

# Дальнейшие пути развития силового электронного ключа

Евгений Уфимцев

Павел Чуйков

chuikof@yandex.ru

## Введение

Высокие требования надежности, предъявляемые к разрабатываемым изделиям специального назначения, использующим в своем составе силовые ключевые устройства, предусматривают обязательное применение силового электронного ключа (СЭК). Под СЭК подразумевается быстродействующий защищенный коммутатор постоянного тока. Окончательная структура построения перспективного СЭК в настоящее время до конца не определена: все изготавливаемые устройства СЭК ориентированы на индивидуальные особенности изделия.

От обычного транзистора, включенного в ключевом режиме, СЭК отличает присутствие дополнительной защитной обвязки и гальванической развязки в цепи управления. Реализация дополнительных защит транзистора делает данное устройство защищенным («неубиваемым») в процессе эксплуатации, что повышает надежность как силового ключа, так и изделия в целом.

Наиболее близкими к СЭК по функциональному составу являются твердотельные электронные реле. Сегодня в России выпускают или только осваивают их выпуск несколько предприятий. Недостаток данных приборов — низкая частота переключения (не более 1000 Гц), ограниченный объем встроенных защитных устройств или их отсутствие, а также невозможность изменения уровня контролируемого порога перегрузки, который способен изменяться в процессе эксплуатации, в зависимости от характера нагрузки или при работе с изменяемой нагрузкой.

## Общие требования

Назначение СЭК — обеспечить коммутацию постоянного напряжения величиной не менее 80 В с током от 0,1 А и более и частотой до 30–50 кГц. Для поддержания данного процесса силовой электронный ключ должен иметь ряд защитных устройств — обвязок, обеспечивающих устойчивую работу и контролирующих условия, превышение которых недопустимо для него. Так, при любых превышениях предельных режимов коммутации защитные устройства должны формировать внешний сигнал для исключения режимов превышения.

Эти дополнительные защитные обвязки СЭК обеспечивают:

- защиту по току от превышения с выдачей внешнего сигнала «Перегрузка» и возможностью отключения силовой цепи;
- защиту по превышению коммутируемого напряжения (с помощью внешних устройств — ограничителей напряжения);
- защиту по превышению повышенной рабочей температуры. При температуре выше рабочей формируется внешний сигнал «Перегрузка»;
- защиту от подачи напряжения обратной полярности;
- формирование логического сигнала «Статус» по наличию в силовой цепи рабочей нагрузки (данный сигнал контролирует выполнение управляющего сигнала включения/выключения СЭК) без превышающих режимов;
- корректировку уровня предельного коммутируемого тока по регулируемому порогу срабатывания перегрузки в условиях переходных процессов (для драйвера мягкого запуска различных двигателей при 3–5-кратной перегрузке от номинальной) и унификации СЭК.

## Ближайшие аналоги

Ближайшие аналоги СЭК — это твердотельные электронные ключи для коммутации токов до 30 А с напряжением 80 В следующих типов:

- ключ верхнего уровня;
- ключ нижнего уровня;
- ключ с независимым уровнем (изолированным управлением). При этом устойчивая работа всегда обеспечивается привязкой выводов с помощью диодов к шинам питания.

В настоящее время известны следующие ключи, являющиеся ближайшими аналогами СЭК и соответствующие требованиям ГОСТ Р54073-2010:

- ОАО «Ангстрем» 1358КТ3П — ключ нижнего уровня;
- 1358КТ1П — ключ верхнего уровня;
- ОАО «Протон» серия 2615КТ — ключ универсальный;
- ОАО «Прибор» ТКН-01.

В качестве силового коммутатора широко используются отечественные и зарубежные MOSFET-транзисторы.

Представляют интерес СЭК для коммутации постоянного тока более 20 А, стойкие к воздействию самоиндукции:

- ключ полумостового типа;
- ключ мостового типа.

**Варианты схем**

Структурная схема независимого СЭК программной реализации на базе микропроцессора (МП) с датчиком тока на базе датчика Холла представлена на рис. 1.

Встроенный МП в СЭК работает по внешнему интерфейсу с МП верхнего уровня на прием и передачу цифровых сигналов управления. По приему сигналов МП включает оптодрайвер и соответственно активирует силовой МОП-транзистор. При этом в процессе работы СЭК внутренний МП должен постоянно отслеживать уровень сигнала датчика тока по величине коммутируемого тока транзисторного ключа, а также его рабочую температуру. Кроме того, МП должен передавать в МП верхнего уровня сформированный сигнал «Статус» при наличии тока в силовой цепи, а при превышении выходного тока — сигнал «Перегрузка». Гальваническая развязка силовой и управляющей частей СЭК организована на уровне оптического драйвера и датчика тока. Все уровни, адреса, данные и необходимый объем информации реализованы на уровне программ.

Структурная схема универсального СЭК в варианте аппаратной реализации приведена на рис. 2. Силовой ключ с последовательно подключенным токовым шун-

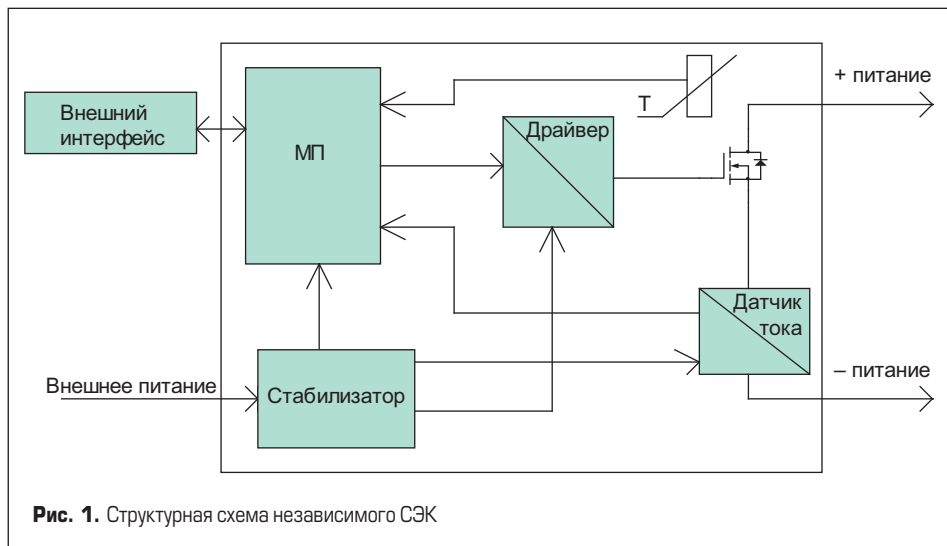


Рис. 1. Структурная схема независимого СЭК

том обеспечивает коммутацию силовой нагрузки. Включение затвора выходного транзистора осуществляется посредством драйвера импульсного трансформатора, питаемого вторичной обмоткой. При протекании тока по шунту силового транзистора величина напряжения, получаемого на нем, пропорциональна величине контролируемого тока. Это измеряемое напряжение увеличивается регулируемым линейным дифференциальным усилителем. Наличие тока в силовом ключе формирует сигнал «Статус». При достижении коммутации транзистором величины предельного тока (или предельной температуры) на выходе измерительного усилителя по величине установленного

порога напряжения формируется сигнал «Перегрузка» для анализа состояния СЭК по внешнему управлению и возможна блокировка драйвера. Внешняя регулировка величины усиления линейного усилителя происходит с помощью регулирующего устройства с гальванической развязкой (или записанной во внутреннюю память). Гальваническая развязка силовой и управляющей частей организована на уровне импульсного трансформатора, оптических развязок измерительного усилителя. Питание измерительного усилителя выполняется от вторичной обмотки импульсного трансформатора. Вход операционного усилителя должен быть защищен от напряжений, превышающих питание.

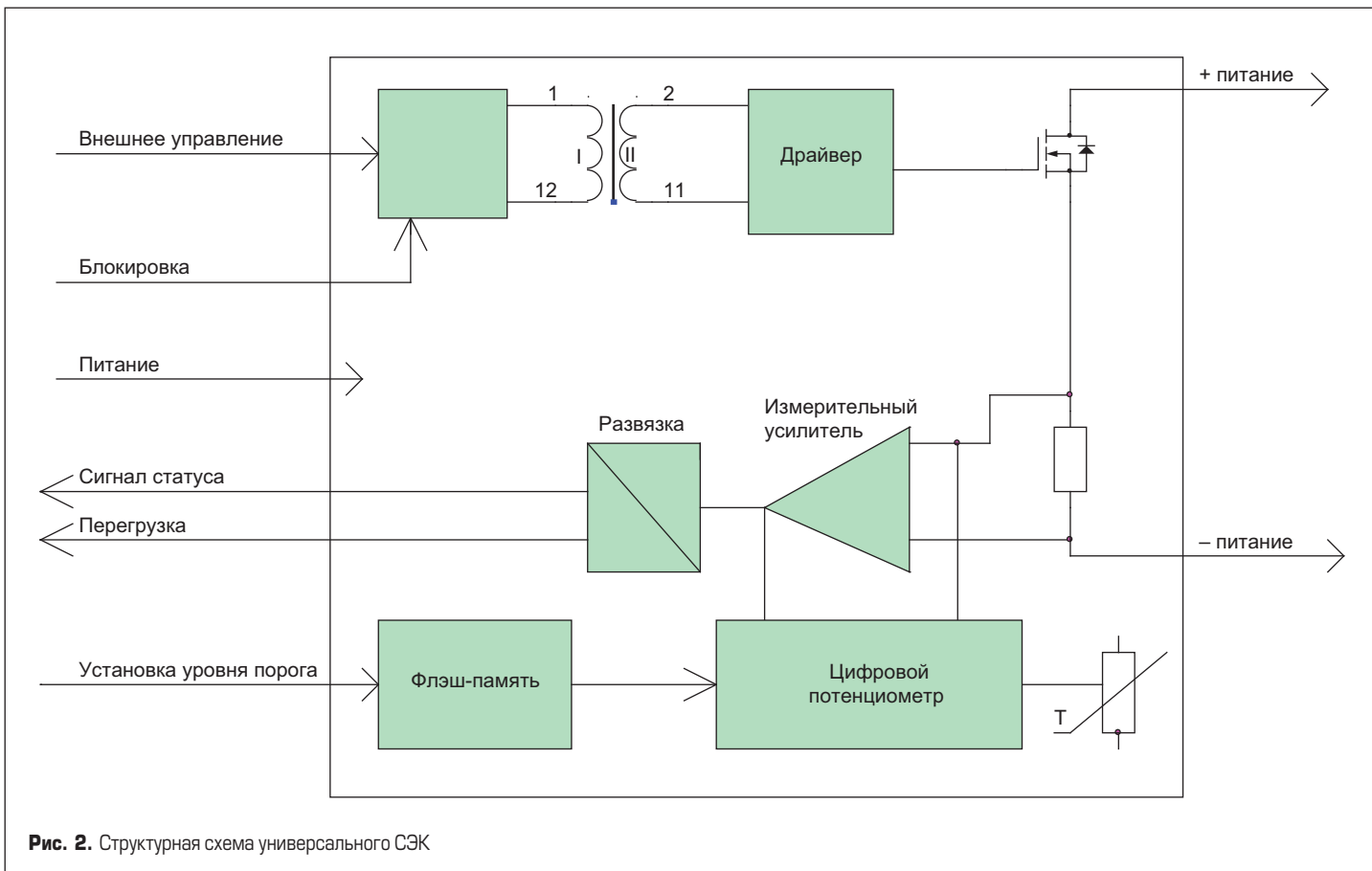
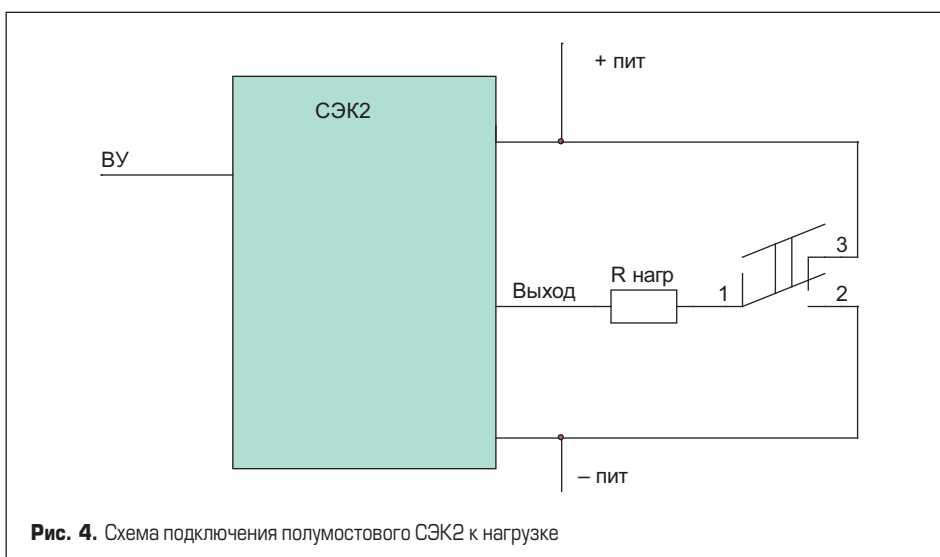
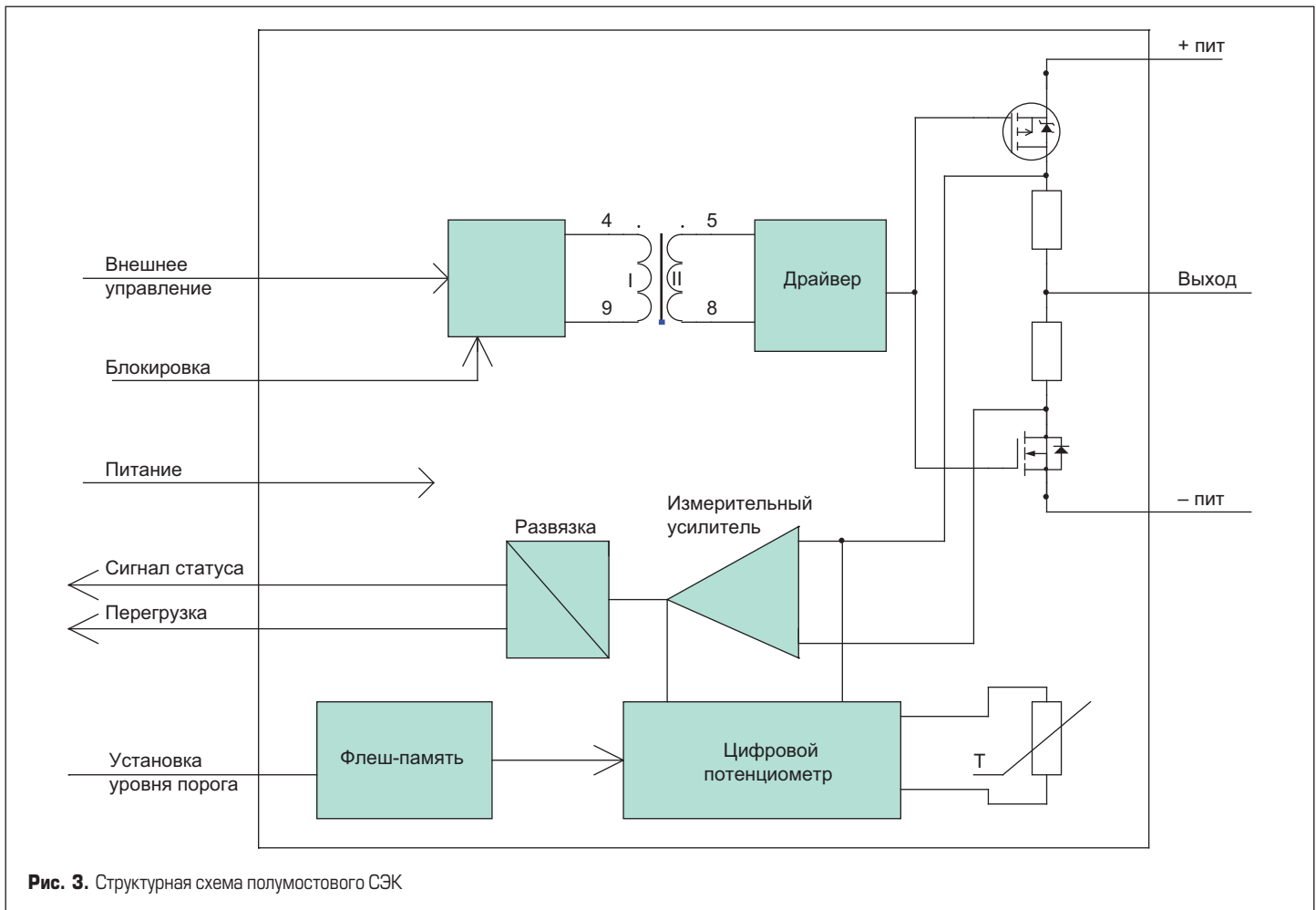


Рис. 2. Структурная схема универсального СЭК

Таблица. Сравнение параметров различных схем

Структурная схема независимого СЭК	Структурная схема универсального СЭК
<b>Достоинства</b>	
Все уровни, адреса, данные и требуемый объем информации реализованы на уровне программ. Сокращение времени разработки. Простота использования организации с применением датчика Холла и АЦП в МП.	Универсальное модульное конструктивное исполнение СЭК. Взаимозаменяемость. Жесткое схемотехническое решение. Удобство и простота для применения в аппаратуре и эксплуатации. Время отклика на режим перегрузки минимально.
<b>Недостатки</b>	
Высокая стоимость. Большие габариты. Отсутствие отечественных аналогов ЭРИ. Ограничение температуры $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для токовых датчиков Холла). СЭК ориентирован на определенный интерфейс. Нерационально используется ресурс МП. Требуется специализированный МП для задач СЭК. Возможна потеря информации КЗ или перегрузка. Необходимо ПО для каждого конкретного применения. Время отклика на режим перегрузки превышает 10 мс. МП требует обвязки и индивидуального контроля.	Большое количество дискретных ЭРИ. Измерительный усилитель должен быть защищен по входу от перенапряжения. Требуется разработка схемы управления на базе БМК (ПЛИС).



Конструкция СЭК должна обеспечить защиту устройства управления от мощных силовых полей, создаваемых MOSFET-транзисторами при коммутации. Защита силового каскада от перенапряжения, возникающего в момент закрытия силового транзистора, должна решаться схемотехнически и комплексно. С увеличением коммутируемого тока ЭДС самоиндукции может достигать нескольких сотен вольт. Кроме обвязки нагрузки и привязки СЭК к цепям питания шунтирующими диодами, требуются ограничительные диоды, защищающие выходной ключ от кратковременного перенапряжения, и другие аппаратные разрядные цепи.

Особенность полумостового СЭК — наличие двух транзисторов и двух шунтов. При работе в любом из выбранных состояний (наличие

или отсутствие управляющего сигнала) один из транзисторов открыт, а другой закрыт.

Схема подключения полумостового СЭК2 к нагрузке приведена на рис. 4.

В нагрузке отсутствуют токи утечки (около 1 мА), характерные для МОП транзисторов, поскольку нагрузка шунтирована открытым транзистором с сопротивлением, всегда значительно меньшим величины нагрузки. СЭК2 позволяет работать с нагрузкой, подключенной как к верхнему, так и к нижнему уровню.

Структурная схема мостового СЭК2, предназначенного для управления реверсом нагрузки при работе в режиме драйвера двигателя и состоящего из двух полумостовых СЭК2 представлена на рис. 5. Управление ВУ поданное на вход СЭК2, определяет состояние открытого (например верхнего транзистора левого полумоста), а управление не ВУ обеспечивает открытие нижнего транзистора правого полумоста, что и определяет направление тока в нагрузке. Инверсное управление полумостами изменяет ток в нагрузке на противоположный. Отключение тока в нагрузке осуществляется исключением инверсий управляющих сигналов.

Вариант схемы СЭК мостового типа с дополнительными транзисторами (рис. 6).

### Структура электрической схемы СЭК

Наибольший интерес представляет структурная схема полумостового СЭК, так как один из выходных транзисторов (рис. 3) при включении всегда работает в режиме ключа (открыт или закрыт), что предотвращает утечки тока закрытого транзистора. Данная схема эффективна как при малых, так и при больших токах. Питание узла устройства управления производится отдельно, с 5 В постоянного тока. Все входные сигналы управления, как и выходные сигналы, логического уровня. Выходные сигналы «Статус» и «Контроль» оперативно диагностируют и контролируют состояние СЭК. Установки уровня перегрузки СЭК осуществляются последовательным кодом в долговременную встроенную память уровня по последовательному интерфейсу линии «Установка». Силовые цепи СЭК гальванически развязаны от цепей установки и управления. Установка типов силовых транзисторов определяется величиной коммутируемого тока.

С увеличением коммутируемого тока в момент отключения силового ключа возрастает ЭДС самоиндукции, которая может достигать нескольких сотен вольт. Кроме обвязки коммутируемой нагрузки и привязки СЭК к цепям питания шунтирующими диодами, для рекуперации напряжения требуются ограничительные ЭРИ, защищающие выходной транзисторный ключ от кратковременного перенапряжения, и другие технические решения, в том числе аппаратные, предназначенные для снятия перенапряжения цепи и выравнивания бросков напряжения. Схема управления реализована с применением интегрированного БМК для снижения количества дискретных ЭРИ.

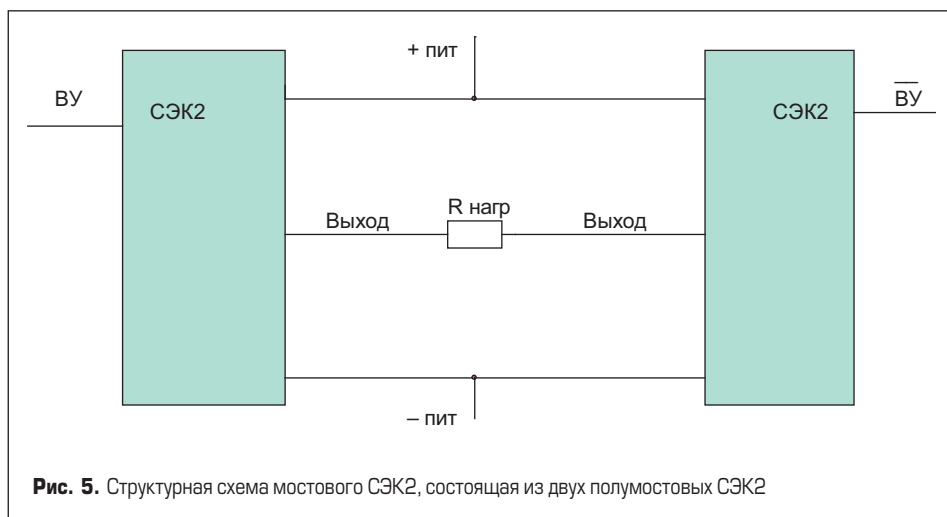


Рис. 5. Структурная схема мостового СЭК2, состоящая из двух полумостовых СЭК2

### Облик конструктива

Конструктив представляет собой модуль с планарными (или штырьковыми) выводами, состоящий из двух печатных плат, расположенных одна над другой, с внешним пластмассовым кожухом. Основание модуля (нижняя печатная плата на металлической основе) с внешней стороны является тепловым отводом, а с внутренней — местом установки силовых кристаллов транзисторов, резистора-шунта, датчика температуры и силовых выводов.

На верхней плате расположены элементы схемы управления с выводами для безразъемного внешнего подключения и перехода на нижнюю плату.

Все ЭРИ, устанавливаемые на платы, утоплены в колодцы, организованные на печатных платах. Платы соединены без зазоров. Крепление модуля осуществляется за «уши» к внешней конструкции с целью теплового отвода. Подвод управляющих и силовых цепей выполнен гибкими планарными выводами. Кроме того, необходимо принять конструктивные меры по обеспечению электромагнитной защиты логических цепей управления от влия-

ния импульсных магнитных полей, создаваемых силовыми цепями коммутации.

### Функциональная работа и самоконтроль СЭК

При включенном питании и отсутствии управляющего внешнего сигнала (ВУ) СЭК находится в исходном режиме с диагностированием уровня ответного сигнала «Статус». На фоне сигнала «Статус» присутствует инверсный ответный сигнал «Перегрузка». При наличии тока в исполнительной цепи без сигнала ВУ сигнал «Статус» отсутствует и формируется сигнал «Перегрузка». В случае если корпус СЭК перегревается до предельных температур и в исполнительной цепи отсутствует ток, то на время наличия температуры активируется только сигнал «Перегрузка». Перед включением сигнала ВУ в СЭК устанавливается код, соответствующий порогу срабатывания уровня, если предварительная его установка отличается от предыдущей и не соответствует требуемой величине. Изменение уровня порога срабатывания может проводиться и во время действия сигнала ВУ.

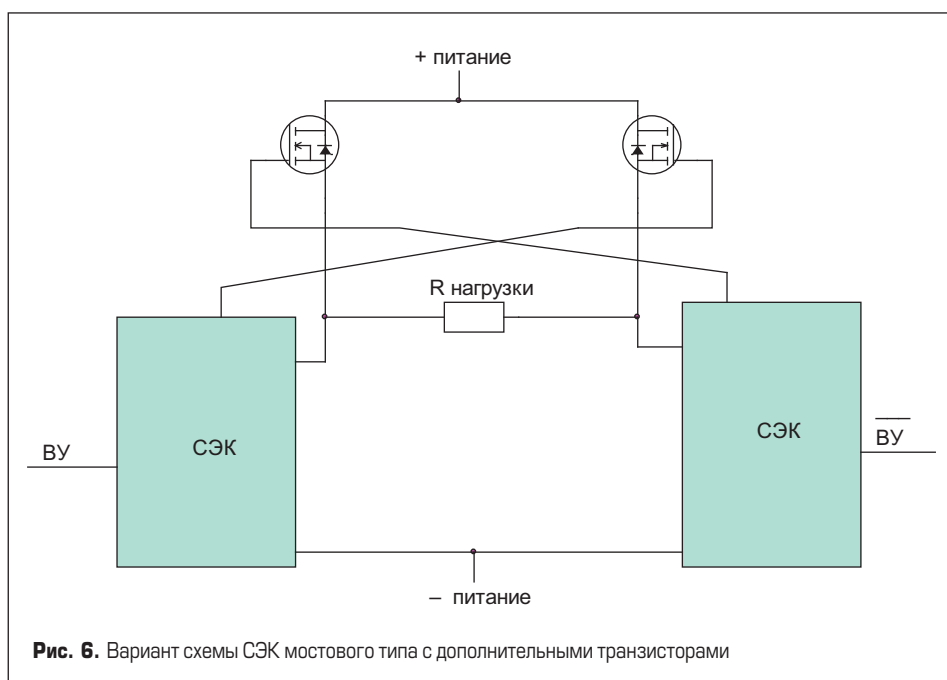


Рис. 6. Вариант схемы СЭК мостового типа с дополнительными транзисторами

При включенном сигнале ВУ и наличии рабочих токов в силовой цепи в диапазоне рабочих температур формируется сигнал «Статус» без сигнала «Перегрузка». При включенном сигнале ВУ и наличии токов перегрузки в силовой цепи формируется сигнал «Перегрузка» и снимается сигнал «Статус», который снимает и сигнал ВУ.

### Заключение

В дискретном исполнении СЭК представляет собой более гибкую структуру, чем на базе микропроцессора. Жесткая логика управления, минимальное время отклика на режимы перегрузки, контроль порогового уровня защит имеют значительные преимущества по времени отклика, надежности, себестоимости и технологичности применения — таковы преимущества изделий дискретного исполнения, если сравнивать их с устройствами, выполненными на базе традиционных программируемых микропроцессоров (МП). Происходит это по ряду причин, в которых основной является нерационально используемый ресурс МП. Микропроцессор должен постоянно работать в режиме АЦП и отслеживать аналоговый уровень с датчика тока, переводя его в цифровую форму для последующего преобразования и передачи порога

в МП верхнего уровня. Очень важно, чтобы время преобразования не превышало 1 мкс. Данные условия требуют применения схемных решений, исключающих возможность потери информации на время 1 мкс и менее, особенно на момент возникновения КЗ. При перегрузке СЭК по КЗ происходит резкое увеличение тока, которое может существенно отличаться от номинального значения ключевого транзистора. Для всех кристаллов транзисторов это время не должно превышать 10 мкс. В течение данного периода необходимо закрыть силовой транзистор, чтобы исключить возникновение необратимых процессов.

Есть сложности и с датчиком тока на базе датчика Холла, нижний рабочий диапазон температур которого в настоящее время не превышает  $-40^{\circ}\text{C}$ . Как показывает практика, при переводе аппаратной реализации устройства на микропроцессорное управление не происходит снижения себестоимости (цены) ТКН-01. Наоборот, цена возрастает в 1,5–2 раза.

Уменьшение массогабаритных характеристик — это эволюционный путь развития для силовых модулей, который должен заключаться в использовании бескорпусной силовоточной элементной базы (транзисторов), перспективной технологии изготовления силовых узлов и обязательной герметизации.

Силовой транзистор и шунт одинаковы во всех исполнениях СЭК данного типа. При этом устойчивая работа в составе блока всегда обеспечивается привязкой выводов силовой коммутации к шинам питания с помощью дополнительных диодов. С точки зрения надежности силовой транзистор испытывает наиболее тяжелый режим в момент размыкания силовой цепи, когда необходимо обеспечить надежное запирающее действие силового транзистора и бороться с выбросами напряжения самоиндукции в силовой цепи.

Не последний вопрос и проверка работоспособности. При изготовлении СЭК существует достаточно большой объем контролируемых параметров. Для всестороннего тестирования устройства требуется автоматизированная контрольно-проверочная аппаратура, поскольку без нее проверка становится выборочной и неполной.

### Литература

1. Н. Абрамов. Основные параметры и особенности применения твердотельных реле // Компоненты и технологии. 2005. № 6.
2. С. Волошин. Отечественным твердотельным реле — быть // Компоненты и технологии. 2004. № 4.