

New generation of high current triggered vacuum switches

D. F. Alferov, V. P. Ivanov, V. A. Sidorov, V. V. Fedorov
The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The main results of researches of pulse high current vacuum discharge in a rod electrode system are presented. New types of triggered vacuum switching devices RVU-47, RVU-45 and the high-voltage vacuum commutator consisting of two series connected switches RVU-43 are developed, manufactured and tested. These switching devices cover a range of working currents from 5 up to 500 kA and a voltage range from 1 up to 80 kV.

УДК 621.316.93

Быстродействующая защита нагрузки от токов короткого замыкания на управляемых вакуумных разрядниках

Н. В. Матвеев, И. А. Иванников, Д. А. Хабаров

Высоковольтный научно-исследовательский центр (ВНИЦ ВЭИ) — филиал ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", г. Истра, Московская обл., Россия

Рассмотрены вопросы защиты нагрузки от повреждений токами короткого замыкания (к. з.) при внутреннем пробое. Дан анализ характеристик сильно-точных высоковольтных приборов, пригодных для использования в составе шунтирующего нагрузку ключа, обосновано применение для этой цели управляемых вакуумных разрядников. Приведены результаты разработки и испытания устройств защиты на напряжение 80 и 120 кВ с током к. з. до 10 кА.

Для защиты мощных высоковольтных электровакуумных приборов от повреждений при пробоях используются различные схмотехнические решения, цель которых — уменьшить энергию, выделяемую на электродах ЭВП, до уровня 1÷10 Дж. Современные системы электропитания ответственных и дорогостоящих приборов, например гиротронов или гироклистронов, как правило, обеспечивают быстродействующее отключение тока при коротком замыкании на выходе. Полное время переходного процесса в таких источниках питания обычно не превышает 10÷20 мкс. Это позволяет при токах к. з. порядка 1 кА ограничить энергию, поступающую непосредственно от сети и рассеиваемую в нагрузке на уровне, близком к предельному.

Однако имеется еще один источник энергии, приводящей к возможным повреждениям в ЭВП при пробое. Им является паразитная емкость высоковольтной установки, заряженная до рабочего напряжения. Она состоит из собственной выходной емкости источника электропитания, емкости подводящего высоковольтного кабеля, а также емкостей измерительных и защитных устройств, подключенных к нагрузке на стороне высокого напряжения. Величина паразитной емкости, особенно в мощных крупногабаритных установках, может составлять единицы нанофарад, а неуправляемая энергия, за-

пасенная на стороне высокого потенциала, может достигать десятков джоулей.

Таким образом, даже в быстродействующих системах электропитания величина полной энергии, рассеиваемой в нагрузке при пробое, может превысить безопасный уровень. Для того чтобы избежать катастрофических последствий пробоя, необходимо использовать дополнительные защитные средства. Одним из них является так называемый “кроубар” — шунтирующее устройство, устанавливаемое на выходе источника питания параллельно нагрузке и отводящее таким образом ток источника, отсекающее заряд, накопленный в паразитных емкостях.

Это устройство должно быть высоковольтным, сильноточным, быстродействующим, иметь широкий диапазон рабочих напряжений и состоять в общем случае из высоковольтного и сильноточного ключа (коммутатора), вспомогательного оборудования, обеспечивающего работу ключа, токоограничивающей цепи, датчика пробоя, блока запуска и системы самоконтроля и блокировок.

На рис. 1 приведена упрощенная электрическая схема системы питания гиротронного комплекса [1], оснащенного устройством защиты указанного типа. Номинальные параметры источника: $U = -80$ кВ; $I = 35$ А, электронная лампа обеспечивает быстродействующее отключение тока при коротком замыкании нагрузки. Полное время переходного процесса составляет 20 мкс. В аварийном режиме, при одновременном пробое нагрузки и электронного коммутатора, источник отключается тиристорами сетевого регулятора, и время отключения достигает 10 мс.

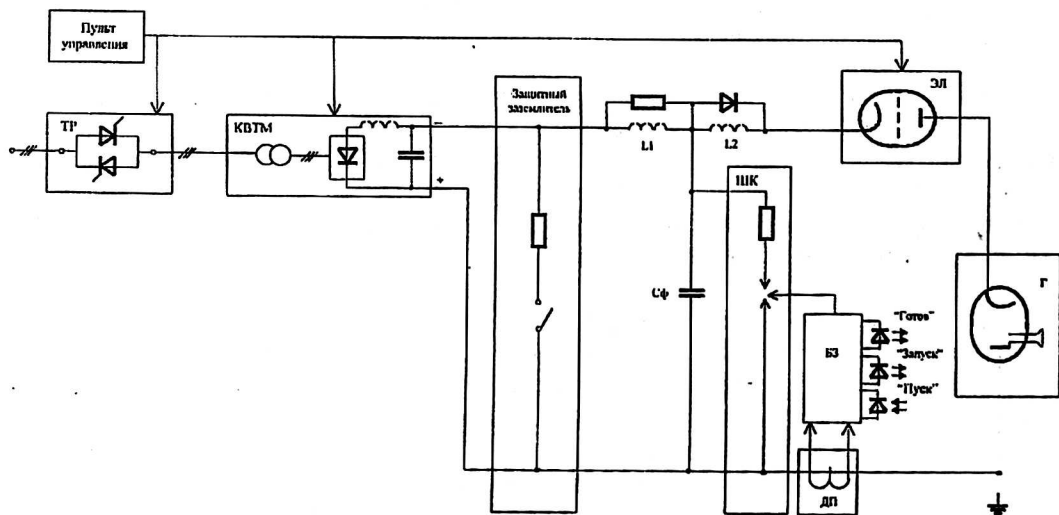
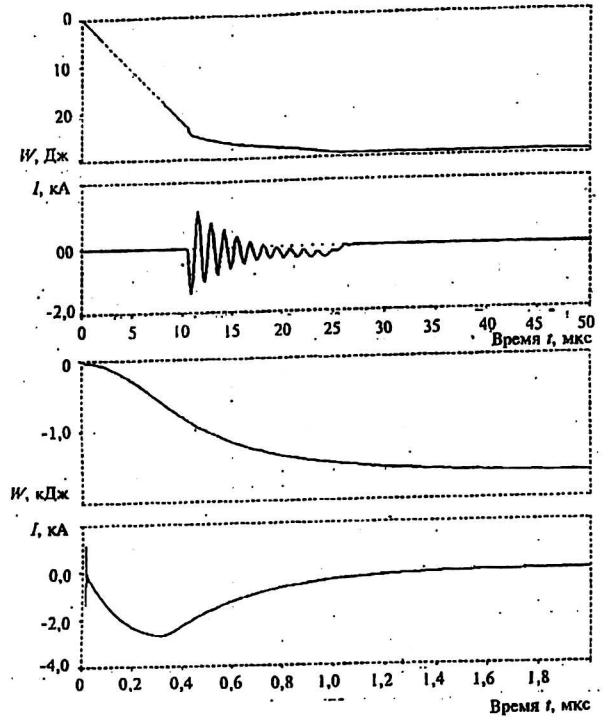


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема системы питания гиротронного комплекса, оснащенного устройством защиты на электронной лампе и шунтирующим устройством

На рис. 2 приведены расчетные кривые тока нагрузки и полной энергии, выделяемой в разряде в режимах штатного и аварийного отключений. Предполагается, что пробой возникает на 10-й микросекунде, и источник питания отключается либо электронным коммутатором в течение 10 мкс через 10 мкс после начала пробоя, либо тиристорами с задержкой 10 мс при сквозном пробое. Остаточное напряжение на нагрузке может находиться в диапазоне сотен вольт — нескольких киловольт в зависимости от типа разряда. В расчете это напряжение принято равным 1 кВ.

Рис. 2. Осциллограммы тока (I) и энергии, вкладываемой в разряд (W) при пробое нагрузки для случаев отключения электронной защиты (вверху) и при одновременном пробое электронного ключа и нагрузки (внизу)



Как видно из приведенных осциллограмм, если запасенная в паразитных емкостях энергия не превышает безопасного уровня, то электронная защита, отсекая источник питания, позволяет защитить нагрузку от повреждений. Однако при отказе электронного коммутатора, что должно рассматриваться как вполне вероятное событие, на электродах нагрузки может выделиться энергия, превышающая несколько килоджоулей, и применение шунтирующего устройства является жизненно необходимым. Так как скорость нарастания тока ограничена реактором $L2$, высоких требований к скорости срабатывания шунтирующего устройства защиты не предъявляется. Допустимое время задержки может составить 30 мкс при ограничении энергии в разряде уровнем 10 Дж.

Применение кробоара целесообразно и в высокочастотных системах питания, емкость выходного фильтра которых не столь велика, как в предыдущем случае. На рис. 3 приведена эквивалентная схема источника питания, выполненного на базе многокаскадного конвертера с фазовым сдвигом. Последовательно соединенные выходные выпрямители преобразователя формируют на нагрузке постоянное напряжение до 80 кВ при токе 30 А с малым уровнем пульсаций при выходной емкости не более 2 нФ [2].

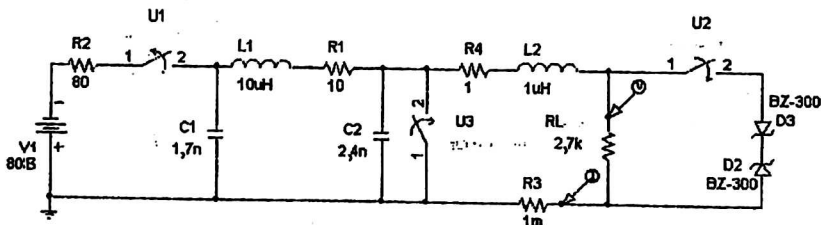


Рис. 3. Эквивалентная схема для расчета переходного процесса в системе питания с малоемкостным выходом при пробое нагрузки

Ток короткого замыкания источника ограничен на уровне 1 кА и отключается за 10 мкс через 10 мкс после пробоя. Нормально-закрытый ключ U1 (при $t_{откр} U1 = 20$ В) моделирует эту защитную характеристику. Конденсаторы C1, C2 представляют паразитные емкости источника питания и анодного модулятора гиротрона. Остаточное напряжение на разряде во время пробоя моделируется 2-анодным стабилитроном с напряжением лапчины 1000 В. Предполагается, что пробой наступает на 10-й микросекунде с начала импульса. Шунт R3 используется в качестве датчика тока.

Осциллограммы вкладываемой в разряд энергии и тока нагрузки приведены на рис. 4. Можно заметить, что на первой фазе, вследствие разряда паразитной емкости элементов, подключенных непосредственно к катоду гиротрона, на электродах нагрузки выделяется порядка 7 Дж, а затем вложенная энергия растет со скоростью 1,3 Дж/мкс, поступая с выхода источника. Если полное время защиты составляет 15 мкс, то рассеиваемая энергия возрастает до 25 Дж и превышает безопасный уровень. Чтобы ограничить рассеиваемую в разряде энергию у безопасного уровня, ток нагрузки должен быть прерван не позднее чем через 7 мкс после начала пробоя.

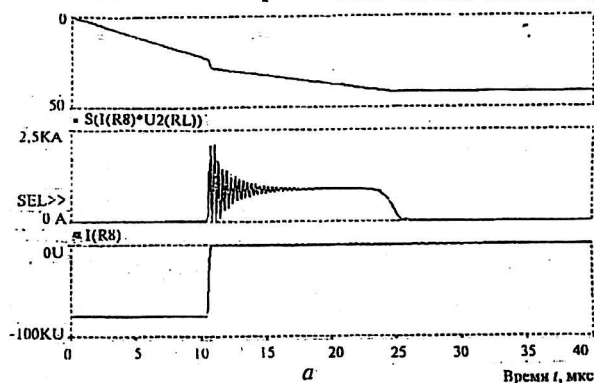
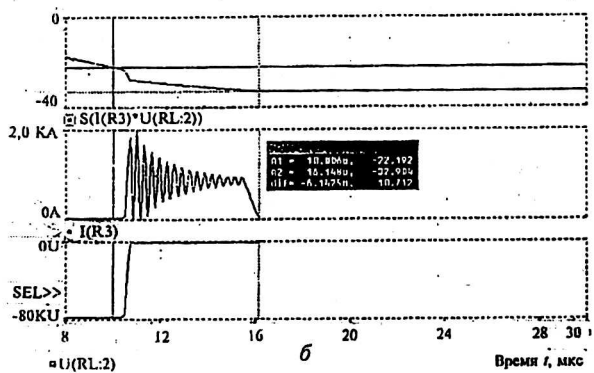


Рис. 4. Расчетные кривые для вложенной в разряд энергии (S), тока (I) и напряжения (U) на нагрузке при быстродействующем пассивном отключении источника (а) и при использовании крочбара (б)



Для надлежащей работы устройства защиты на коммутаторе необходимо обеспечить некоторое минимальное напряжение. Это может быть получено установкой согласующих элементов R4, L2. При этом дополнительно уменьшается энерговклад в разряд на начальной фазе, а скорость возрастания потерь остается той же самой.

На рис. 3 устройство защиты U3 (при $t_{закр} U3 = 15$ В) подключено параллельно анодному модулятору и отделено от гиротрона токоограничивающей цепочкой. Нормально-открытый ключ замыкается на 15-й микросекунде, т. е. через 5 мкс после начала пробоя. Рассеиваемая в нагрузке энергия при этом

не превышает 8 Дж, а напряжение на устройстве защиты составляет 12 кВ (см. рис. 4).

Таким образом, можно сформулировать требования к устройству защиты для работы в системах питания мощных ЭВП:

запираемое напряжение шунтирующего ключа вследствие переходных процессов на выходе источника питания должно на 10÷20 % превышать максимальное напряжение нагрузки;

максимальный коммутируемый ток должен иметь уровень не менее нескольких килоампер и превышать ток короткого замыкания источника;

должен обеспечиваться широкий диапазон рабочих напряжений шунтирующего ключа с нижним порогом не более 10 кВ;

на определение аварийной ситуации, формирование команды и запуск коммутатора должно быть затрачено не более 3÷5 мкс;

необходимо предотвратить самопроизвольное срабатывание устройства защиты в статическом и динамическом режимах и контролировать его готовность к работе;

защитное устройство не должно существенно увеличивать паразитную емкость системы питания. Максимальное значение емкости устройства защиты может быть задано на уровне 100 пФ;

наработка коммутирующего прибора должна составлять 10^5 ÷ 10^6 импульсов с максимальным коммутируемым зарядом до 1 Кл.

Известно несколько типов коммутаторов, пригодных для применения в устройствах защиты в качестве высоковольтного и сильноточного ключа. К ним относятся игнитроны, мощные лампы, полупроводниковые приборы, тиратроны, разрядники.

Игнитроны используются в основном для разряда емкостных накопителей с высоким уровнем импульсного тока и переносимого заряда. По этим показателям игнитроны превосходят все известные на сегодня приборы. Разброс времени включения составляет около ± 100 нс, а задержка момента включения — до 1 мкс. Запираемое напряжение обычно ограничено на уровне 30÷50 кВ, но приборы допускают последовательное соединение. Вместе с тем применение игнитронов в устройствах защиты имеет ограниченный характер вследствие возможного закорачивания основного промежутка сконденсировавшимися парами ртути. При этом невозможно выяснить заранее до подачи высоковольтного импульса действительное состояние ключа. Этот факт, а также всевозрастающие требования к экологической безопасности установок делают проблематичным использование игнитронов в качестве безопасного и высоконадежного коммутатора в устройствах защиты.

Основное преимущество мощных **высоковольтных ламп** — их полная управляемость. С другой стороны, лампы уступают остальным приборам по импульсному току, остаточному напряжению, требуют затрат мощности на питание накала. Вследствие этих недостатков — низкой энергетической и токовой эффективности — электронные лампы редко используются в устройствах защиты в качестве шунтирующего ключа.

Благодаря прогрессу в области полупроводниковых приборов в настоящее время можно использовать **тиристоры** на напряжение до 3000 В с импульсным током несколько килоампер и допустимой скоростью нарастания тока более 1000 А/мкс [3]. Для достижения необходимого запираемого напряжения приборы могут соединяться последовательно. Основной недостаток для их применения в устройстве защиты — относительно низкая стойкость к перегрузкам по напряжению. В любой разработке, использующей полупровод-

никовые приборы, должна быть предусмотрена совершенная защита от перенапряжений, в противном случае приборы могут лавинообразно выходить из строя. Это обстоятельство серьезно усложняет и удорожает разработку.

Тиратроны представляют собой газонаполненные приборы, работающие как быстродействующий управляемый по включению сильноточный ключ. Для выключения тиратрона ток в нем должен быть прерван с помощью внешней цепи. Давление газа в тиратроне поддерживается с помощью специального подогреваемого генератора, смонтированного в приборе. Количество запасенного в генераторе газа в значительной степени определяет срок службы прибора. Обычно это время составляет до 1000 ч. Максимальное напряжение тиратронов, выпускаемых, например EEV Ltd., достигает 120 кВ, импульсный ток приборов может превосходить $3\div 6$ кА при максимальной скорости нарастания тока до 5000 А/мкс, средний ток $3\div 6$ А. Задержка от подачи импульса запуска до установления проводимости прибора не превосходит 300 нс. В состав системы питания может быть введена блокировка, предотвращающая возможность работы с неисправным устройством.

В то же время существуют определенные проблемы применения тиратронов в устройствах защиты. Для поддержания режима проводимости необходимо некоторое критическое постоянное напряжение на приборе. Типовое значение этого напряжения составляет 5 кВ и может быть уменьшено только за счет уощнения запускающего импульса. Тиратрон содержит термокатод и накаливаемый генератор водорода, для питания которых должны быть предусмотрены соответствующие источники. Время подготовки тиратрона к работе составляет порядка 5—15 мин под накалом. Включение без прогрева может приводить к самопроизвольному запуску. В то же время работа в “ждущем” режиме, в состоянии постоянной готовности приводит к быстрому выработыванию ресурса. При этом наработка тиратрона будет определяться прежде всего временем под накалом, а не фактической работой в качестве защитного устройства.

Определенный интерес представляют для применения в шунтирующих устройствах тиратроны с холодным катодом — псевдоискровые разрядники [4], однако их максимальное выдерживаемое напряжение ограничено уровнем $25\div 45$ кВ, а последовательное соединение представляет собой довольно сложную инженерную задачу.

Искровые разрядники — это, как правило, ненакаливаемые приборы с запуском по управляющему электроду, предназначенные для однократного или низкочастотного режима работы, имеющие время задержки включения долей — единиц микросекунд и разброс в пределах 1 мкс. Они бывают отпаянными или открытыми. Отпаянные приборы, в свою очередь, могут быть вакуумными, с давлением остаточных газов, не превышающим 10^{-4} Па, или газонаполненными.

Газонаполненные отпаянные разрядники имеют относительно узкий диапазон рабочих напряжений, лежащий обычно в пределах от 40 до 90 % максимального напряжения.

Вакуумные управляемые разрядники (ВУР) имеют улучшенные характеристики по рабочему напряжению и способны работать в диапазоне напряжений и токов $U = (0,5\text{—}50)$ кВ; $I = (0,2\text{—}60)$ кА при максимальной скорости нарастания тока $(dI/dt) = 10^{11}$ А/с и времени запаздывания включения 0,3 мкс. Срок службы приборов ограничен в основном суммарным переносимым зарядом, величина которого достигает 10^6 Кл [5, 6].

Вакуумные разрядники:

- превосходят тиратроны по величине импульсного тока и параметру di/dt , не требуют каких-либо систем накала или охлаждения. Обладают высокой стойкостью к перегрузкам без потери работоспособности. Устройство запуска для ВУР может быть достаточно простым и управляемым на потенциале земли. Для достижения необходимой электрической прочности несколько разрядников могут быть соединены последовательно;

- уступают тиратронам по частотным характеристикам вследствие большего времени восстановления, но это не является определяющим критерием для применения в устройстве защиты. Наоборот, эта особенность дает возможность продлить открытое состояние коммутатора в том случае, когда в цепи могут наблюдаться колебания.

Разрядники компактны, обладают постоянной готовностью к работе, удобны в обслуживании, не требуют специальной ориентации в пространстве, бесшумны, пожаро-, взрыво- и экологически безопасны.

Таким образом, по нашему мнению, управляемые вакуумные разрядники отпаянной конструкции являются весьма перспективными приборами для высоковольтных устройств быстродействующей защиты нагрузки от токов к. з. Ниже представлены результаты разработки таких устройств, выполненных на разрядниках РВУ-31, выпускаемых ГУП "Всероссийский электротехнический институт" (ВЭИ), Москва [7].

На рис. 5 приведена упрощенная электрическая схема устройства защиты. Чтобы получить необходимое коммутируемое напряжение, в составе шунтирующего ключа необходимо использовать несколько соединенных последовательно разрядников. Активно-емкостный делитель напряжения позволяет скомпенсировать разброс токов утечки. С его помощью обеспечивается надлежащее распределение напряжения на разрядниках в статическом и динамическом режимах. Для этого скорость нарастания приложенного напряжения должна быть меньше скорости заряда паразитных емкостей.

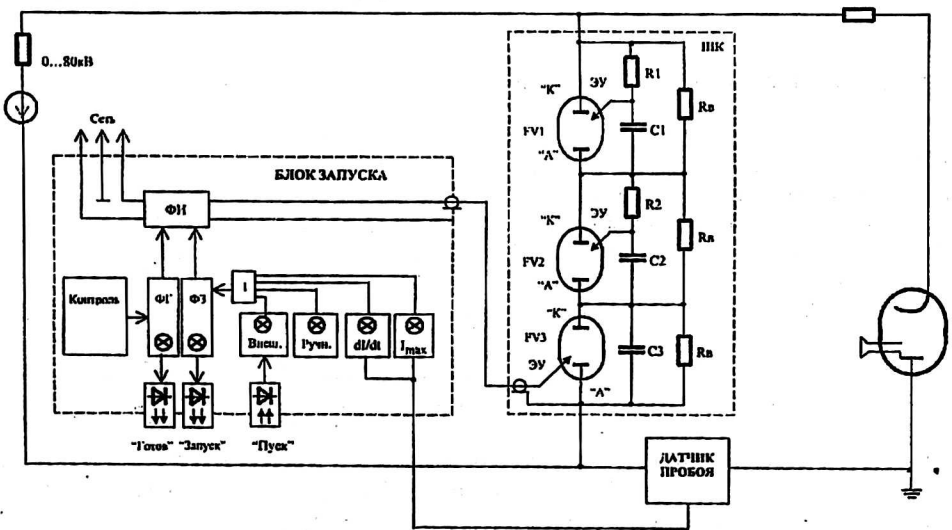


Рис. 5. Электрическая схема устройства защиты на вакуумных разрядниках

Вакуумные разрядники способны работать при положительном и отрицательном напряжениях на основном промежутке. Разница заключается только в

величине тока запуска. Разрядник запускается “на катоде”, если прилежащий к управляющему основному электрод имеет отрицательный потенциал относительно другого основного электрода. В этом режиме для запуска разрядника достаточно тока 100 А. Если этот электрод имеет положительный потенциал, то разрядник запускается “на аноде”. В этом случае ток запуска должен удовлетворять неравенству $I > 8,5 \cdot 10^4 U^{0,5}$, где I, A — ток запуска; U, B — напряжение на основном промежутке [5].

Особенностью приведенной схемы является то, что независимо от полярности приложенного напряжения и от числа соединенных последовательно разрядников, от заземленного блока запуска запускается только один низкопотенциальный разрядник, а затем с помощью емкости связи C_3 по схеме запуска “на катоде” — и остальные приборы. Это позволило существенно упростить решение проблемы изоляции цепей управления при запуске разрядников, находящихся под высоким потенциалом.

На рис. 6 приведен внешний вид устройств быстродействующей защиты гиротронов от повреждений токами к. з. на напряжение 90 и 120 кВ с токами к. з. до 10 кА.

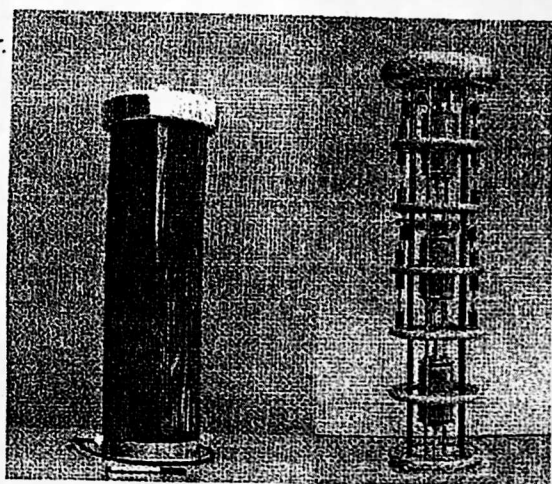


Рис. 6. Фотографии внешнего вида устройств быстродействующей защиты от повреждений токами короткого замыкания на напряжение 90 и 120 кВ

Основные параметры представлены ниже:

	УЗ-80	УЗ-120
Рабочее напряжение, кВ	10—80	10—120
Максимальное напряжение, кВ	90	130
Коммутируемый импульсный ток, кА	0,1—10	0,1—10
Максимальный заряд в импульсе, Кл	1	1
Время, мкс:		
включения	0,8	0,8
задержки включения	2—5	2—5
Габаритные размеры, мм	Ø210x800	Ø250x1000
Масса, кг	12	15

В состав системы защиты входят: шунтирующий ключ (ШК), блок запуска (БЗ), датчик пробоя на эффекте Холла (ДП). Вакуумные разрядники соединяются между собой и устанавливаются на основание вертикально с помощью переходных втулок и фланцев, закрепляемых на выводах обоих разрядников и на основании. Резистивный делитель закреплен на том же основании коаксиально с вакуумными разрядниками и заземляется. Делитель состоит из ряда соединенных последовательно секций. Каждая секция собрана в виде “беличьего колеса” из высоковольтных резисторов и изоляционных

стержней, закрепленных между металлическими кольцами. ШК закрывается диэлектрическим цилиндром с целью защиты от механических повреждений и загрязнения. Электростатический экран установлен на верхнем электроде, чтобы предотвратить коронный разряд при работе под высоким напряжением.

Блок запуска формирует высоковольтный импульс напряжения для включения шунтирующего ключа по аварийному сигналу, выделенному из контролируемого тока нагрузки с помощью датчика пробоя. Запуск производится в следующих случаях:

- при превышении током нагрузки уровня 50 А;
- при превышении скорости нарастания тока нагрузки значения 2—10 А/мкс;
- при подаче внешнего запуска через оптический вход “Запуск”;
- ручной запуск от кнопки на лицевой панели.

В БЗ предусмотрены контроль исправности внутренних источников питания, наличия соединения с датчиком пробоя и выдача итогового сигнала “Готов” через оптический выход.

Особенность схемы управления УЗ-120 — последовательное соединение цепей запуска верхнего и среднего разрядников, что обеспечивает малый разброс по времени их включения.

Устройство работает следующим образом. Сигнал с ДП о наличии тока к. з. в цепи нагрузки поступает в БЗ, что приводит к запуску нижнего разрядника. Приложенное к устройству напряжение перераспределяется на разрядники FV2 и FV1, по цепи R1R2—C1C2 течет ток заряда конденсаторов. На резисторах R1 и R2 возникает импульс напряжения, приложенный к управляющим промежуткам разрядников FV2 и FV1. При пробое только одного управляющего промежутка ток в цепи запуска не может достичь необходимого для уверенного включения ВУР номинального значения 100 А, так как ограничен вторым резистором (R1 или R2). Только при пробое обоих управляющих промежутков ток в цепи запуска достигает номинального значения и создаются условия для включения FV2 и FV1. Происходит самосинхронизация момента включения разрядников, что позволяет свести к минимуму время и величину коммутационных перенапряжений на элементах ШК, вызванных одновременностью включения разрядников.

Таким образом, использование последовательного соединения вакуумных управляемых разрядников и схемы запуска, в которой только один разрядник запускается устройством, находящимся на потенциале земли, а остальные — с помощью пассивных цепей связи, позволило создать надежные и недорогие устройства защиты, работающие в широком диапазоне рабочих напряжений.

Л и т е р а т у р а

1. Матвеев Н. В., Бобков Ю. В., Иванников И. А., Кравцов С. Ф., Рассадин Б. М.//IV Симпозиум “Электротехника 2010”, 20—23 Мая, 1997. М, Мощные высоковольтные системы питания для гиротронов непрерывного режима.
2. Martin R., Likin K., Fernandez A., Sorolla M., Sanchez A., C. del Rio Bocio, Matveev N.//Proceedings of the 19th Symposium on Fusion Technology, Lisbon, Portugal, 16—20 September 1996. P. 709—712, ECRH System for TJ-II Experiment.
3. Wellemann A., Schlapbach U., Ramezany E.//12-th IEE International Pulsed Power Conference, June 27—30, 1999, Monterey, California, USA. P. 150—152. Plug and play solid state switching system for laser applications.
4. Bochkov V. D., Dyagilev, Ushich V. G., Bochkov D. V.//12-th IEE International Pulsed Power Conference, June 27—30, 1999, Monterey, California, USA. P. 1275—1278.
5. Алферов Д. Ф., Сидоров В. А.//Приборы и техника эксперимента. 1996. № 3.
6. Алферов Д. Ф., Воздвиженский В. А., Сидоров В. А.//Электротехника. 1996. № 8.
7. Alferov D. F., Ivanov V. P., Sidorov V. A.//IEEE Trans. On Magnetics. High current vacuum switching devices for power energy storages. 1999. № 1.

High speed load protection against short circuit current based on triggered vacuum switches

N. V. Matveev, I. A. Ivannikov, D. A. Khabarov

High Voltage Scientific and Research Center, Branch of The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Istra, Moscow region, Russia

Load protection against short circuit current when internal breakdown occurs is considered. Performances of the high voltage and high current devices suitable for the crowbaring switch are analyzed. Triggered vacuum switches application for this purpose is based. Result of the 80 kV and 120 kV Crowbar design and tests with the current up to 10 kA are given.