

УДК 621.316.925:621.385.6

## ЗАЩИТА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЕЙ АУТНОМНОЙ РЭА ОТ ПЕРЕГРУЗОК ПО ТОКУ

В. И. Гуревич

Одна из важнейших проблем, связанных с применением мощных электровакуумных приборов (ЭВП), – защита источников питания (ИП) и ЭВП от повреждений при внутренних пробоях в последних. От эффективности такой защиты во многом зависят надежность и живучесть сложнейших комплексов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Существует большое разнообразие конкретных схемных решений систем защиты ЭВП. Простейшие из них содержат реле тока в низковольтной цепи ИП и контактор, отключающий повышающий трансформатор ИП от сети при перегрузках.

В более совершенных системах датчик тока включен непосредственно в цепь питания ЭВП, находящуюся под высоким потенциалом. При этом гальваническая развязка разнопотенциальных цепей осуществляется с помощью высоковольтного трансформатора [1] или световодов [2,3]. Недостаточная надежность работы оптоэлектронных узлов гальванической развязки в бортовой и возимой аппаратурах обусловила появление принципиально новых устройств – интерфейсных реле на основе геркотонов [4] и систем защиты ЭВП с их применением [5,6].

В [7] рассмотрено большое количество схемных решений систем защиты ЭВП, предложенных ведущими зарубежными фирмами (Siemens, Telefunken, General Electric Co. и др.). Эти схемные решения основаны на использовании токоограничивающих элементов (например, дросселей) в цепи питания ЭВП, а также управляемых высоковольтных разрядников (тираторопов, игнитронов) шунтирующих ЭВП. Тиристорные, транзисторные, гибридные герконо-полупроводниковые коммутрующие устройства для систем защиты ЭВП рассмотрены в [8,9].

Анализ принципов построения систем защиты ЭВП и собственный опыт работы позволяет автору сделать вывод о том, что выбор принципа построения эффективной системы защиты ЭВП должен определяться в основном мощностью ЭВП. Например, для приборов малой мощности (таких, как рентгеновские трубки) может вообще не потребоваться какая-то специальная система защиты, так как ограничение тока разряда в ЭВП обеспечивается большим внутренним сопротивлением ИП. Для ЭВП несколько большей мощности последовательно с ним включается пелинсийный токоограничивающий элемент, например, магнитоуправляемый резистор или специальный дроссель. При этом кратность тока короткого замыкания в ЭВП удается ограничить на уровне трех–четырех от номинального назначения.

При рабочих токах в ЭВП порядка единиц ампер уже требуется введение защит релейного типа. Наиболее простые из них и в то же время достаточно эффективные – защиты, содержащие низковольтный коммутационный элемент в цепи низкого напряжения ИП, управляемый по командам датчика, включенного в цепь высокого напряжения (последовательно с ЭВП).

При еще большей мощности ЭВП и, соответственно, ИП последний содержит реактивные элементы фильтров, накапливающие энергию, достаточную для повреждения ЭВП при пробое

даже после разрыва цепи низкого напряжения ИП. В этом случае усложняется система защиты из-за введения достаточного дорогого высоковольтного быстродействующего коммутатора со своей собственной схемой управления, шунтирующего ЭВП при его пробое. Для исключения перегрузки и выхода из строя элементов ИП, например, диодов выпрямителя, такой высоковольтный короткозамыкатель может лишь дополнять указанные выше системы, а не заменять их.

И, наконец, в РЭА самой большой мощности, например, в СВЧ-передатчиках с излучаемой мощностью порядка единиц мегаватт, в том числе возимой, появляется еще одна проблема селективного отключения одного из 10–15 параллельно работающих ЭВП при повреждении одного из них, которая может быть решена применением специальных высоковольтных отключающих аппаратов.

Системы защиты ЭВП, связанные с отключением питания, должны быть также снабжены автоматическим повторным включением, обеспечивающим повышение живучести РЭА.

В автономной РЭА все эти проблемы усложняются повышенными требованиями к массогабаритным показателям, диктующим необходимость разработки специальных схемных решений, альтернативной элементной базы и т. д. Например, ранее разработанная достаточно эффективная система защиты ЭВП на основе тиристорного ключа с так называемым "самоуправлением" [10], включенным в цепь низкого напряжения ИП, и геркотонов (интерфейсного герконового реле с высоковольтной изоляцией), включенного непосредственно в цепь высокого напряжения [5,6], оказалась мало пригодной для применения в бортовой РЭА – из-за большой мощности, постоянно рассеиваемой на тиристорах, необходимости применения крупногабаритных и тяжелых радиаторов, их обдува, а также организации защиты самих тиристорных от перегрузок.

На рис. 1 дана структура системы защиты, свободная от этих недостатков. В ней тиристорный контактор в цепи низкого напряжения ИП заменен на тиристорный короткозамыкатель (ТКЗ). При возникновении перегрузки в цепи ЭВП срабатывает геркотрон (Г) и на ТКЗ поступает сигнал управления с процессора. Одновременно сигнал на отключение подается с процессора и на обмотку штатного контактора (К).

Экспериментальное исследование показало, что отпирание тиристоров ТКЗ происходит за время порядка 5 мкс, а отключение К типа ТКС203ДОДБ за время 20–50 мс. Короткое замыкание на линиях системы электроснабжения (СЭС) существует лишь в течение времени, необходимого для отключения контактора, после чего с помощью его блок-контакта (через процессор) снимается управляющий сигнал с ТКЗ и тиристоры запираются. При такой структуре системы прохождение через тиристоры ТКЗ даже значительного по величине тока, ограничиваемого лишь внутренним сопротивлением СЭС, в течение 20–50 мс на вызывает заметного нагрева тиристоров, т. е. отпадает необходимость в радиаторах и принудительном обдуве тиристо-

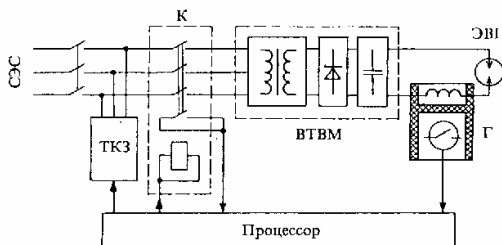


Рис. 1

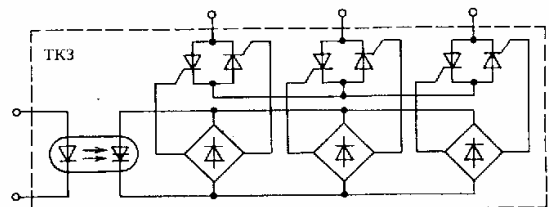


Рис. 2

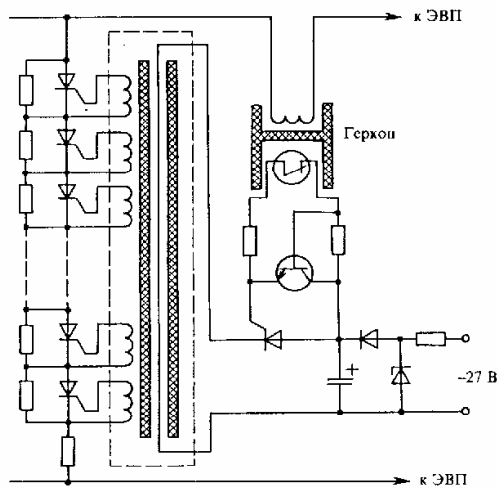


Рис. 3

ров. Короткозамыкатель, выдерживающий ударный ток до 3 кА при длительности до 50 мс, представляет собой достаточно компактную конструкцию с габаритами 300 × 115 × 100 мм.

Кроме того, за счет значительно меньшего времени отпирания тиристоры по сравнению с их естественным запирающим на переменном токе удалось повысить общее быстродействие системы. ТКЗ содержит шесть таблеточных тиристоров (типа ТБ143-400-7), установленных попарно между стальными уголками, стянутыми шпильками. Все элементы (выпрямительные мосты на диодах 2Д202К и оптронный тиристор ТО132-25-7) просты и оригинальной схемы управления ТКЗ (рис. 2) размещены на печатной плате, установленной на этих же уголках.

Процессор управляет работой всех элементов системы и обеспечивает многократное автоматическое повторное включение. Он выполнен на 12 микросхемах 133 серии и снабжен выходными элементами на транзисторах 2Т827А и тиристоре 2У202Д (для стыковки процессора с силовыми элементами системы).

Работа элементов системы осуществляется по следующему алгоритму: при возникновении перегрузки по току в цепи ЭВП срабатывает герктрон ВИКИНГ-1, включается короткозамыкатель и отключается контактор, запирается короткозамыкатель и повторно включается контактор, в ячейки памяти на время  $\tau_1$  заносится факт срабатывания защиты. В случае восстановления электрической прочности ЭВП процесс на этом заканчивается и ЭВП продолжает получать питание. По истечению времени  $\tau_1$  информация о срабатывании защиты автоматически стирается. Если за время  $\tau_1$  произойдет повторный пробой ЭВП, то срабатывает защита по описанному выше алгоритму с той лишь разницей, что повторное включение контактора произойдет не сразу, а с паузой  $\tau_2$ , необходимой для деионизации пробитого вакуумного промежутка в ЭВП. Если в течение времени  $\tau_1$  с момента повторного включения пробоев ЭВП не произойдет ячейка памяти опять освобождается. При возникновении в ЭВП серьезных повреждений, которые не могут саморезультативно устраниться, следует три попытки повторного включения контактора с последовательно увеличивающейся паузой, после чего процесс повторного включения блокируется и записывается транспорт "Повреждение ЭВП". Снятие блокировки осуществляется оператором при нажатии кнопки "Сброс".

Описанная система была испытана на бортовой (самолетной) РЭА. Однако при работе этой системы в более мощной возимой РЭА было установлено, что, несмотря на быстродействующее отключение высоковольтного трансформаторно-выпрямительного модуля (ВТВМ) со стороны низкого напряжения, значительная энергия, накопленная в реактивных элементах ВТВМ, продолжает выделяться в ЭВП при его пробое и после отключения ВТВМ. Для устранения этого явления параллельно ЭВП был подсоединен высоковольтный короткозамыкатель. Его выполнение на

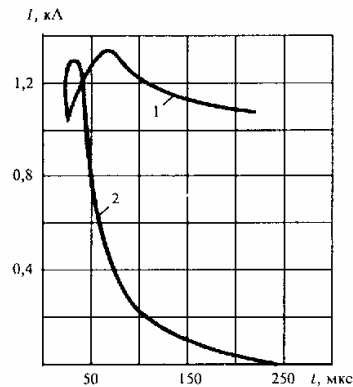


Рис. 4

управляемых вакуумных разрядниках (например типа РВУ-3 и аналогичных ему) не очень удобно из-за необходимости формирования высоковольтных управляющих импульсов достаточно большой мощности на управляющем электроде, самозапирании разрядника при уменьшении тока в его цепи до нескольких десятков ампер и т. п.

Поэтому был разработан высоковольтный короткозамыкатель (ВК) на тиристорах (рис. 3), управляемый маломощным сигналом управления и хорошо стыкующийся с описанной выше системой защиты. ВК содержит 15 таблеточных тиристоров типа Т143-400-22, уложенных в виде столба в пластмассовую юклету, залитую эпоксидным компаундом. Импульсный трансформатор выполнен на ферритовых кольцах, размещенных в индивидуальных отсеках пластмассового корпуса, через которые пропущена трубка из полиэтилена высокой плотности с толщиной стенки 2 мм, а через эту трубку, в свою очередь, пропущен отрезок высоковольтного провода марки ПВМР, оба конца которого включены в схему управления. Корпус импульсного трансформатора также залит эпоксидным компаундом.

Короткозамыкатель такой конструкции выдерживает испытательное напряжение переменного тока 30 кВ между всеми цепями. При испытании системы защиты конденсатор емкостью 5 мкФ, заряженный до напряжения 15 кВ, закорачивался короткозамыкателем через ограничительный резистор 10 Ом. На рис. 4 дана осциллограмма процесса срабатывания ВК (1 - сигнал запуска, 2 - ток разряда конденсатора). Результаты испытаний подтверждают надежность и достаточно высокую эффективность ВК.

В соответствии с изложенной выше концепцией для РЭА большой мощности (порядка единиц мегаватт) потребовалась разработка системы селективного отключения одного из параллельно работающих ЭВП (в модуляторе). Для нее автором было разработано высоковольтное реле типа "Голиаф" (рис. 5) представляющее собой аппарат с магнитоуправляемым контактом, не требующий обслуживания в процессе эксплуатации. Узел перемещения подвижных частей не содержит осей вращения, как в обычных реле, и даже изгибающихся элементов, как в герконовых реле, и представляет собой автономный элемент, состоящий из мостикового контакта 3 и сердечника 6, свободно перемещающихся вдоль оси реле под действием магнитного поля катушек управления 4 и 5. Неподвижные серебряные контакты 2 и перемещающийся узел подвижных частей с серебрографитовыми накладками размещены в герметичном отсеке 1 (из полиэтилена высокой плотности), обеспечивающем требуемый уровень изоляции от катушек управления.

Отсек 1 заполнен диэлектрической кремний-органической жидкостью (КОЖ). В результате проникновения магнитного поля через стенки диэлектрического отсека происходит воздействие катушек управления на сердечник. Необходимое контактное нажатие обеспечивается за счет сил взаимодействия постоянных магнитов 8 и 9. Величина перемещения подвижных частей достигает 60 мм, несмотря на это в реле отсутствуют удары этих частей о неподвижные элементы благодаря демпфирующим свойствам КОЖ. Именно этими двумя обстоятельствами (наличием значительного раствора между контактами и необхо-

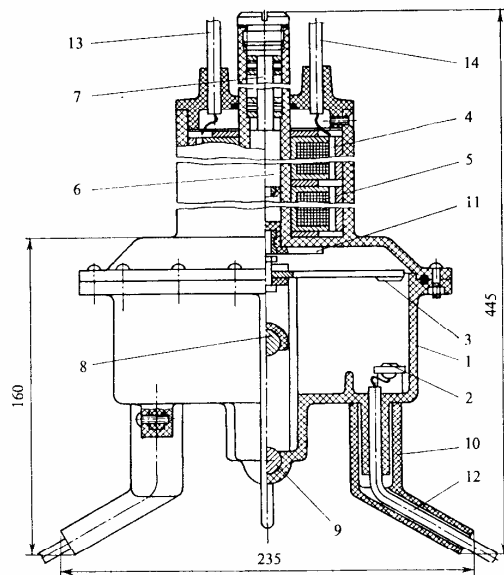


Рис. 5

1 – герметичный отсек из полиэтилена высокой плотности, заполненный кремний-органической жидкостью; 2 – неподвижный серебряный контакт; 3 – перемещающийся мостиковый контакт; 4, 5 – катушки управления; 6 – ферромагнитный сердечник; 7, 8, 9 – постоянные магниты; 10 – вспомогательные изоляторы; 11 – демпфер; 12 – выводы контактов, выполненные высоковольтным проводом; 13, 14 – выводы катушек управления, выполненные высоковольтным проводом.

димостью демпфирования ударов) и обусловлен в основном выбор в качестве изолирующей рабочей среды КОЖ, а не вакуума. К тому же при этом удалось значительно снизить стоимость реле.

Реле "Голиаф" имеет один контакт с фиксацией его положения в разомкнутом и замкнутом состояниях. Контакт не содержит дугогасительных элементов и предназначен для коммутации цепи в обесточенном состоянии. Переключение реле осуществляется подачей импульсного сигнала управления на одну из двух катушек управления. Возможен дистанционный контроль положения контактов за счет постоянного пропуска тока через одну из катушек управления небольшого переменного тока. При вхождении в эту катушку сердечника величина контролируемого тока резко уменьшается из-за увеличения ее индуктивного сопротивления. Это реле разрабатывалось для применения не только в РЭА, поэтому оно имеет несколько завышенные параметры, не встречающиеся в автономной РЭА (см. таблицу), что однако не препятствует использованию его в возимой и стационарной РЭА.

На базе этих реле разработана система селективного отключения поврежденного ЭВП одного из параллельно работающих модуляторов [11]. Она выполнена на основе описанной выше системы рис. 1. Отличие состоит в том, что система селективного отключения дополнена  $N$  геркотронами и  $N$  реле типа "Голиаф", включенными в цепь питания каждого из  $N$  параллельно соединенных ЭВП. При пробое одного на ЭВП срабатывает не только геркотрон в общей цепи, запускающий ТКЗ и контактор, но также и геркотрон, включенный в цепь поврежденного ЭВП. При этом посылается соответствующий сигнал в ячейку памяти процессора. После кратковременного отключения питания про-

Таблица

Наименование параметра, единица измерения	Величина параметра
Испытательное переменное напряжение на разомкнутых контактах (действующее значение кВ),	115
Электрическая прочность изоляции между контактами и катушками управления (действующее значение) переменного тока 50 Гц, кВ	115
Ток, пропускаемый через разомкнутые контакты, А	60
среднее значение синусоидального тока частотой 50 Гц (в режиме длительного протекания)	60
амплитудное значение прямоугольного импульса длительностью до 20 мс	1000
Полное время перемещения подвижных контактов, мс	105
Импульсный ток, потребляемый катушками управления от цепи выпрямленного напряжения 220 В, А	1,5
Необходимая длительность импульса управления, с	0,3
Количество циклов "включено-выключено"	$10^6$
Интервал рабочих температур, °С	-60 + 80
Габариты, мм	445 × 235 × 120
Масса, кг	5,0

цессор выдает сигнал в отключающую обмотку реле "Голиаф", включенного в цепь поврежденного ЭВП. После срабатывания этого реле и отключения поврежденного ЭВП питание остальных ЭВП автоматически восстанавливается по описанному выше алгоритму.

## ЛИТЕРАТУРА

- Силкин И. П., Смирнов А. В. Повышение эффективности релейной защиты электронных приборов// Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1975. – №10. – С.91–93.
- А. с. 301781 СССР. Устройство для защиты высоковольтного выпрямителя/В. М. Шевцов. – Оpubл. 1971, Бюл. №14.
- Пат. 2833606 ФРГ (Siemens AG), 1978.
- Гуревич В. И., Кривцов В. В., Савченко П. И. Интерфейсные реле// Электротехника. – 1990. – №6. – С.71–75.
- А. с. 1317555 СССР. Устройство для защиты высоковольтного электровакуумного прибора// Ю. И. Анисимов, Б. А. Прокофьев, В. И. Гуревич и др. – Оpubл. 1987, Бюл. №22.
- Гуревич В. И., Савченко П. И. Высокоэффективная защита мощных электровакуумных приборов//Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1987. – Вып. 1 (116). – С.70–73.
- Смирнов А. В., Светликина И. А. Методы и устройства быстройдействующей защиты мощных электровакуумных приборов/ЦНИИ "Электроника", 1977.
- Гуревич В. И., Кривцов В. В. Высоковольтные герконо-полупроводниковые коммутационные устройства для систем электропитания РЭА//Электросвязь. – 1991. – №4. – С.46–48.
- Гуревич В. И., Кривцов В. В., Бережнюк И. Г. и др. Исследование и разработка быстродействующего высоковольтного коммутатора для систем защиты ЛВБ бортового передатчика//Отчет по НИР Гос. рег. № 01.86.0032089, 1989.
- Гуревич В. И. Квазистатическая коммутационная и регулирующая аппаратура с высокопотенциальной развязкой/Дисс... канд. техн. наук. – Харьков. политехн. инст-т. – 1985. – 363 с.
- А. с. 1624596 СССР. Устройство для защиты высоковольтного электровакуумного прибора/В. И. Гуревич. – Оpubл. 1991, Бюл. №4.

Получено 20.11.92