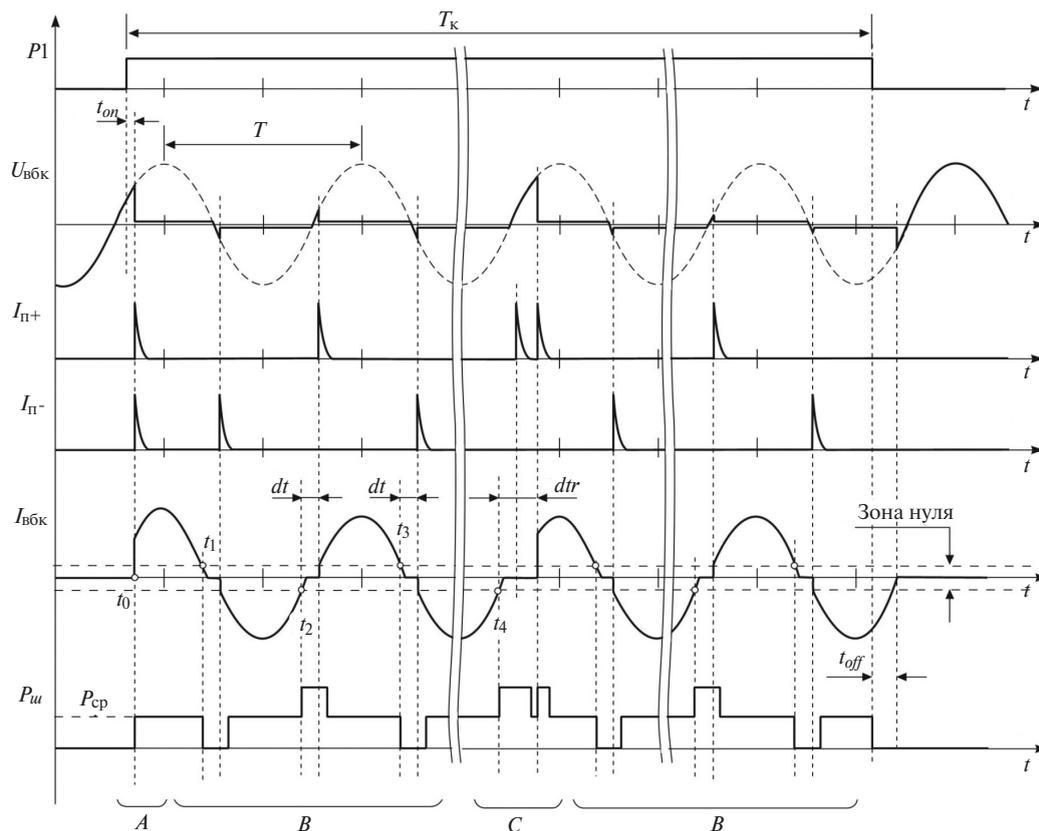
**Алгоритм работы, программное обеспечение ВБК.** На рис. 5 показаны типовые эпюры сигналов в ВБК. Система работает следующим образом. По переднему фронту оптического сигнала запуска  $СТАРТ$  блок поджига  $БП-У$  (см. рис. 2) начинает вырабатывать импульсы поджига  $I_{п+}$ , которые включают «свой» разрядник  $FV1$ , а также по оптической

линии подаёт управляющий сигнал на блок поджига  $БП-Б$ , вызывая генерацию импульсов поджига  $I_{п-}$ , включающих разрядник  $FV2$ .

Поскольку полярность коммутируемого тока в начале процесса не известна, то в первый момент  $t_0$  включаются все разрядники коммутатора (начало работы — «нулевой» поджиг на рис. 5). Задержка  $t_{он}$  «нулевого» поджига относительно фронта сигнала  $СТАРТ$  не превышает 20 мкс. Затем ветви ВБК работают поочередно («штатный» режим на рис. 5): для пропускания положительных полуволн тока включается разрядник «положительной» ветви  $FV1$ , отрицательных — разрядник «отрицательной» ветви  $FV2$ .

Для правильности переключения ветвей ВБК используется сигнал  $P_{ш}$  с блока  $Пр$ . В момент  $t_0$  сигнал  $P_{ш}$  выводится на средний уровень оптической мощности. Схемными регулировками блока выделяется «зона нуля», в которой ток ВБК ( $I_{ВБК}$ ) не превышает определённого уровня (в данной реализации коммутатора около  $\pm 60$  А, т.е. примерно 0,1% максимума). При входе тока в «зону нуля» блок  $Пр$  формирует перепад сигнала  $P_{ш}$  длительностью несколько десятков микросекунд. Если вход в «зону нуля» происходит сверху (моменты  $t_1$ ,  $t_3$  и т.д. на рис. 5), то перепад в  $P_{ш}$  — отрицательный, если снизу (моменты  $t_2$ ,  $t_4$  и т.д. на рис. 5), то — положительный. Таким образом, формируется трёхуровневый оптический сигнал, несущий информацию о текущей полярности тока и моментах его перехода через нуль.

Блок  $БП-У$  анализирует сигнал  $P_{ш}$  и с определённой задержкой  $dt$  относительно времён  $t_n$ , генерирует импульс поджига  $I_{п+}$  или, подавая команду на блок  $БП-Б$ , инициирует генерацию им импульса поджига  $I_{п-}$ . Задержка  $dt$  задаётся про-



**Рис. 5.** Эпюры сигналов в ВБК:  $P1$  – внешний оптический импульс запуска (сигнал СТАРТ, длительностью  $T_k$ ;  $U_{ВБК}$  – напряжение на ВБК с периодом  $T$ ;  $I_{П+}$ ,  $I_{П-}$  – выходные токовые импульсы поджига блоков БП-У и БП-Б;  $I_{ВБК}$  – ток через ВБК;  $P_{И}$  – выходной оптический сигнал блока преобразования;  $t_{on}$  – задержка включения ВБК;  $t_{off}$  – задержка выключения ВБК; А – начало работы ВБК («нулевой» поджиг); В – работа ВБК в штатном режиме; С – работа ВБК при несрабатывании одного из разрядников («повторный» поджиг). *Примечание:* масштабы времени и амплитуд показаны условно

граммно, её значение должно быть достаточным для гарантированной к моменту поджига смены полярности напряжения на ВБК.

Для случая, когда по какой-либо причине один из разрядников не запустился, в алгоритме предусмотрен режим «повторного» поджига. В этом режиме на несработавший разрядник с некоторой задержкой  $dtr$  подаётся повторный импульс поджига. Пропуск поджига обнаруживается программой блока преобразования. Задержка  $dtr$  также задаётся программно и подбирается в зависимости от конкретных условий эксплуатации ВБК.

Ток в течение всего времени присутствия оптического сигнала СТАРТ ВБК пропускает ток. После окончания сигнала СТАРТ  $I_{ВБК}$  прерывается в первый же его переход через нуль.

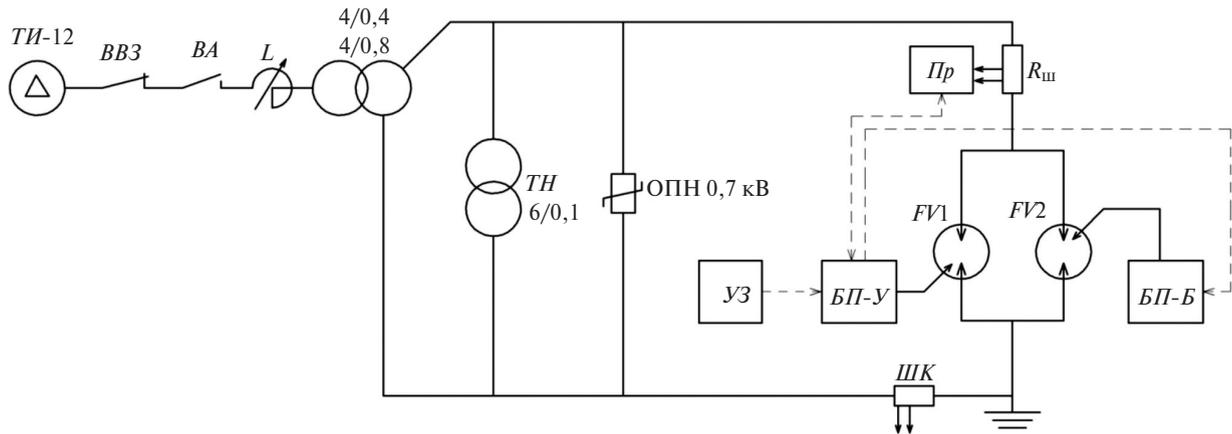
Настройки программного обеспечения (ПО) и быстродействие аппаратной части позволяют ВБК коммутировать колебательные токи частотой до 1 кГц.

Программное обеспечение всех контроллеров в составе системы написано на языке C в оболочке CodeVision AVR. В схемных решениях ВБК заложена возможность существенного расширения программной составляющей, в т.ч. диагностики каче-

ства оптических линий связи, уровня питающих напряжений в блоках, сигнализации о неисправности и т.п.

**Экспериментальное исследование характеристик ВБК. Исследование отключающей способности.** Исследование отключающей способности ВБК проводилось на испытательном стенде с генератором ударного тока промышленной частоты «ТИ-12», электрическая схема которого представлена на рис. 6. Отключающая способность разрядников проверялась методом постепенного повышения амплитуды пропускаемого тока. При положительном результате очередного испытания величина тока поднималась с шагом 5 кА (эфф.). Ток увеличивался в диапазоне от 8 до 43 кА (эфф.). Напряжение источника питания составляло 400 В. Всего было проведено 24 опыта. Длительность оптического сигнала запуска СТАРТ (т.е. время пропуска тока коммутатором) равна 200 мс. Это время заведомо превышает полное время отключения существующих высоковольтных сетевых выключателей.

В процессе испытаний с помощью шунта измерялся ток ВБК, а также с помощью измерительного трансформатора — напряжение на ВБК. Электрические сигналы регистрировались на ПК.



**Рис. 6.** Схема испытательного стенда: *FV1* и *FV2* – испытываемые разрядники;  $R_{ш}$  – шунт ВБК; *УЗ* – устройство запуска ВБК (источник сигнала *СТАРТ*); *БП-У*, *БП-Б* – блоки поджига; *Пр* – блок преобразования; *ТИ-12* – генератор ударного тока; *ТН* – измерительный трансформатор; *ВВЗ* – защитный воздушный выключатель; *ВА* – включающий аппарат; *L* – регулируемый реактор; *ШК* – шунт измерительный

На рис. 7 представлены характерные осциллограммы управляющего импульса напряжения, тока через коммутатор и напряжения на коммутаторе. Полуволны тока положительной полярности коммутировались разрядником *FV1*, а отрицательной – разрядником *FV2* коммутатора. Из осциллограмм видно, что оба разрядника включались в моменты перехода тока через нуль при напряжении менее 200 В.

Коммутатор пропускал ток в течение заданного времени (200 мс) и после снятия сигнала запуска после 21 полупериода отключил ток значением 40 кА (эфф.).

В течение серии испытаний из 24 опытов каждый разрядник пропустил не менее 240 полупериодов тока амплитудой до 60 кА; ВБК продемонстрировал надёжное включение и отключение тока.

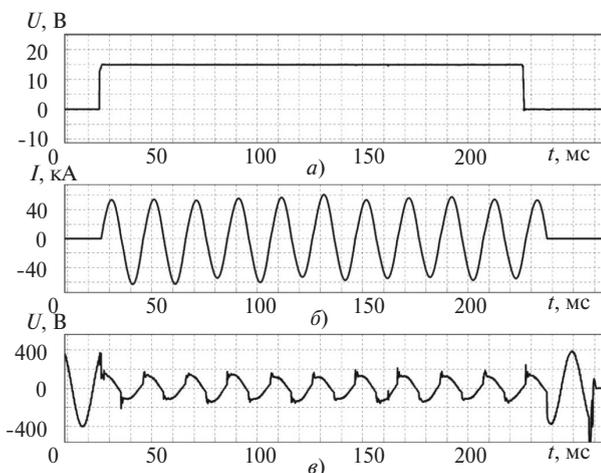
**Исследование электрической прочности.** Исследование проводилось на испытательном стенде, состоящем из высоковольтного трансформатора и колебательного контура с конденсаторной батареей ёмкостью 10 мФ. Включённый в колебательный

контур ВБК коммутировал ток, имеющий форму затухающей синусоиды с максимальной амплитудой 60 кА и длительностью полупериода около 0,5 мс. После коммутации тока выдерживалась пауза 3–5 мин и затем к ВБК прикладывалось напряжение промышленной частоты от испытательного трансформатора ИОМ 100/25, медленно нарастающее в течение 1 мин. Действующее значение напряжения пробоя ВБК измерялось киловольтметром С-100.

Напряжение пробоя коммутатора измерялось после каждой коммутации тока. Проводилось не менее 30 измерений напряжений пробоя. Подробно электрическая схема и методика измерений представлены в [4].

**Обсуждение результатов. Расчётные оценки характеристик ВБК.** Коммутация переменного тока промышленной частоты. Отключающая способность ВБК. По результатам эксперимента на стенде «ТИ-12» были определены вольт-амперные характеристики разрядников. Напряжение на разряднике измерялось в максимуме полуволны тока. Измерения показали, что напряжение на дуге изменяется от 30 до 70 В при росте амплитуды тока от 15 до 60 кА.

Далее приведена расчётная оценка отключающей способности коммутатора. При больших значениях (более 10 кА (эфф.)) и длительности (единицы миллисекунд и более) коммутируемого переменного тока неотключение вакуумным промежутком тока при переходе его через нуль может быть связано с нагревом поверхности анода, становящегося катодом, выше допустимой температуры  $T_{доп}$  [9, 10]. При температуре выше  $T_{доп}$  концентрация атомов испаряющегося металла в межэлектродном промежутке становится такой, что возможен пробой промежутка при приложении к нему переходного восстанавливающегося напряжения.



**Рис. 7.** Осциллограммы тока и напряжения на коммутаторе: *a* – управляющий импульс; *б* – ток через коммутатор; *в* – напряжение на коммутаторе

При анализе тепловых процессов на аноде можно использовать одномерное приближение, так как критерий Фурье много меньше единицы:

$$F_0 = \frac{\alpha t}{d^2} \ll 1, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности меди;  $d$  – поперечный размер теплового источника на рабочей поверхности анода;  $t$  – время нагрева, равное длительности протекания тока.

Предельная отключающая способность ВБК при отключении в заранее выбранный переход тока через нуль соответствует тому действующему значению тока, при котором температура рабочей поверхности анода в момент этого перехода через нуль равна допустимой температуре. Температуру рабочей поверхности анода при произвольной форме плотности теплового потока от времени можно рассчитать с помощью интеграла Дюамеля [10]:

$$T = T_0 + \int_0^{\tau} \frac{2\sqrt{\tau - tq}}{\sqrt{\pi\lambda c\rho}} dq, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура анода, принятая 300 К;  $\tau$  – время протекания тока;  $q$  – тепловой поток на поверхности анода;  $\lambda$ ,  $c$  и  $\rho$  – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала анода.

Тепловой поток через поверхность электрода определяется как отношение мощности к площади поверхности:

$$q = \frac{U_a i}{S/k}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь анода;  $k$  – коэффициент, учитывающий неоднородность заполнения анода дугой;  $U_a$  – эквивалентное прианодное падение напряжения;  $i$  – действующее значение тока; обычно при расчётах  $U_a = 20$  В [10–12].

Размер площади поверхности анода, занимаемой дугой, определяется распределением магнитного поля, воздействующего на дугу. Исследования поведения дуги в магнитном поле показали [11], что при значении индукции продольного по отношению к дуге магнитного поля не менее 2,5 мТл/кА форма дуги становится близкой к диффузной. Падение напряжения на такой дуге минимально по сравнению с другими формами, в связи с чем можно считать, что дуга занимает лишь область с оптимальным значением индукции. Расчёт магнитного поля в стержневой электродной системе РВУ-61 показал, что такая область составляет 80% площади  $S$  перекрытия анодного и катодного стержней.

Расчёт температуры нагрева рабочей поверхности анода по формуле (2) проводился в программной среде MathCad методом конечных разностей. На рис. 8 представлены графики роста температуры рабочей поверхности анода разрядников  $FV1$  и  $FV2$  (кривые 1 и 2) коммутатора от времени, соответствующие осциллограмме тока на рис. 7, т.е. пропусканию 11 полупериодов тока промышленной частоты эффективным значением 40 кА разрядником  $FV1$  и 10 полупериодов – разрядником  $FV2$ .

Учитывая, что время нарастания восстанавливающегося напряжения много меньше времени остывания анода, можно найти критические значения давления и температуры пара, при которых амплитуда восстанавливающегося напряжения превысит электрическую прочность промежутка. Оценим значение допустимой температуры нагрева рабочей поверхности анода разрядников для условий испытаний на стенде «ТИ-12». Минимум кривой Пашена для паров меди близок к амплитуде восстанавливающегося напряжения в проведённом эксперименте (400 В). Будем считать, что отказ РВУ происходит вблизи минимума кривой Пашена, т.е. при значении  $pd = 0,8$  Пам. При размере зазора в 10 мм это соответствует давлению  $p = 80$  Па. Зависимость давления паров металла от температуры описывается уравнением [13]:

$$\log\left(\frac{P}{133}\right) = -\frac{A}{T} + B + C \log T, \quad (4)$$

где коэффициенты для меди  $A=17650$ ,  $B=13,4$ ,  $C=-1,25$ .

Найденному значению давления паров соответствует допустимая температура нагрева анода  $T_{\text{доп}} = 1850$  К. Это значение допустимой температуры приведено на рис. 8 (прямая линия). Рабочая поверхность анода разрядников  $FV1$  и  $FV2$  нагре-

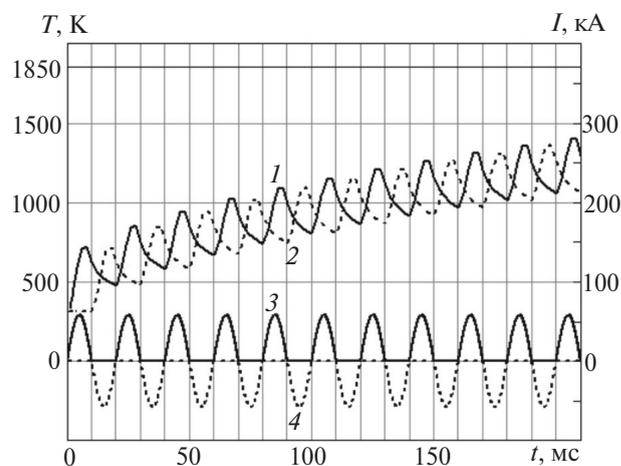


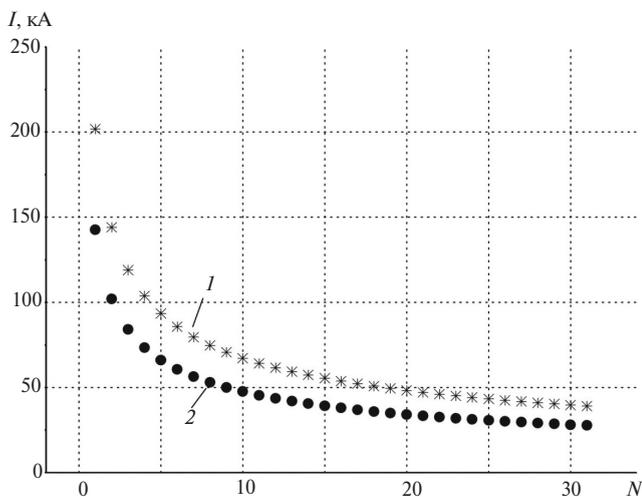
Рис. 8. Расчетные зависимости температуры поверхности анода разрядников  $FV1$  (1) и  $FV2$  (2) от времени при токах через разрядники  $FV1$  (3) и  $FV2$  (4), соответствующие осциллограмме тока на рис. 7,6

лась до температуры 1295 и 1054 К соответственно, и, следовательно, коммутатор имеет в этих условиях эксперимента запас по отключающей способности.

Очевидно, что в сетях с большей амплитудой восстанавливающегося напряжения отключающая способность коммутатора будет ниже. В [10] сопоставлялись расчётные и экспериментальные значения отключающей способности вакуумных дугогасительных камер с контактами из композиции Си-Сг с ходом контактов 10 мм на номинальное напряжение 10 кВ. В [10] получено хорошее согласие расчётных и экспериментальных данных при  $T_{\text{доп}} = 1400$  К. При более высоком напряжении допустимая температура должна быть ниже, но она не может быть ниже температуры плавления меди  $T_{\text{пл}} = 1356$  К. Поэтому для класса напряжения 35 кВ допустимую температуру можно принять равной  $T_{\text{пл}}$ .

С использованием уравнений (2) и (3) и принятой допустимой температурой в программной среде MathCad была решена обратная задача вычисления предельной отключающей способности. На рис. 9 построены рассчитанные зависимости величины отключаемого тока от числа периодов протекания тока при восстанавливающемся напряжении в условиях эксперимента на стенде «ТИ-12» (400 В,  $T_{\text{доп}} = 1850$  К) и в условиях электрической сети класса напряжения 35 кВ ( $T_{\text{доп}} = 1356$  К). Из расчётов следует, что в условиях испытаний на стенде «ТИ-12» ожидаемый максимальный эффективный ток отключения равен 64 кА, а в сети переменного тока с номинальным напряжением 35 кВ при заданном времени коммутации 210 мс – 44 кА.

**Электрическая прочность ВБК.** Был выполнен статистический анализ данных измерений напряжений пробоя ВБК. Для описания эксперимен-



**Рис. 9.** Расчётные зависимости тока отключения коммутатора (действующее значение) от числа периодов тока частотой 50 Гц: 1 – в условиях испытаний на ударном генераторе «ТИ-12» при напряжении 400 В ( $T_{\text{доп}} = 1850$  К); 2 – в сети номинального напряжения 35 кВ ( $T_{\text{доп}} = 1356$  К)

тальной функции распределения напряжений пробоя ВБК использовалось, как и в [1], двухпараметрическое распределение Вейбулла:

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{a}\right)^b\right],$$

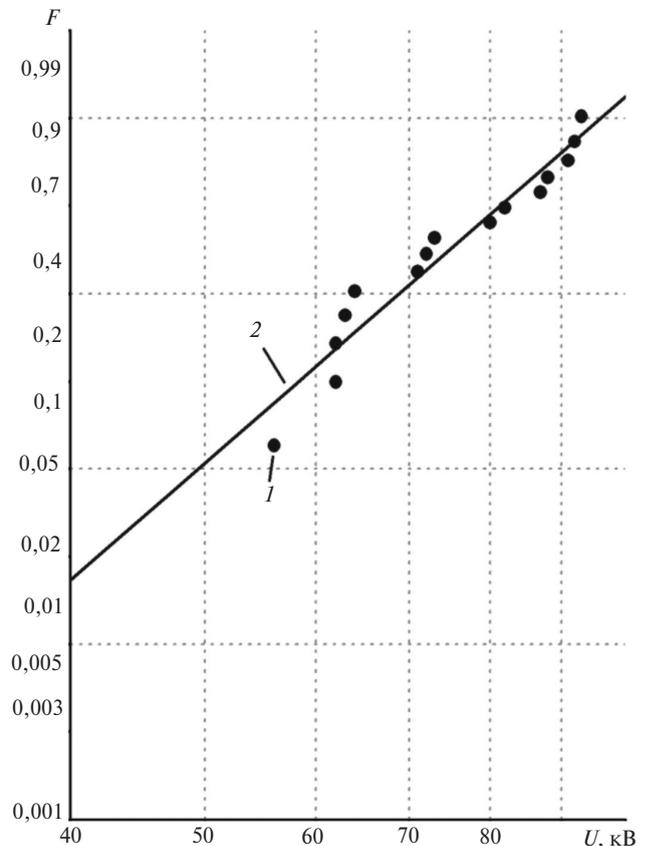
где  $a$  – параметр масштаба;  $b$  – параметр формы.

Параметр  $a$  определяет напряжение пробоя РВУ, соответствующее вероятности  $F=0,63$ , а параметр  $b$  определяет форму распределения.

На рис. 10 на вейбулловской координатной сетке построено эмпирическое распределение напряжения пробоя (действующее значение напряжения) ВБК (совокупность точек 1) и аппроксимирующее эту совокупность точек распределение Вейбулла (прямая 2) с параметрами  $a = 81,5$  кВ (действующее значение),  $b=6$ .

Из экстраполяции прямой 2 на рис. 10 в область малых напряжений следует, что при рабочем напряжении, равном 40 кВ (эфф.), можно ожидать вероятность пробоя менее 0,015. Максимальное рабочее фазное напряжение сети класса напряжения 35 кВ равно 24 кВ (эфф.), что соответствует вероятности пробоя  $2 \cdot 10^{-4}$  (на рис. 10 не показана).

Коммутатор прошёл также стандартные высоковольтные испытания для аппаратов на класс на-



**Рис. 10.** Эмпирическое распределение напряжения пробоя ВБК (совокупность точек 1) и аппроксимирующее распределение Вейбулла (прямая 2) с параметрами  $a = 81,5$  кВ (эфф.),  $b=6$

пряжения 35 кВ. После тренировки высоким напряжением ВБК выдержал одноминутное приложение испытательного напряжения промышленной частоты значением 95 кВ (действующее значение) и грозовой импульс амплитудой 185 кВ.

**Заключение.** Проведённые экспериментальные исследования показали, что коммутатор ВБК-35 надёжно включается при напряжении от 100 В. В электрической схеме с амплитудой восстанавливающегося напряжения 400 В после пропускания в течение 210 мс тока с действующим значением 40 кА коммутатор отключает этот ток в первый же переход тока через нуль после окончания сигнала запуска. Расчётным путём показано, что для сетей с номинальным напряжением 35 кВ отключаемый ток при длительности коммутации тока 210 мс может составлять 44 кА (эфф.). Электрическая прочность коммутатора позволяет использовать его в сети класса напряжения 35 кВ.

Проведённые исследования показывают, что по своим техническим характеристикам и в случае успешных прямых испытаний при номинальном напряжении 35 кВ ВБК-35 может использоваться как устройство для защиты сети от сверхтоков короткого замыкания.

Полученные зависимости тока отключения коммутатора от числа полупериодов пропускаемого тока при частоте 50 Гц дают возможность оценивать отключающую способность коммутатора при любой заданной длительности коммутируемого тока.

Характеристики ВБК получены при использовании уникальных электрофизических свойств РВУ и многофункциональной системы управления, состоящей из блоков поджига, быстродействующего шунта и блока преобразования, с использованием оптических линий связи и программируемых микроконтроллеров.

Модульная конструкция позволяет строить варианты коммутатора на более высокие классы напряжений. Так например, коммутатор для сети 110 кВ будет состоять из двух параллельных встречно включенных ветвей по три последовательно соединённых модуля в каждой ветви. Схемные решения ВБК предусматривают возможность расширения программного обеспечения для диагностики отдельных узлов, что облегчает эксплуатацию коммутатора и увеличивает срок его службы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alferov D.F., Ivanov V.P., Sidorov V.A. High-current vacuum triggered switching devices. — IEEE Trans. Magnetics, 2003, vol. 39, No. 1, pp. 406–409.
2. Фридман Б.Э., Благодатов И.Г. и др. Система коммутации для ёмкостных накопителей энергии. — Приборы и техника эксперимента, 2001, № 3, с. 93–97.
3. Lee H., Jin Y., Cho C., Rim G., Kim J., Chu J., Jung J., Sidorov V.A., Alferov D.F. Evaluation of RVU-43 Switch as the Closing Switch for Modular 300kJ Pulse Power Supply for ETC Application. — IEEE Trans. Magnetics, 2001, vol. 37, No. 1, pp. 371–374.
4. Ахметгареев М.Р., Иванов В.П., Менахин Л.П., Сидоров В.А. Высоковольтный силовоточный коммутатор на основе вакуумных управляемых разрядников. — Приборы и техника эксперимента, 2016, № 3, с. 43–48.
5. Патент РФ № 2366055. Метод защиты высоковольтного оборудования от токов короткого замыкания/В.А. Воронин, Д.Р. Любарский, В.Н. Подъячев. — БИ, 2009, № 24.
6. Акинин А.А., Воронин В.А., Иванов И.А., Косолапов А.М., Любарский Д.Р., Марусов Н.Л. Ограничение токов короткого замыкания в электрических сетях 110–220 кВ. — Энергоэксперт, 2013, т. 1 (36), с. 34–38.
7. Ivanov V.P., Domashenko G.D., Linnik S.P., Matveev N.V., Shcherbakov Yu.V. and V.A. Sidorov. A high-voltage high-speed commutator on the base of triggered vacuum switches. — Proc. of the 26th Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV-2014). Mumbai, Sep. 2014, pp. 473–476.
8. Патент РФ № 2515176. Устройство для измерения электрического тока / В.Н. Пономарев. — БИ, 2014, № 13.
9. Белкин Г.С. Коммутационные процессы в электрических аппаратах. — М.: Знак, 2003.
10. Белкин Г.С., Данилов М.Е., Клепшин Н.И., Лукацкая И.А., Ромочкин Ю.Г. К расчету отключающей способности вакуумных дугогасительных камер. — Электричество, 2001, № 9, с. 89–94.
11. Goldsmith S., Shalev S., Boxman R.L. Anode Melting in a Multi-Cathode-Spot Vacuum Arc. — IEEE Trans. Plasma Sci., 1983, vol. 11, pp. 127–132.
12. Watanabe K., Kaneko T., Yanabu S. Technological Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters. — IEEE Trans. Plasma Sci., 1997, vol. 25, No. 4, pp. 609–616.
13. Brandes E.A., Brook G.B. Smithells Metals Reference Book. 7th Edit. — Butterworth Heinemann, 1992.

[16.06.2017]

*А в т о р ы: Сидоров Владимир Алексеевич окончил Московский энергетический институт в 1975 г. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка вакуумных управляемых разрядников отпаянной конструкции для импульсных источников энергии» во Всероссийском электротехническом институте В.И. Ленина (ВЭИ – ныне филиал Российского Федерального ядерного центра – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики – РФЯЦ ВНИИТФ). Ведущий научный сотрудник ВЭИ.*

*Домашенко Геннадий Данилович окончил Московский государственный университет (МГУ) в 1984 г. Старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского центра (ВНИЦ) – ВЭИ (г. Истра).*

*Ахметгареев Марат Рифатович окончил Московский инженерно-физический институт в 2008 г. Начальник группы разработки вакуумной коммутационной аппаратуры ВЭИ (филиал РФЯЦ ВНИИТФ).*

*Щербakov Юрий Владимирович окончил МГУ в 1983 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Экспериментальные и теоретические исследования стримерных разрядов методами эмиссионной оптической спектроскопии» в ВЭИ. Начальник отдела ВНИЦ (г. Истра).*

## A High-Voltage High-Speed AC Switch Based on Controlled Vacuum Surge Arresters

**SIDOROV Vladimir A.** (*All-Russian Institute of Electrical Engineering (ARIEE), Moscow, Russia*) – *Leading scientific researcher, Cand. Sci. (Eng.)*

**DOMASHENKO Gennady D.** (*ARIEE, Research Centre (Istra), Russia*) – *Senior researcher*

**AKHMETGAREYEV Marat R.** (*ARIEE, Moscow, Russia*) – *Chief of group*

**SHCHERBAKOV Yurii V.** (*ARIEE, Research Centre (Istra), Russia*) – *Chief of Department, Cand. Sci. (Eng.)*

*The article presents the results from tests of a high-voltage apparatus intended for switching AC circuits. The specific feature of the apparatus is that it contains power switching elements of the basis of high-speed vacuum surge arresters and a microcontroller-based intelligent kernel that controls the apparatus in the real time mode. The apparatus operating principle is described in detail, and the results from measuring and calculating its breaking capacity and electric strength are presented taking as an example the Type VBK-35 high-speed switch constructed on the basis of the Type RVU-61 controlled vacuum surge arrester.*

**Key words:** *controlled surge arrester, high-voltage switch, breaking capacity, breaking current, breakdown voltage, electric strength, switching time*

### REFERENCES

1. Alferov D.F., Ivanov V.P., Sidorov V.A. High-current vacuum triggered switching devices. — IEEE Trans. Magnetics, 2003, vol. 39, No. 1, pp. 406–409.
2. Fridman B.E., Blagodatov I.G. et al. *Pribory i tekhnika eksperimenta – in Russ. (Instruments and experimental techniques)*, 2001, No. 3, pp. 93–97.
3. Lee H., Jin Y., Cho C., Rim G., Kim J., Chu J., Jung J., Sidorov V.A., Alferov D.F. Evaluation of RVU-43 Switch as the Closing Switch for Modular 300kJ Pulse Power Supply for ETC Application. — IEEE Trans. Magnetics, 2001, vol. 37, No. 1, pp. 371–374.
4. Akhmetgareyev M.R., Ivanov V.P., Mekhanin L.P., Sidorov V.A. *Pribory i tekhnika eksperimenta – in Russ. (Instruments and experimental techniques)*, 2016, No. 3, pp. 43–48.
5. Patent RF No. № 2366055. *Metod zashchity vysokovol'tnogo oborudovaniya ot tokov korotkogo zamykaniya (Method of protection of high-voltage equipment against short-circuit currents)/V.A. Voronin, D.R. Lyubarskii, V.N. Pod'yachev.* Bulletin of inventions, 2009, No. 24.
6. Akinin A.A., Voronin V.A., Ivanov I.A., Kosolapov A.M., Lubarskii D.R., Marusov N.L. *Energoekspert – in Russ. (Energy expert)*, 2013, vol. 1 (36), pp. 34–38.
7. Ivanov V.P., Domashenko G.D., Linnik S.P., Matveyev N.V., Shcherbakov Yu.V. and V.A. Sidorov. A high-voltage high-speed commutator on the base of triggered vacuum switches. — Proc. of the 26th Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV-2014). Mumbai, Sep. 2014, pp. 473–476.
8. Patent RF No. 2515176. *Ustroystvo dlya izmereniya elektricheskogo toka (Device for measuring electrical current)/V.N. Ponomarev.* Bulletin of inventions, 2014, No. 13.
9. Belkin G.S. *Kommutatsionnye protsessy v elektricheskikh apparatakh (Interconnect processes are in electric vehicles)*. Moscow, Publ. JSC ZNACK Firm, 2003.
10. Belkin G.S., Danilov M.Ye., Kleshnin N.I., Lukatskaya I.A., Romochkin Yu.G. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 9, pp. 89–94.
11. Goldsmith S., Shalev S., Boxman R.L. Anode Melting in a Multi-Cathode-Spot Vacuum Arc. — IEEE Trans. Plasma Sci., 1983, vol. 11, pp. 127–132.
12. Watanabe K., Kaneko T., Yanabu S. Technological Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters. — IEEE Trans. Plasma Sci., 1997, vol. 25, No. 4, pp. 609–616.
13. Brandes E.A., Brook G.B. *Smithells Metals Reference Book 7th Edit.* — Butterworth Heinemann, 1992.

[16.06.2017]