

УДК 621.395.4:621.311.6

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ГЕРКОНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РЭА

В. И. Гуревич, В. В. Кривцов

Системы электропитания аппаратуры связи различного назначения в большинстве случаев являются высоковольтными: от 1...2 кВ в цепях дистанционного питания необслуживаемых усилительных пунктов систем проводной связи до 5...15 кВ в блоках питания электровакуумных приборов (лампы бегущей волны, клистроны) СВЧ передатчиков. Для управления режимами работы таких источников питания, защиты электронных приборов от повреждений требуются специальные коммутирующие устройства высокого напряжения небольшой мощности. Отечественная электронная промышленность выпускает ряд устройств такого класса (переключатели типов ПВ-1, П4Г-1, вакуумный выключатель ВВ-20, вакуумные герконы типа МКА-52141, МКА-52142). Однако они не удовлетворяют многим требованиям, предъявляемым аппаратурой связи. Так, переключатели ПВ-1, П4Г-1 допускают коммутацию высоковольтных цепей только в обесточенном состоянии; ВВ-20 имеет большое время срабатывания (15...20 мс); упомянутые герконы коммутируют очень малые токи (0,5...2,0 мА). В высоковольтных же источниках питания ограниченной мощности необходимо коммутировать токи от единиц миллиампер до десятков ампер при напряжениях 5...15 кВ с быстродействием от единиц до десятых долей миллисекунды. Имеется также потребность в простых и надежных устройствах релейного типа для гальванической развязки высокопотенциальных цепей. Решению этих задач на базе гибридных герконо-полупроводниковых устройств и посвящена данная статья.

Методы решения поставленных задач. Увеличить коммутируемую герконом мощность можно путем включения геркона в цепь управления высоковольтного полупроводникового ключа (усилителя мощности) для цепей постоянного и переменного токов или путем бестоковой коммутации для цепей переменного тока. Бестоковая коммутация может быть реализована с помощью синхронизации момента выдачи команды на срабатывание геркона с моментом перехода синусоиды коммутируемого тока через нулевое значение. В этом случае необходимо предусмотреть возможность регулирования параметров блока синхронизации для компенсации разброса параметров каждого конкретного геркона на стадии поставки. Также должен быть заранее учтен характер изменения времени срабатывания герконов в процессе наработки с тем, чтобы исключить возможное отклонение фазы упреждения нулевого значения коммутационного тока от расчетного значения. Более простой способ бестоковой комму-

тации — так называемая бездуговая коммутация с применением диодов, шунтирующих геркон.

В высоковольтных полупроводниковых усилителях мощности для управления всеми последовательно соединенными полупроводниковыми приборами с помощью одного геркона требуется надежная развязка управляющих цепей полупроводниковых приборов между собой для исключения их влияния друг на друга. Необходимо также учитывать специфические особенности выпускаемых промышленностью полупроводниковых приборов конкретных типов, например, очень низкий коэффициент усиления большинства высоковольтных приборов.

Уменьшить время срабатывания высоковольтных коммутаторов можно тоже несколькими путями: применяя специфическое свойство герконов размыкаться за время значительно меньше, чем замыкаться; благодаря использованию в высоковольтных коммутаторах миниатюрных низковольтных герконов с малым временем срабатывания; путем устранения или компенсации дребезга контактов геркона при срабатывании, длительность которого составляет большую долю в общем времени срабатывания и не может не учитываться при коммутации высоковольтных цепей. Возможно применение также и традиционных методов, таких как форсированное возбуждение обмотки коммутатора или оптимальная организация его магнитной цепи.

Обеспечить гальваническую развязку высокого уровня между разнопотенциальными частями систем защиты высоковольтных источников электропитания или электровакуумных приборов весьма эффективно можно с помощью высоковольтных изолирующих интерфейсов на магнитоуправляемых контактах — геркotronов [1, 2].

Ниже рассматриваются некоторые варианты технических решений, реализующих рассмотренные методы.

Высоковольтное коммутационное устройство с бестоковой коммутацией (рис. 1) состоит из синхронизатора *SYN*, двух геркotronов *H1*, *H2* и диодного столба *VD3*. Для осуществления бездугового замыкания цепи нагрузки (в случае замыкающих герконов) первым включается *H1*

в момент времени, соответствующий плюсу на катоде *VD3* (в цепи геркона протекает лишь обратный ток). В момент же, соответствующий минусу на катоде *VD3*, включается геркotron *H2*, контакт которого оказывается шунтированным *VD3*.

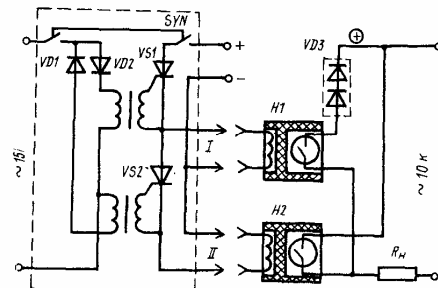
Для бездугового размыкания цепи нагрузки (в случае размыкающих герконов), первым включается (размыкается) геркotron *H2* в момент, соответствующий минусу на катоде *VD1*, а затем — *H1* в момент, соответствующий плюсу на катоде *VD1*. Реализация первого или второго режимов работы устройства обеспечивается соответствующим подключением обмоток геркotronов к *I* и *II* выходам синхронизатора. Сам синхронизатор состоит из узла идентификации полярности полувольт переменного напряжения, выполненного на диодах *VD1* и *VD2* и узла на тиристорах *VS1*, *VS2*, обеспечивающего заданную очередность включения геркotronов. Благодаря тиристорам первым всегда появляется сигнал на выходе *I*, а вторым — на выходе *II*. Устройство может коммутировать переменный ток до 0,5 А при напряжении до 10 кВ и имеет габариты 130×95×45 мм. На таком же принципе построен и ряд других устройств аналогичного назначения [3, 4].

Герконо-тиристорные коммутационные устройства (рис. 2) могут работать на переменном токе или в качестве короткозамыкателей в цепях постоянного тока. В первом случае для коммутации обеих полувольт могут быть использованы две аналогичные ветви, включенные встречно-параллельно [5]. При этом ток, проходящий через геркон, имеет характер одиночных импульсов треугольной формы небольшой длительности, возникающих в начале каждого положительного (для данной ветви) полуцикла (рис. 3). При расчете мощности геркона учитывается не нормируемое значение тока управления, а некоторый эквивалентный ток в повторно-кратковременном режиме, величина которого может быть найдена из выражения [6]:

$$I_{s,r} = 0,5 I_{np} \sqrt{(1 - \exp(-t_n/\tau)) / (1 - \exp(-(t_n + t_u)/\tau))} \quad (1)$$

где I_{np} — максимальное значение кратко-

Рис. 1



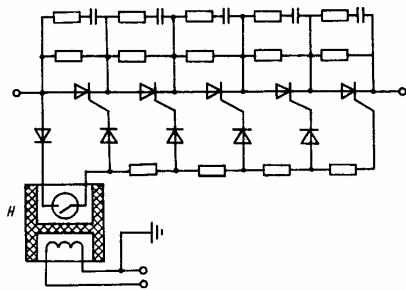


Рис. 2

временного тока через контакты геркона в один полупериод; I_n — длительность протекания тока $I_{кр}$; t_n — длительность паузы между импульсами; τ — постоянная времени нагрева геркона.

Величиной, характеризующей импульсы тока треугольной формы, может служить некоторый эквивалентный ток

$$I_s = \sqrt{\sum_1^{1,2n} \int_0^{\tau} I^2 dt}$$

Допуская для упрощения, что величина тока в импульсе меняется по закону прямой (по гипотенузе треугольника) $I = \alpha t$, где $\alpha = I_{отп}/t = \text{const}$; $I_{отп}$ — нормируемый ток отпирания, получим:

$$I_s = \sqrt{\left(\int_0^{\tau} \alpha^2 t^2 dt\right) / t = I_{отп} / \sqrt{3}} \quad (2)$$

После подстановки (2) в (1) $I_{э,г} = I_{отп} / \sqrt{2\sqrt{3}}$, т. е. расчетный ток в цепи геркона для данной схемы почти в 3,5 раза меньше значения нормируемого тока отпирания тиристоров. При этом также следует иметь в виду, что в технической документации на тиристоры указывается не реальное значение тока отпирания, а максимально возможное (еще и с некоторым запасом) значение. Анализ статистических характеристик параметров цепи управления тиристоров различных типов [7] позволил установить с вероятностью 0,99, что действительное значение тока отпирания силовых тиристоров в 1,5...2 раза меньше нормируемого. Изложенное позволяет сделать вывод о хорошей совместности герконов с тиристорами средней мощности для рассматриваемой схемы.

При использовании герконо-полупроводниковых коммутационных устройств в качестве короткозамыкателей, например для защиты высоковольтных электровакuumных приборов типа клистронов или ламп бегущей волны, требуется их высокое быстродействие (порядка 50—100 мкс). Оно может быть обеспечено устройством, приведенным на рис. 4. В нем в качестве запускающего элемента применен миниатюрный низковольтный геркон типа КЭМ-3.

При размыкании этим герконом цепи питания первичной обмотки индукционного трансформатора с высоковольтной изоляцией в ней за счет ЭДС самоиндукции возникает импульс тока, трансформирующийся через вторичные обмотки в цепи управления тиристоров. Экспериментальные исследования показали, что для надежного отпирания пяти последовательно соединенных тиристоров типа Т132-50-20 достаточно разомкнуть ток в цепи первичной

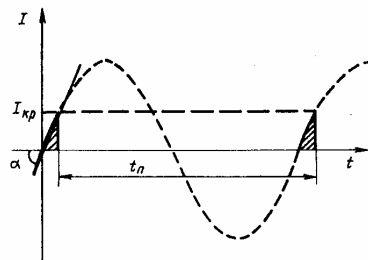


Рис. 3

обмотки порядка 30 мА при напряжении на ней около 3 В. Габариты устройства составляют 100 × 85 × 30 мм при массе 0,3 кг.

В процессе исследования этого устройства обнаружилось его неожиданное свойство. Оказалось, что при работе в области малых анодных токов обычные незапираемые тиристоры удается не только отпирать, но и запирают. Такой режим возможен при увеличении токов в первичной обмотке индукционного трансформатора до значений, превышающих ток нагрузки в 5—10 раз. При этом величина тока нагрузки больше величины практического тока удержания тиристоров. Разнополярность управляющих импульсов обеспечивается путем изменения предельных состояний геркона (переход от замкнутого состояния в разомкнутое и наоборот). На этой основе может быть разработан полностью управляемый высоковольтный ключ постоянного тока при токах нагрузки в пределах до 50 мА.

Герконо-транзисторные коммутационные устройства — одни из самых перспективных для применения в аппаратуре связи, однако с учетом ряда специфических особенностей.

При разработке высоковольтных коммутирующих устройств на транзисторах обычно ориентируются на отечественные высоковольтные триоды типов 2Т828А, 2Т839А или 2Т713А. Однако усилительные свойства этих транзисторов столь малы ($\beta = 2...5$), что часто возможность создания на их основе приемлемого по параметрам коммутатора ставится под сомнение [8].

При наличии в герконо-транзисторном устройстве более двух последовательно соединенных транзисторов, коммутируемый герконом ток управления (равный сумме базовых токов отдельных транзисторов) ставится практически соизмеримым с током в цепи нагрузки. В этом случае транзисторный усилитель мощности реально ничего не усиливает, поэтому на основе таких транзисторов возможно построение лишь простейших схем герконо-транзисторных коммутаторов [9].

Гораздо лучшие по коммутируемой мощности результаты удается получить при использовании транзисторов, рассчитанных на меньшее напряжение (например, типа 2Т506А, $U_k = 0,8$ кВ), но обладающих значительно большим коэффициентом усиления ($\beta = 30...150$). При этом необходимость в большом числе последовательно соединенных приборов окупается высоким коэффициентом усиления, а малые габариты корпуса и масса транзистора 2Т506А даже при вдвое большем их числе позволяют уменьшить габариты и массу устройства в целом (при коммутируемой мощности до 15 кВт).

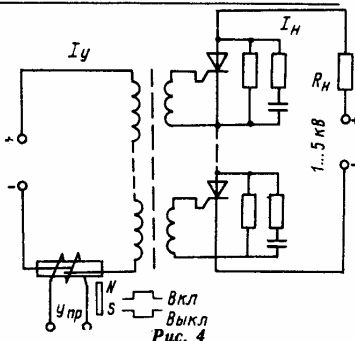


Рис. 4

При исследовании герконо-транзисторных коммутаторов на основе транзисторов 2Т506А было установлено, что даже при высоком коэффициенте усиления каждого прибора суммарный ток баз всех последовательно соединенных приборов на напряжение 5 кВ и при коллекторном токе (нагрузки) до 2 А превышает максимально допустимое для высоковольтных герконов значение. Единственной возможностью согласования коммутационных параметров геркона с параметрами нагрузки оказалось включение транзисторов по составной схеме рис. 5 [10]. Диоды в базовых цепях исключают влияние последовательно соединенных приборов друг на друга и тем самым способствуют равномерному распределению напряжения между ними в статических режимах. Напряжение же на самих диодах распределяется по закону:

$$U_{VDj} = U_n(N - j)/N, \quad (3)$$

где U_{VDj} — напряжение на отдельном диоде; U_n — напряжение источника питания; N — число последовательно соединенных транзисторов; $j = 1...N-1$ — порядковый номер (начало счета от положительного полюса источника питания — см. рис. 5). Максимально допустимое обратное напряжение отдельного диода должно выбираться либо дифференцированно из условия (3) либо по максимуму рассчитываться на напряжение $U_n(1 - 1/N)$.

Второй проблемой, на которую приходится обращать внимание при создании герконо-транзисторных коммутаторов, является влияние колебаний тока, вызванных дребезгом контактов-деталей геркона в процессе срабатывания и усиленных транзисторами, на ток нагрузки. Это нежелательное явление в разработанной схеме рис. 5 устраняется путем введения дополнительной RC-цепочки (показана пунктиром). Предполагается, что за время первого соударения емкость заряжается и затем обеспечивает поддержание отпирющего потенциала на базах транзисторов в период отскока, при следующем соударении она снова подзаряжается и т. д. Таким образом, компенсирующая емкость исключает влияние дребезга контактов геркона на нагрузочную цепь и этим самым значительно повышает быстродействие устройства. На рис. 6 показаны осциллограммы срабатывания быстродействующего высоковольтного герконо-транзисторного коммутационного устройства (a — без емкости; b — при включении емкости).

Расчет оптимальной величины C оказывается достаточно специфичным. Во-первых, емкость должна успеть полностью зарядиться в период первого импульса

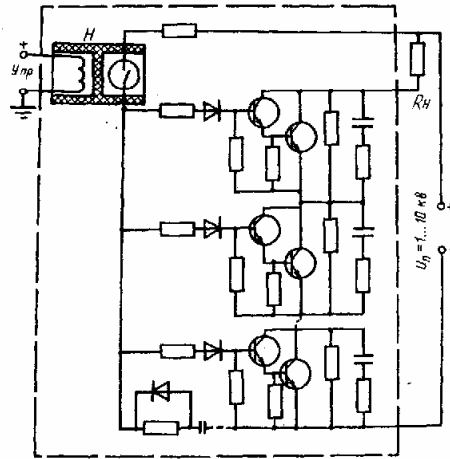


Рис. 5

дрезгага контактов геркона t_1 , поэтому время ее заряда должно удовлетворять неравенству:

$$t_1 \geq \pi RC. \quad (4)$$

Во-вторых, мощность, рассеиваемая на замкнутых контактах геркона P_k в период заряда емкости, не должна превышать максимально допустимую по техническим условиям коммутационную герконом мощность

$$P_k \geq \int_0^{t_1} P_k(t) dt / t_1 = \\ = r_k \int_0^{t_1} i_k^2(t) dt / t_1, \quad (5)$$

где r_k — сопротивление контактов геркона в замкнутом состоянии; $i_k(t)$ — свободная составляющая тока заряда емкости.

В-третьих, при разряде C во время первой паузы импульса дребезга t_{12} необходимо, чтобы затухание свободной составляющей напряжения на базовых резисторах не превышало допустимой для нагрузки величины снижения напряжения $U_{n \min}$, т. е.

$$U_{n \min} / U_n \geq \exp(-t_{12} / R_0 C), \quad (6)$$

где $R_0 = \left(\sum_{i=1}^N (1/R_{0i}) \right)^{-1}$ — эквивалентное сопротивление базовых цепей транзисторов. Интегрирование (5) и дальнейшее решение полученного выражения совместно с (4) дает оптимальную величину компенсирующей емкости

$$C_{\text{опт}} = t_1 \sqrt{2P_k / \pi r_k} / U_n.$$

После несложных преобразований (6) минимально допустимое сопротивление отдельного базового резистора

$$R_{0 \min} = t_{12} / [NC_{\text{опт}} (-\ln U_{n \min} / U_n)].$$

При реализации рассматриваемого коммутатора на основе геркона МКА-52141 быстродействие включения достигает 300 мкс.

Стремление повысить быстродействие

высоковольтных коммутаторов до десятков микросекунд привело к созданию устройства, схема которого показана на рис. 7 [11]. Основные его отличия от рассмотренного выше коммутатора заключаются в возможности использования низковольтного геркона, поскольку он включен параллельно базово-эмиттерному переходу транзистора (напряжение на переходе даже у мощных триодов не превосходит единиц вольт), а также в том, что при коммутации нагрузки геркон работает не на замыкание, а на размыкание. Так как отпущение миниатюрных низковольтных герконов занимает десятки микросекунд и при оптимальной организации магнитной цепи [12] не сопровождается дребезгом, а время включения даже у низкочастотных транзисторов составляет единицы микросекунд, эффект увеличения быстродействия очевиден. Следует заметить, что в разомкнутом состоянии коммутатора (при замкнутом герконе) имеют место потери мощности, однако в ряде случаев (при коммутации устройством нескольких киловатт) такими потерями (в единицы ватт) можно пренебречь.

Массо-габаритные показатели герконо-транзисторных коммутаторов, предназначенных для работы в импульсном режиме, составляют $90 \times 45 \times 20$ мм; 0,25 кг; предназначенных же для работы в длительных режимах — $100 \times 100 \times 45$; 0,4 кг.

Работоспособность всех рассмотренных устройств экспериментально проверена в Научно-техническом предприятии «Инвентор» (г. Харьков). Оно готово выпускать рассмотренные устройства по требованию заказчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич В. И., Савченко П. И. Геркотроны — новые устройства дистанционного управления высокопотенциальными цепями // Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. — 1984. — Вып. 4 (103). — С. 57—59.
2. Гуревич В. И., Кривцов В. В., Савченко П. И. Интерфейсные реле // Электротехника. — 1990. — № 6. — С. 71—75.

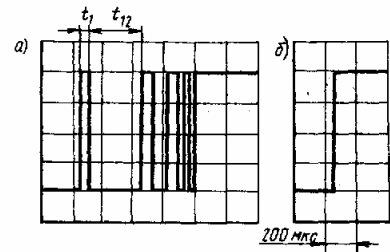


Рис. 6

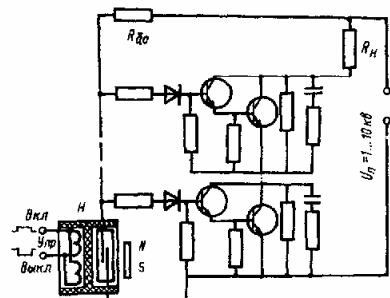


Рис. 7

3. Кривцов В. В., Гуревич В. И., Савченко П. И. Высоковольтные коммутационные устройства с повышенной износостойкостью // Сб. Совершенствование электрооборудования сельскохозяйственных предприятий. Киев, 1990.
4. Полож. решение от 24.01.90 по заявке 4641550/24-07. Синхронизированное герконовое реле / В. В. Кривцов, В. И. Гуревич.
5. А. с. 892604 (СССР). Высоковольтный полупроводниковый управляемый вентиль / В. И. Гуревич — Опубл. 1981. Бюл. № 47.
6. Гуревич В. И., Савченко П. И., Балахонов А. М. Управление тиристором переключателя ответвлений силового трансформатора // Электротехника. — 1980. — № 7. — С. 28—31.
7. Гуревич В. И., Жуковский Ю. В., Савченко П. И. Вероятностные характеристики статических токов управления силовых тиристоров // Сб. тр. МИИСП. — 1983. — С. 51—56.
8. Ивженко Г. Д., Погудин А. И., Горюнов В. П. и др. Проблема создания мощных высоковольтных транзисторных ключей. — Деп. в Информэлектро 05.01.88, № 10-эт 88.
9. Гуревич В. И. Повышение надежности электропитания необслуживаемых пунктов систем передачи // Электросвязь. — 1989. — № 8. — С. 47—49.
10. Пол. решение от 24.01.90 по заявке 4605441/24-07. Быстродействующее коммутационное устройство / В. И. Гуревич, В. В. Кривцов, П. И. Савченко.
11. Пол. решение от 24.05.90 по заявке 4632408/24-07. Высоковольтное быстродействующее реле / В. В. Кривцов, В. И. Гуревич.
12. Кривцов В. В., Гуревич В. И., Намитов К. К. Исследование быстродействия геркотронов и разработка методов его повышения. — Деп. в Информэлектро, № 34-эт 90, 1990, 77 с.

Получено 13.04.90