

Ключи к возрождению производства российской силовой электроники

Часть 3

Выделены и рассмотрены отдельные функциональные узлы, которые позволяют решить основные задачи системы управления силовых преобразовательных устройств. Для предлагаемых унифицированных узлов приводятся практические примеры их схемной реализации. Проведенный анализ позволил составить перечень узлов и функций, определяющих архитектуру драйвера нового поколения для силовых преобразователей средств вторичного электропитания.

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

Во второй части статьи [1] было проанализировано несколько типовых схем драйверов различных фирм (Mitsubishi, TI, IR, Vishay, Semikron, «Электрум АВ» и др.) для управления силовыми ключами (СК): MOSFET и IGBT. Рассмотрены структурные схемы драйверов, способы расчета энергии для формирования управляющих импульсов для затворов электронных ключей (ЭК) и другие особенности и отличия в применяемых узлах и системах для управления группами электронных ключей как верхнего, так и нижнего уровня.

Показано, что целесообразно выделить ряд функций, которые отвечают за узлы управления режимами рабочего процесса всего силового устройства (СУ), с тем чтобы их сосредоточить в системном командном блоке, который назван блоком управляющих функций (БУФ).

Дальнейший анализ структур многофункциональных изделий, то есть силовых модулей и узлов на основе гибридной технологии для систем вторичного электропитания (СВЭП), показывает, что в принципе можно выделить еще один важный узел, который всегда применяется в СУ различного назначения. Речь идет об узле, который осуществляет закон регулирования электронного силового ключа, который называется модулем управления (МУ). Кроме того, существует еще один важный узел, задача которого — непосредственное управление и формирование сигналов, подаваемых на затвор ЭК для его оптимального включения и отключения. Это драйверы для силовых электронных ключей, которые мы обозначим как Др.ЭК.

Итак, мы имеем три типа устройств, которые, работая совместно, практически обеспечивают оптимальное управление для специальных силовых изделий, входящих в СВЭП. В нашем случае это СУ следующих типов: мощный блок питания (БП); источник бесперебойного питания (ИБП), который обычно включает в себя высокочастотные преобразователи, конвертеры (DC/DC) и инверто-

ры (DC/AC); системы управления электроприводом различного назначения и т. п. К этому классу также относятся типовые унифицированные модули и узлы для аппаратуры, которая включает в себя различные корабельные агрегаты: инверторы однофазные и трехфазные, мощные БП, блоки зарядки аккумуляторных батарей и др. Все эти изделия могут входить в состав аппаратуры, устанавливаемой на кораблях ВМФ и судах торгового флота. В статьях [2, 3] представлен типовой набор устанавливаемого электронного оборудования на несущий носитель (корабль или судно). Причем это оборудование может быть синтезировано с помощью разного вида унифицированных узлов, выпускаемых на специальных серийных заводах.

Напомним, что этот метод проектирования новых корабельных комплексов, в которые входят различные средства вторичного электропитания, позволяет производить оперативную плановую модернизацию изделий по мере развития и совершенствования элементной базы и современных технологий, применяемых при производстве унифицированных узлов и приборов СВЭП.

Перечень системных функций, которые должны быть сосредоточены в БУФ

БУФ формирует и определяет команды и алгоритмы, которые в основном обеспечивают выполнение тактико-технических требований СУ, выполняющего определенные задачи в комплексе РЭА военного или коммерческого назначения. К этим функциям и устройствам можно отнести:

- Аппараты и устройства для подключения СУ к первичной сети, элементы защиты от аварий при нештатных параметрах первичной питающей сети. Кроме того, сюда обычно включают входные фильтры подавления радиопомех для сетей переменного тока и силовые выпрямители. При необходимости осуществляется коммутация и запуск

системы коррекции коэффициента мощности (ККМ). Это сглаживающие фильтры, на выходе которых образуется постоянное высокое напряжение до 400 В при однофазной сети с номинальным напряжением 220 В и до 670 В — при трехфазной сети с номинальным напряжением 380 В.

- Коммутация, контроль параметров и переключение входных фидеров основного ввода переменного напряжения на дополнительную резервную трехфазную сеть. В первичной сети постоянного напряжения, которая применяется, например, для подвижных носителей или бортовых систем, как корабельного оборудования, так и для летательных аппаратов, также применяется подключение резервной сети постоянного тока с номинальным напряжением соответствующего значения, которое задано в технических условиях на каждый тип изделия. Например, аппаратура систем связи может иметь первичные системы постоянного тока напряжением 24; 48 и 60 В.
- Узлы и блоки СУ должны обеспечивать формирование алгоритма оптимального, безопасного, плавного (комфортного) запуска (включения), а также безопасного (программируемого) процесса выключения изделия. Подробно эти вопросы для блоков питания на основе высокочастотных преобразователей рассмотрены в [4]. В данном случае речь идет о том, чтобы в переходных процессах параметры тока, напряжения и мощности в ЭК не превышали предельно-допустимых значений, приведенных в паспортных данных. При этом в предельных параметрах отклонения основных нормируемых величин, например напряжения в момент коммутации, должен быть запас для предельного параметра ЭК. Например, по импульсу допустимого тока он должен быть не менее 10–15%.
- Контроль параметров входной сети по граничным критериям отклонения. Например, контроль количества фаз, частота (диапазон допустимых изменений), величина входного напряжения (эффективное значение). Защита от импульсных (паразитных) высоковольтных выбросов на входных клеммах сети. В особых случаях — контроль допустимого отклонения выпрямленного силового постоянного напряжения (U_0). При обнаружении критичных отклонений (максимального или минимального) необходимо, чтобы был сформирован сигнал «запрет» на включение СУ (в виде индикации нештатного отклонения параметра сети или кода ошибки запуска), выдано специальное сообщение о невозможности включения изделия и перечислены возможные причины отказа.
- Контроль превышения интегральных токовых параметров, которые могут быть обнаружены в общем токе потребления, от промежуточного звена постоянного тока. Причем этот параметр, как правило, должен превышать допустимый уровень на 15–20%. Такое обстоятельство может быть следствием повышенного тока нагруз-

ки выше номинала или дефектов в силовых компонентах преобразователя. В том числе и в результате несанкционированных замен отдельных силовых элементов преобразователя, например при использовании низкочастотных диодов в выходном высокочастотном выпрямителе.

- Отметим, что режим аварийного короткого замыкания в нагрузке (КЗ) должен регистрироваться в БУФ, в то время как основная функция ограничения тока и потеря мощности в ЭК должна быть сосредоточена в МУ и Др.ЭК. Выход из этого опасного режима должен быть реализован совместной процедурой повторного включения изделия в блоке БУФ путем специального плавного (осторожного) запуска, например заданием минимальных токовых режимов работы ЭК в узлах МУ и Др.ЭК.
- При заданных параметрах повторных включений СУ, как правило, контролируется время действия КЗ, а также общий перегрев внутри изделия, либо количество замыканий за один цикл работы. Например, после трехкратного КЗ в течение 30 мин. или меньшего интервала времени контроля аварии изделие должно быть отключено от первичной питающей сети. При этом формируется и индицируется сигнал «Авария» и код ошибки отдельных узлов или электрических параметров.

Перечень основных функций, которые должны быть сосредоточены в МУ

Как известно, модуль управления выполняет интеллектуальные функции реализации закона управления (способа регулирования) процедурой включения/отключения силовых электронных ключей. В ряде случаев должна соблюдаться определенная система управления отдельными группами ЭК, например при работе на силовой трансформатор преобразователя.

- Организация подачи напряжения электропитания на МУ.

Если в СУ имеется вспомогательный источник питания собственных нужд (Вс.ИП), то его можно использовать для снабжения энергией МУ. Так как требования к этому источнику вторичного электропитания (ИВЭ) в части максимальных, а также минимальных значений выходного напряжения более жесткие, то необходимо на входе клемм питания МУ установить специальное электронное устройство коммутации (ЭУК). Его задача — обеспечить подачу напряжения питания МУ скачком (не плавно) с уровня максимально допустимого напряжения. ЭУК должен иметь гистерезис, при котором обеспечивается отключение питания МУ скачком при минимальном (недопустимом) напряжении. Это необходимо для того, чтобы все функции управляющей интегральной микросхемы (контроллера) (ИСК) работали только при оптимальном допуске питающего входного напряжения.

Если по структуре силового блока питания или другого СУ контроллер МУ привязан

к потенциалу выпрямленного высокого сетевого напряжения, например к выводу $-U_0$, то для питания МУ должен быть разработан отдельный Вс.ИП, который имеет выходное напряжение 20–25 В, гальванически развязанное от силовой сети. В этом случае минус питания МУ может быть привязан к точке $-U_0$. Для этого варианта питания МУ узел ЭУК также привязывается к $-U_0$.

- Дистанционное включение/отключение (нормированный сигнал).
- Плавный подъем выходного силового регулируемого параметра напряжения (или тока), например для БП.
- Задание основных критичных параметров ИСК.

Для систем с ШИМ [4]: рабочая частота — $F_{\text{ШИМ}}$; минимальная длительность импульса управления — $t_{\text{и, min}}$; максимальная длительность импульса управления — $t_{\text{и, max}}$.

Для систем с ЧИМ, например с квазирезонансным методом регулирования (КвРП) [5]: максимальная частота преобразования — F_{max} ; минимальная частота преобразования при работе защиты по току и КЗ — F_{min} ; номинальная длительность входного импульса управления ЭК — $t_{\text{и, ном}}$.

- Задание параметров электронной, автоматической защиты по току через ЭК.
- Порог защиты от перегрузки по току.

Порог интегральной (инерционной) защиты по току перегрузки, который определяется либо по количеству срабатываний за единицу времени, либо по сигналу от датчика температуры, который установлен на теплоотводящем радиаторе для ЭК или на корпусе самого электронного прибора. Этот сигнал должен приводить к отключению СУ, например через узел БУФ.

- Сигналы обратной связи (ОС) с выхода СУ.

Если МУ привязан к выходному стабилизируемому параметру, например напряжению ($-U_{\text{вых}}$), то сигнал ОС может быть гальванически связан с ИСК через специальный делитель напряжения, причем ниже плечо этого делителя должно быть согласовано с уровнем опорного напряжения усилителя ОС ИСК.

Если напряжение $U_{\text{вых}}$ изделия находится под внешним потенциалом, например, специального СВЧ-прибора (нагрузки), то сигнал ОС поступает на ИСК через развязывающий оптрон (диодный или транзисторный). При этом допустимое напряжение изоляции оптрона должно быть выше максимального потенциала клеммы $U_{\text{вых}}$ не менее чем в 1,5–2 раза.

- Выходные управляющие сигналы МУ.

Как правило, ЭК находится под потенциалом выпрямленного сетевого напряжения либо под «плавающим» потенциалом, который изменяется в зависимости от того, включен или отключен силовой прибор нижнего или верхнего уровня. Поэтому в общем случае МУ должен подавать на вход Др.ЭК сигнал управления через развязывающий оптрон.

Если МУ предназначен для управления группой мощных силовых модулей (СМ), каждый из которых представляет собой отдельное функциональное СУ, то тогда сигнал МУ поступает на промежуточные типовые

узлы, которые формируют сигналы сдвига по фазе ($U_{3\phi}$) для каждого СМ. Например, сигнал МУ поступает через $U_{3\phi,1}$ на первый блок СМ1. С заднего фронта импульса управления $U_{3\phi,1}$ формируется сдвиг в $U_{3\phi,2}$, который поступает на СМ2, и так происходит до тех пор, пока не будет включен последний блок — СМN. После этого сигнал с МУ снова поступает на блок СМ1 и процесс последовательного запуска силовых модулей повторяется. Пример применения такой структуры для источника бесперебойного питания описан в [6].

Перечень основных функций, которые должны быть сосредоточены в Др.СК

На схему Др.ЭК следует подать следующие сигналы:

- Напряжение питания, обычно 20–25 В [1], которое необходимо для нормального функционирования всех узлов и элементов, входящих в схему Др.ЭК.
 - Входной управляющий импульс, получаемый от МУ через узел гальванической развязки (оптрон).
 - Токковый сигнал, который может быть встроен в корпус ЭК в виде отдельного выхода, например типа токовое зеркало, который развязан от выводов основного кристалла силового прибора.
 - Напряжение насыщения (к-э) для IGBT или падение напряжения на переходе $R_{DS(on)}$ в режиме открытого MOSFET, которое подается на соответствующий вход Др.ЭК через развязывающий высоковольтный диод.
- Задачи, решаемые схемой Др.ЭК:
- Преобразование параметров входного импульса управления. Путем изменения ширины импульса для систем ШИМ при постоянной частоте преобразования $F_{ШИМ}$ или путем изменения частоты преобразо-

вания $F_{пр}$. при постоянной длительности импульса управления ЭК в системе ЧИМ. С помощью усилительных и согласующих узлов, входящих в Др.ЭК, формируются оптимальные входные импульсы включения (отключения), которые подаются на затворы ЭК преобразователя.

- Контроль возникновения перегрузки по току в ЭК, который в некоторых случаях может подаваться на вход МУ.
- Контроль чрезмерного роста величины остаточного напряжения на открытом ЭК, который может быть вызван, например, режимом возникновения КЗ в нагрузке преобразователя. При этом должен быть запущен специальный алгоритм повторных включений (отключений) силовых ключей или всего СУ, который обеспечивает плавное (с минимальных токов в ЭК) включение при постоянном контроле остаточного напряжения на переходе насыщенного ключа, до восстановления нормального режима работы ЭК после устранения режима КЗ.

Следует подчеркнуть, что задача выхода из этого аварийного режима должна решаться комплексным взаимодействием всех блоков и узлов управления: БУФ, МУ и Др.ЭК. Так как именно в этом случае могут быть оптимизированы функции этих узлов, с тем чтобы избежать увеличения объема избыточного функционального ресурса в каждом отдельном узле управления.

Практические примеры структур и схем отдельных унифицированных узлов

Модуль управления

Рассмотрим схему МУ для варианта преобразователя на основе метода КвРП, которая представлена на рис. 1. Автор применял ее в [6, 7].

Как видно на рис. 1, питание МУ обеспечивается от напряжения E_0 ; клемма 2 на печат-

ной плате (кл. 2). Это напряжение поступает от специального блока ИВЭ — Вс.ИП.

Напряжение E_0 поступает на узел ЭУК, который обеспечивает первоначальный запуск МУ от максимального значения $\approx 19\text{--}20\text{ В}$ E_0 , величина которого задается стабилизатором V5. В качестве ИСк (D1 на рис. 1) в предлагаемой схеме МУ использована микросхема КН1055ЕУ5 [1]. Входное питание для микросхемы, которое подается на вывод (+ $U_{п}$) ИСк, формируется с помощью параметрического стабилизатора напряжения (стабилизатор V5.1 и транзистор V6) $\approx 11\text{--}12\text{ В}$, при допустимом значении $7\text{ В} \geq U_{п} \leq 16,5\text{ В}$. Напряжение обратной связи с выхода преобразователя СУ подается на МУ (кл. 7, 8) через узел гальванической развязки (диодный оптрон) V8. Выходной управляющий импульс U_y формируется на клеммах 4–5.

Параметры U_y : не менее 11 В при $U_{п} = 12\text{ В}$, выходной (средний) ток — не более 50 мА, а импульсный ток — не более 400 мА при скважности $Q > 10$ и 150 мА при $Q > 4,5$. Сигнал защиты от перегрузки по току поступает на клеммы 6 и 1. ИСк начинает нормально функционировать после подачи сигнала U_{min} (кл. 3, 1). Этот сигнал, например, может поступать от постоянного напряжения U_0 . Включение ИСк можно разрешить только при достижении такого уровня напряжения U_0 , которое будет равно минимально допустимой величине, определяемой значением, заданным в технических условиях (ТУ). Например, оно может быть задано в виде наименьшего входного допуска напряжения первичного источника сетевого напряжения. Это означает, что если в момент включения СУ напряжение сети окажется меньше допустимого по ТУ, то преобразователь или блок питания не будет запускаться, а включение изделия произойдет только тогда, когда напряжение сети войдет в норму.

При запуске преобразователя обеспечивается плавный подъем выходного стабилизи-

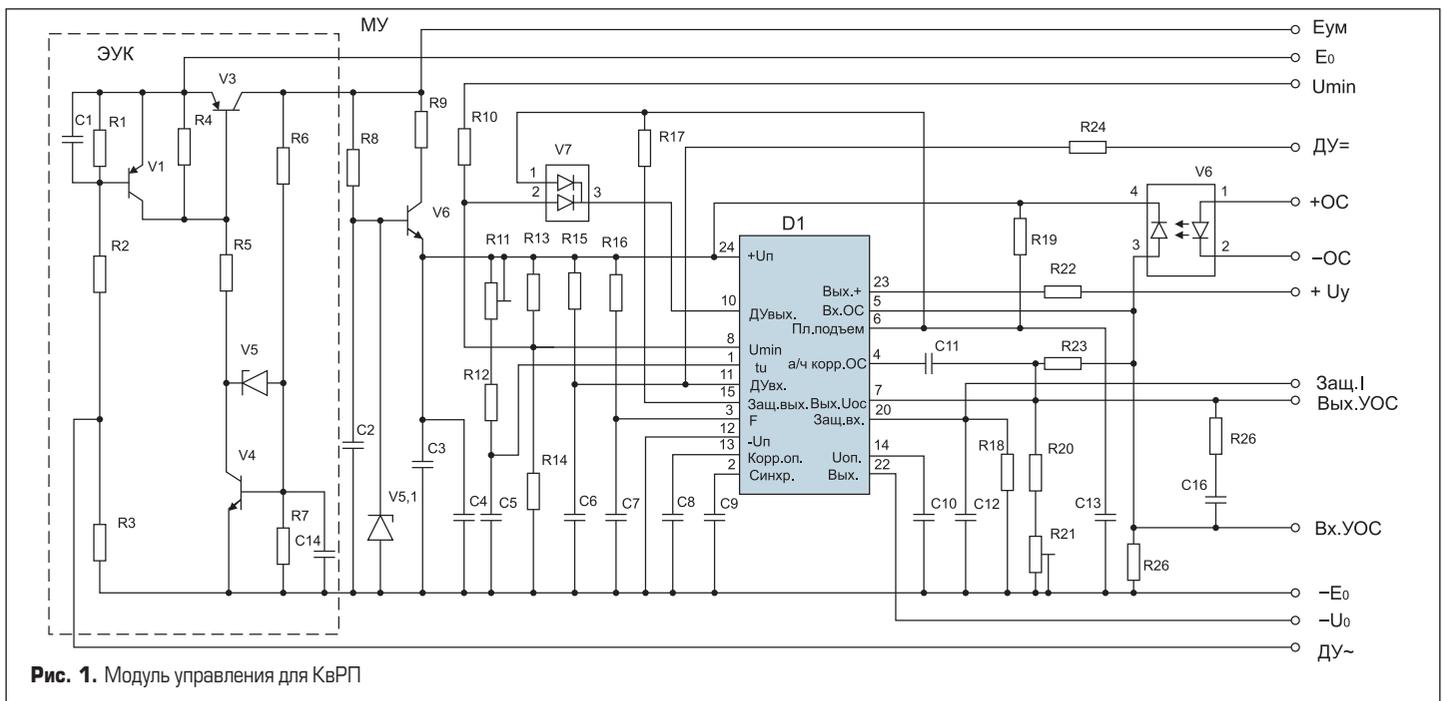


Рис. 1. Модуль управления для КвРП

руемого параметра (вывод 6) ИСк, задаваемый элементами R19, C13. При этом обеспечивается плавное изменение рабочей частоты $F_{пр}$ от минимального до номинального значения, которое определяется соответствующими режимами параметров нагрузки и питающего преобразователя напряжения U_0 . Длительность импульса U_y определяется элементами R11, R12 и C5, а максимальная частота $F_{пр}$ — конденсатором C7. Коррекция усилителя обратной связи (выводы 7, 5 ИСк) осуществляется элементами R26 и C15, а ВЧ-коррекция (выводы 7, 4) — конденсатором C11.

Цепь дистанционного управления (включение/отключение) МУ — (кл. 9, 1 ДУ₊ и кл. 12, 1 ДУ₋) служит для запуска преобразователя или его экстренного выключения внешним сигналом, например с помощью контакта реле. Это необходимо при включении резервного блока, в случае аварийной ситуации при работе штатного блока. При этом вначале необходимо выключить аварийный блок, а затем произвести запуск резервного блока. Согласно ТУ сигнал ДУ₊ для включения должен быть не более 0,4 В, а для отключения — не менее 2,4 В при $U_{н} = 12$ В. Отметим также, что при каждом включении МУ в начале заряда конденсатора C6 (порог 0,4 В) происходит обнуление конденсатора плавного подъема C13 через диод 1–3 сборки V7 и вывод 10 ДУ_{вых} (открытый транзистор в ИСк). По мере повышения напряжения на C13 до уровня 3–4 В возрастает потенциал на катоде диода 2–3 V7, а диод 1–3 запирается. При этом начинается процесс плавного подъема частоты $F_{пр}$.

В модуле предусмотрен также режим дистанционного управления (кл. 12, 1 ДУ₋) путем замыкания/размыкания резистора R3, то есть

подачей питания на МУ через узел ЭУК. Состав компонентной базы МУ и особенности конструкции печатной платы приведены в статье [1].

Источник питания собственных нужд Вс.ИП

Схема Вс.ИП представлена на рис. 2.

Как видно на рис. 2, источник питания подключен к однофазной сети переменного напряжения с номинальным напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Переменное напряжение поступает на устройство входной сетевой выпрямитель (Вх.СВ), который включает в себя элементы защиты и ограничения импульсного тока при включении (F1, R1). Кроме того, в него входит диодный сетевой выпрямитель, а также элементы для снижения уровня радиопомех, излучаемых в сеть (сборка конденсаторов C1 типа K73-49 и L1 — дроссель для подавления несимметричных помех). На выходе Вх.СВ установлен электролитический конденсатор C2, сглаживающий пульсацию выходного постоянного напряжения.

В схеме Вс.ИП использован в качестве преобразующего устройства силовой однотактный преобразователь-конвертер, выполненный по структуре КвРП, с одним ЭК, — V7 (MOSFET типа КП707В), который имеет схему фиксации выброса напряжения, возникающего после выключения транзистора. Напряжение фиксации определяется значением коэффициента трансформации K_{W3-4} обмотки W_{3-4} силового трансформатора T1. То есть $K_{W3-4} = W_{3-4} / W_{1-2}$, где в числителе и знаменателе приведены данные по количеству витков в соответствующих обмотках. При правильном соотношении витков,

то есть значения K_{W3-4} , напряжение фиксации, определяемое величиной напряжения на конденсаторе C9 при максимальном входном сетевом напряжении 220 +20% В, должно быть в пределах 23–25 В. В этом случае пик напряжения на силовом транзисторе V7 должен быть не более 720 В.

Данные в ТУ на транзистор КП707В следующие: $U_{DSS} = 800$ В (-10... +100 С); $R_{DS(on)} = 3$ Ом; импульсный ток $I_{DM} = 7$ А при $t_{и} = 60$ мкс, $Q \geq 200$. Корпус — КТЮ-3-20.

Поясним схему запуска конвертера. После включения сетевого напряжения начинается зарядка конденсатора C2 фильтра постоянного напряжения, которое мы обозначим U_0 . Одновременно с этим начинается зарядка конденсатора C9 через резистор пусковой цепи (ПЦ) R3. Напряжение на C9 формирует значение параметра E_0 , которое является входным питанием для МУ. Когда это напряжение достигает величины ≈ 19 –20 В, включается схема ЭУК, и МУ начинает работать в штатном режиме. Причем работа модуля управления начинается в тот момент, когда напряжение U_0 достигнет значения ≈ 150 В, которое задается резистором R2. При этом подается сигнал на клемму 3 МУ и далее попадает на вывод 8 ИСк, который является входом для защиты от пониженного входного напряжения.

Подчеркнем, что запуск конвертера должен начаться при напряжении E_0 , большем, чем точка запуска ЭУК, то есть ≈ 24 –25 В. В связи с этим в момент запуска МУ, когда появляются импульсы управления U_y для V7 и начинает работать конвертер, в первый момент времени конденсатор C9 заряжается от обмотки W_{5-6} , напряжение на которой на 30% выше, чем на W_{3-4} . Это позволяет накопить такой уро-

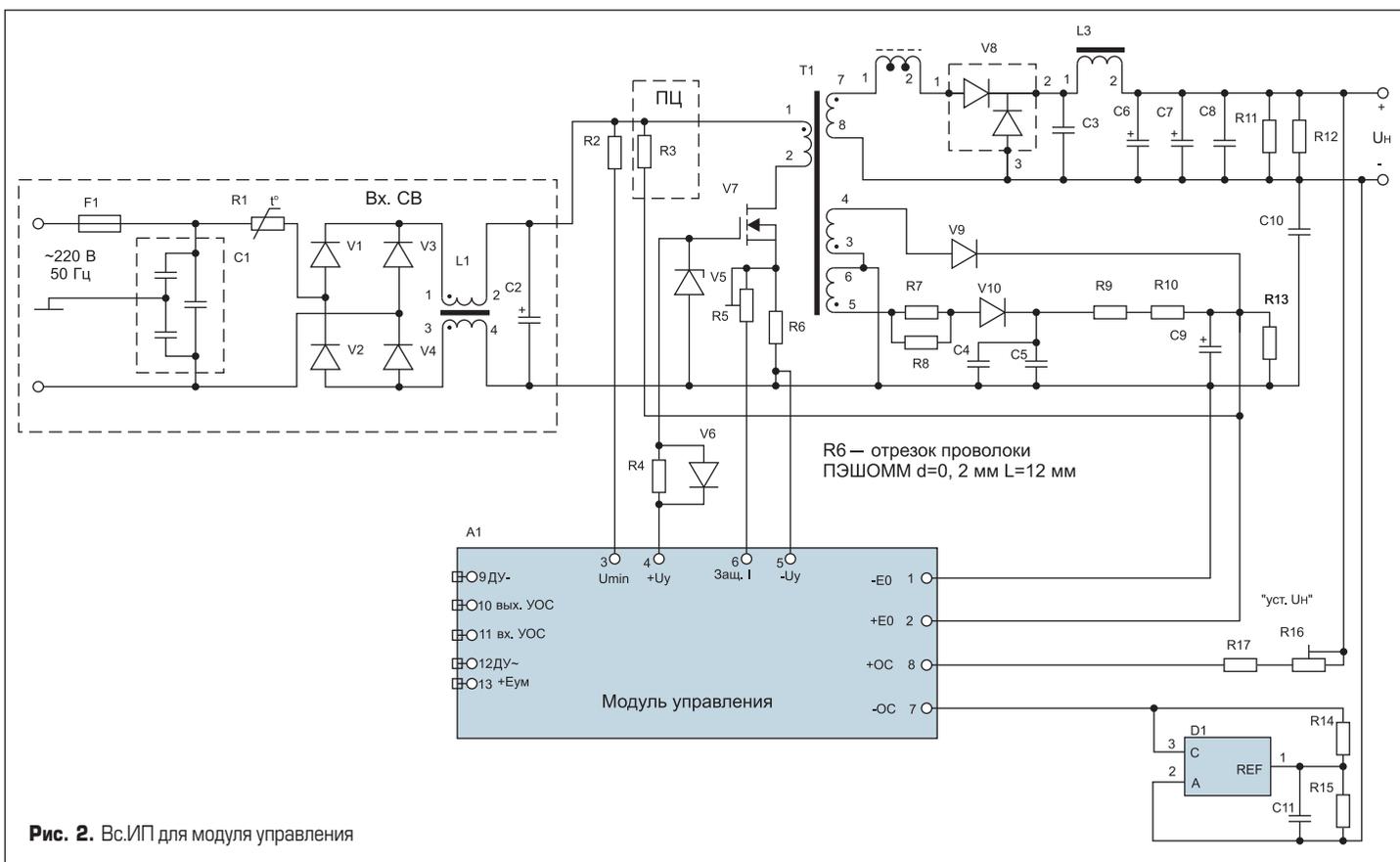


Рис. 2. Вс.ИП для модуля управления

вены энергии в конденсаторе С9, чтобы можно было успешно осуществить запуск Вс.ИП при минимальном входном сетевом напряжении и номинальном токе нагрузки на его выходных клеммах U_H .

Основной выход Вс.ИП запитан от силовой обмотки W_{7-8} . В этой цепи последовательно включен дроссель L2, индуктивность которого суммируется с индуктивностью рассеяния, приведенной к вторичной обмотке трансформатора. Появление такого дросселя объясняется сложившейся практикой разработки СУ на основе КвРП. Дело в том, что при разработке преобразователей такого типа возникает вопрос проектирования специального силового трансформатора, который должен иметь заданную (нормируемую) величину индуктивности рассеяния L_s . Эта индуктивность L_s совместно с резонансным конденсатором С3 образует колебательный контур с резонансной частотой F_p , от которого зависят параметры полуволны силового тока через ЭК. В конечном итоге полупериод этой частоты в основном определяет длительность рабочего импульса t_H ЭК и, соответственно, максимальную частоту F_{np} в системе ЧИМ.

При разработке силового трансформатора расчетно-опытным путем выбирают специальную топологию и конструкцию его основных обмоток. Это делается таким образом, чтобы получить заданное, расчетное значение L_s . Необходимо отметить, что строгое выполнение всех операций и технологии изготовления в серийном производстве этих трансформаторов позволяет получить для мощных образцов с габаритной мощностью $P_{таб.}$ от единиц до десятков кВ·А повторяемость параметра L_s в пределах 5%. Поэтому при настройке преобразователей для точной установки длительности t_H и максимальной частоты F_{np} в цепь резонансного контура устанавливают (последовательно) дополнительный дроссель (малой мощности) с несколькими отводами для возможности выбора параметра его индуктивности, чтобы обеспечить расчетное значение F_p . На практике индуктивность этого дросселя обычно составляет 5–10% от величины индуктивности рассеяния, приведенной к вторичной обмотке трансформатора (L_{s2}). Разумеется, для маломощных блоков питания типа Вс.ИП индуктивность дополнительного дросселя может составлять до 20% от L_{s2} , что вполне объяснимо малыми потерями мощности в таком дросселе, например L2 (рис. 2).

После конденсатора С3 на выходе Вс.ИП установлен сглаживающий LC-фильтр (дроссель L3 и конденсаторы С6 и С7).

Система стабилизации выходного напряжения U_H работает следующим образом. Напряжение $+U_H$ через резисторы R16 и R17, диод оптрона (кл. 2, 8) МУ, а также источник опорного напряжения ≈ 17 В поступает на вывод $-U_H$. В качестве источника опорного напряжения использована интегральная микросхема КР142ЕН19 (аналог TL431). Потенциометром R16 устанавливается напряжение на выходе Вс.ИП, при этом изменяется ток через диод оптрона, что и является сигналом обратной связи для МУ.

Некоторые дополнительные параметры Вс.ИП и данные компонентной базы:

- $U_H = 20$ В; $I_H = 0,4$ А; $C2 = 22$ мкФ, К50 — 27-450 В; $C3 = 0,022$ мкФ, К10 — 47В-100 В, МП0; $C6 = 33$ мкФ, К53-31 — 25 В; $C7 = 68$ мкФ, К53-16 — 32 В; $C9 = 15$ мкФ, К53-42 — 25В; $C10 = 470$ пФ, К15-5 — 1,6 кВ; $R1 = 130$ Ом.
- Терморезистор ТР1: $R2, R3 = 470$ кОм, С2-33Н-0,5 Вт.
- Потенциометры R5, R16 = 330 Ом, СП3-196-0,5 Вт. Остальные резисторы — типа Р1-12; V1–V4. Диоды — КД247Г.
- V5 стабилитрон КС16-6.
- V8 диодная сборка КД270ЕС.
- Моточные изделия.
 - Трансформатор Т1: $P_{таб.} = 10$ В·А; $F_{пр.макс} = 150$ кГц.
 - Сердечник: феррит М1000НМ3, К16×8×6, $L_{s1} = 760-800$ мкГн.
 - Дроссели: L2 (сердечник: феррит М600НН-32Гт, 11×10×2 мм, 7,6 мкГн); L3 (сердечник: МП-140, К15×7×6,7, L_{μ} — не менее 4,5 мГн).

Усилитель мощности выходного сигнала МУ

Как уже отмечалось в [1], многие фирмы, производящие Др.ЭК, используют принцип формирования выходных импульсов управления для затворов ЭК, который основан на энергии, получаемой от накопленного заряда в специальном «бутстрепном конденсаторе» (БК). Кроме того, в Др.ЭК должны быть дополнительные узлы, выполняющие следующие функции: контроль величины напряжения БК, устройства сдвига уровня (вверх и вниз), в которых используются маломощные высоковольтные транзисторы, а также усилители и согласующие каскады, формирующие импульсы, подаваемые на затворы ЭК.

В этой же работе обоснованно предположение, что вопрос оптимальной структуры усилительного выходного каскада управления ЭК требует дополнительных исследований для конкретного выбора между потенциальной схемой с накопительным конденсатором БК или с развязывающим трансформатором управления Tr_{yn} .

Поэтому, по мнению автора, особый интерес представляет вариант выполнения усилителя мощности (УМ) выходного импульса МУ, который основан на применении в качестве устройства гальванической развязки специальной схемы формирования выходных импульсов управления для затворов ЭК, включающей в себя трансформатор Tr_{yn} .

Как и для всех предыдущих рассматриваемых унифицированных узлов, опишем схему УМ, которая предназначена для конвертера КвРП, силовая часть которого построена по схеме «косого» моста [6]. Как известно, эта структура содержит два силовых ЭК, которые включаются и отключаются одновременно. Причем целесообразно рассмотреть вариант УМ, предназначенный для усиления выходного импульса МУ. От такого УМ получает управление группа мощных унифицированных модулей СМ, каждый из них представляет собой отдельное функциональное СУ.

Как показано выше, в структуру УМ включены промежуточные типовые узлы, которые формируют сигналы сдвига по фазе ($U_{3\phi}$) для включения каждого последующего СМ. Это позволяет в системе КвРП включать каждый последующий СМ через небольшую задержку (Δ) по времени, сразу после завершения полуволны силового тока через ЭК предыдущего силового модуля. Таким образом происходит выравнивание тока потребления от силового мощного выпрямителя промежуточного звена постоянного тока, так как все силовые модули питаются от звена постоянного тока.

Схема УМ представлена на рис. 3.

Схема УМ состоит из двух функционально разных частей. Первая играет роль формирования импульса включения ЭК, импульса сдвига Δ и импульса выключения ЭК. То есть первая часть схемы УМ выполняет функцию сдвига по фазе — $U_{3\phi}$. При этом, как видно на рис. 3, питание E_{ym} на нее поступает от МУ (кл. 13, 1) после узла ЭУК. Основные логические функции этой части схемы УМ выполняются интегральной микросхемой D1, которая состоит из двух моностабильных мультивибраторов с управляемым запуском. Вторая часть схемы УМ выполняет функцию транзисторного импульсного усилителя с трансформаторной нагрузкой на его выходе. Причем питание E_0 на нее поступает от МУ (кл. 2, 1), то есть от Вс.ИП.

Схема УМ работает следующим образом. Выходной импульс МУ U_y подается на вход (кл. 3, 4) УМ, запускается микросхема D1.1, которая формирует рабочий импульс t_H длительностью τ (рис. 3). Передний фронт этого импульса поступает через укорачивающую цепь R3–C2 на включение транзистора V1, который обеспечивает отпирающее напряжение на затворах ЭК. Задний фронт подается на вход второго мультивибратора D1.2, который формирует импульс задержки Δ длительностью $\approx 150-200$ нс. При этом задний фронт импульса Δ с выхода D1.2 поступает через укорачивающую цепь R7–C4 на включение транзистора V2, который обеспечивает запирающее напряжение на затворах ЭК.

От этих двух сигналов и инициируется работа транзисторного импульсного усилителя. Первый импульс включает мощный транзистор V7, в цепи коллектора которого включена нагрузка в виде первичной обмотки W1 импульсного трансформатора Tr_{yn} . На его выходных обмотках W3 и W4 формируются мощные выходные импульсы положительной полярности, гальванически развязанные от импульса U_y с выхода МУ.

Второй импульс включает мощный транзистор V3, в цепи коллектора которого включена нагрузка в виде первичной обмотки W2 импульсного трансформатора Tr_{yn} . На его выходных обмотках W3 и W4 формируются мощные выходные импульсы отрицательной полярности, тоже развязанные от импульса U_y . Отметим также, что одновременно с включением транзистора V3 происходит блокировка включения транзистора V7 с помощью открытого транзистора V4.

С помощью резисторов R17 и R13 устанавливаются расчетные (оптимальные) значения

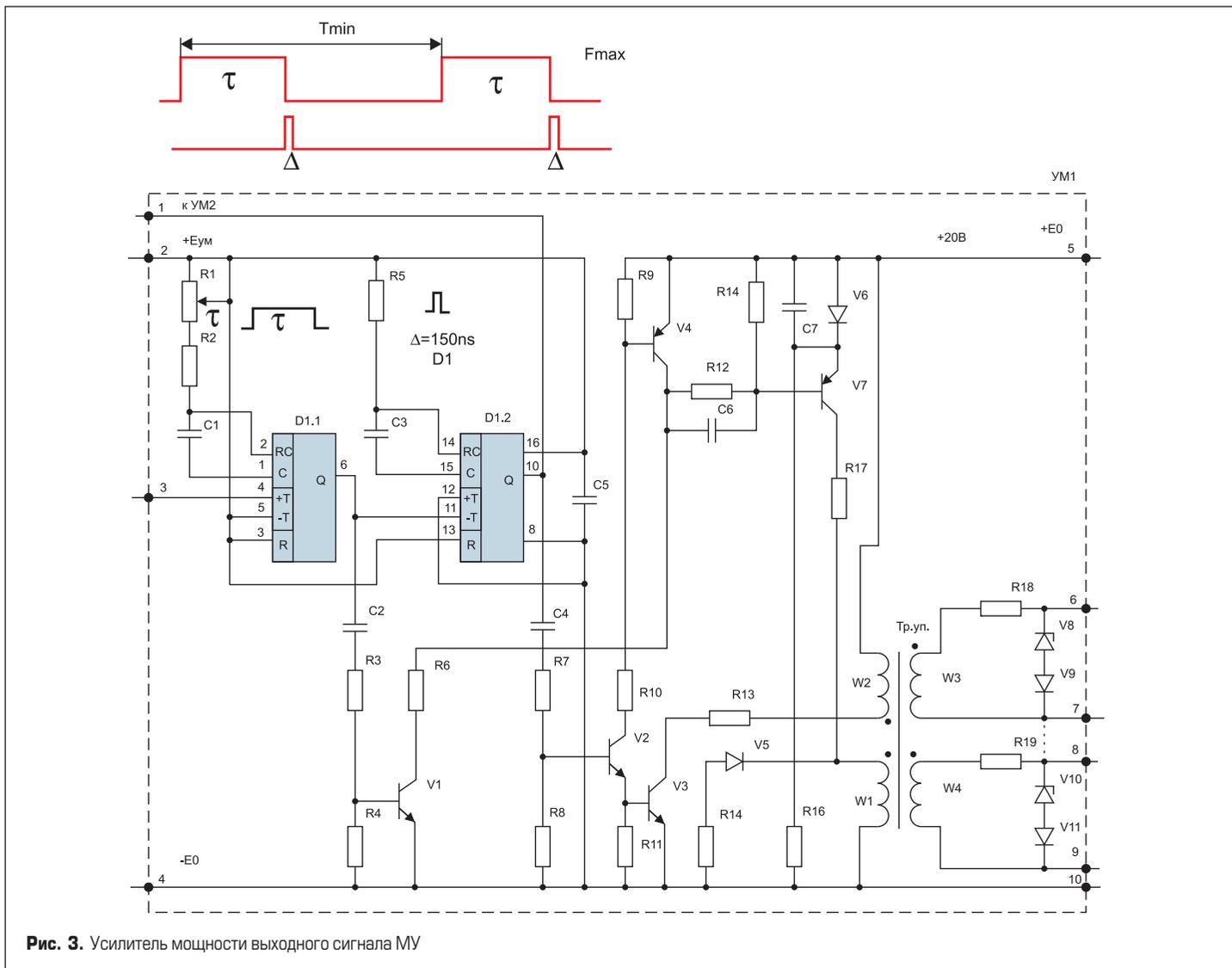


Рис. 3. Усилитель мощности выходного сигнала УМ

напряжения выходных импульсов, как положительной, так и отрицательной полярности соответственно. В результате на клеммах 6–7 и 8–9 образуется импульсное переменное напряжение — $U_{y.з}$.

Некоторые данные компонентной базы УМ:

- Микросхема D1 KP1561AG1.
- Потенциометры: R1 = 10 кОм, СПЗ-196 — 0,5 Вт; R2 = 15 кОм; R5 = 2 кОм; R3, R7 = 3,3 кОм; C1 = 100 пФ; C3 = 47 пФ; C2, C4 = 680 пФ.
- Транзисторы: V1, V2, КТ3130А9; V9, КТ664А9; V3, КТ972А; V7, КТ973А; R18, R19 = 0,5 или 1,0 Ом.
- Демпферная цепь (резистор R14 и диод V5), включенная параллельно обмотке W1; стабилизаторы V8, V10, КС18-6.
- Трансформатор Тр.уп.: $P_{таб.} = 10$ В·А; $F_{пр.маx} = 150$ кГц, сердечник — феррит M1500HM3, K16×8×6.

Поясним функцию резисторов R18 и R19. Они играют символическую роль, так как речь идет об унифицированном узле, предназначенном для параметров управления разного типа ЭК. Поэтому после УМ должен быть еще один узел, играющий роль устройства согласования (Усог.) с конкретными входными характеристиками затворов силовых ключей. Элементы Усог. необходимо оптимально рассчитать для формирования параметров положительного

тока затвора ЭК в процессе его включения и отрицательного импульса для его запирания. Очевидно, что эти параметры определяются выбором конкретного типа ЭК (MOSFET или IGBT). Схема Усог. приведена на рис. 4.

На вход Усог. поступают импульсы $U_{y.з}$ от усилителя мощности. Один импульс поступает от клемм 6–7 на Усог.1, выход которого подключен к первому ЭК1, а от клемм 8–9 — на Усог.2, выход которого подключен ко второму ЭК2. Причем, как было сказано выше, силовые ключи ЭК1 и ЭК2 работают синхронно. Работу узла Усог. мы поясним на примере включения одного из силовых ключей, например ЭК1.

Импульс $U_{y.з}$ поступает от клемм 6–7 УМ на клеммы перехода (З–И), обозначенные знаками + и -. Резистор R1, включенный последовательно с выводом затвора ЭК1, с учетом резистора R18 задает максимальный пиковый (положительный) ток затвора I_{EM} при его включении. Последовательная цепь — диод D1 и резистор R3 — также совместно с R18 формирует пиковый (отрицательный) ток затвора в момент запирания ЭК1. Резистор R3 (150–200 Ом), включенный параллельно переходу З–И, позволяет уменьшить отрицательное напряжение на затворе после выключения ЭК1, а также ускорить разряд остаточной энергии, накопленной во вторичной обмотке W3 Тр.уп. в УМ. Отметим,

что этот процесс протекает одновременно (параллельно) с работой демпфирующей цепи в УМ, подключенной к обмотке W1.

В результате на затворе ЭК1 при его включении образуется положительный импульс длительностью ≈ 120 –150 нс, а в момент его выключения формируется отрицательный импульс ≈ 200 –250 нс.

Во время действия рабочего положительного импульса $t_{и}$ длительностью τ через ЭК1

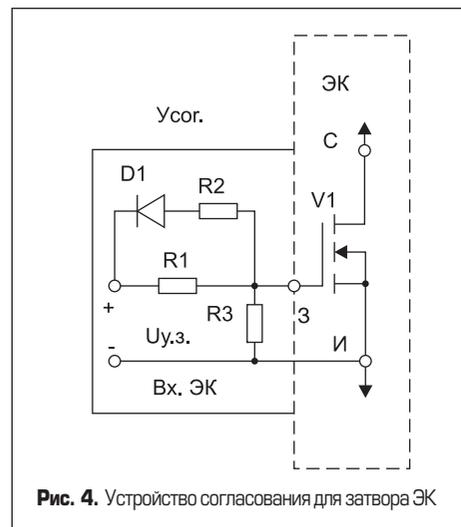


Рис. 4. Устройство согласования для затвора ЭК

протекает полуволна резонансного тока. Задний фронт рабочего импульса $U_{y.z}$ формирует отрицательный импульс, который выключает ЭК1 и удерживает отрицательное (спадающее) напряжение на его затворе практически до конца периода преобразования, то есть до момента очередного появления импульса запуска U_y от МУ.

Итак, описаны примеры схемной реализации четырех унифицированных узлов для системы управления СУ на основе КвРП: МУ, Вс.ИП, УМ и Усог.

Теперь посмотрим на СУ с точки зрения конструирования системы управления для мощного изделия, входящего в СВЭП.

Источник питания Вс.ИП должен быть автономным отдельным блоком. Как показала практика, МУ должен располагаться вдали от мощных силовых элементов. Это объясняется тем, что в процессе коммутации электронных элементов, работающих на высоком напряжении (от 400 до 670 В) при токе от 10 до 50 А и выше, возникают высокочастотные паразитные выбросы [8]. Энергия этих выбросов может приводить к сбоям в работе МУ, как в результате кондуктивных процессов (наводки от расположенных поблизости мощных токовых шин), так и распространяясь по эфиру (электромагнитное поле). К чувствительным входам ИСК в МУ относятся входы усилителя обратной связи.

Однако в ряде применений, например в мощных блоках питания или в зарядных устройствах [2, 3], которые используются в бортовых системах или корабельной аппаратуре, часто один из выходов этих СУ заземляется. В этом случае МУ желательно располагать вблизи выходных клемм СУ, выходное напряжение которого нужно стабилизировать. Поэтому модуль управления тоже должен быть автономным.

Отсюда следует вывод, что устройство драйвера силового ключа Др.ЭК должно включать в себя УМ и Усог. Кроме этих узлов, в Др.ЭК необходимо включить узлы, выполняющие следующие функции: контроль напряжения на открытом ЭК; обнаружение КЗ; плавный вывод СУ из режима короткого замыкания и формирование сигнала на запрет включения СУ, в том случае когда произошла необратимая каскадная авария.

Несколько слов об этом техническом явлении. Дело в том, что, например, при пробое в силовом транзисторе перехода сток/исток (С–И) на вторичной обмотке Tr_{yII} в УМ возникает высокое напряжение, которое может вызвать импульс высокого напряжения на его первичной обмотке. В результате могут быть повреждены элементы усилителя мощности: микросхема, транзисторы, диоды, стабилитроны и т. д. Этот процесс называется каскадной (необратимой) аварией. Чтобы исключить или ослабить этот процесс, нужны следующие меры.

Так как для бортовых летательных устройств можно применять только резервные схемы, которые повышают надежность системы вторичного электропитания, установка предохранителей, как правило, не имеет смысла. С другой стороны, для систем наземного или водного базирования применяются различные защитные методы и устройства, которые могут предотвратить каскадные аварии в СВЭП. Дело в том, что на этих носителях можно выполнять ремонтные работы. В этом случае, например, можно устанавливать в цепи затвора ЭК предохранитель или намеренно ставить последовательно микроомные пассивные элементы, которые «повреждаются или сгорают», тем самым разрывая цепи и предотвращая другие элементы схемы от каскадной аварии.

В нашем случае эти защитные элементы могут быть встроены в устройства согласования, причем из-за дешевизны и простоты Усог. возможна их отдельная дополнительная поставка в составе ЗИП.

В заключение можно сделать следующие выводы.

- Разработка унифицированных силовых модулей и узлов для СВЭП с использованием гибридной технологии — эффективный путь синтеза сложных преобразовательных силовых систем.
- Модульная структура синтеза позволяет оперативно модифицировать отдельные унифицированные узлы, когда появляются новые компонентные материалы и технологии.
- В результате создания унифицированных узлов значительно уменьшится номенклатура и количество «рассыпных» элементов,

что позволит упростить и снизить стоимость мобилизационного стратегического запаса, предназначенного для работы в особых условиях (военные действия).

- Возрастет надежность силовых приборов и изделий, так как унифицированные узлы будут по параметрам надежности приближаться к их значениям для электронных компонентов.

В третьей части статьи предложен и проанализирован перечень унифицированных устройств, которые должны поставляться как самостоятельные изделия. Рассмотрен в общем виде вариант архитектуры драйвера нового поколения, построенный на основе предлагаемых к разработке унифицированных узлов и устройств.

Литература

1. Эраносян С. Ключи к возрождению производства российской силовой электроники. Ч. 2 // Силовая электроника. 2013. № 3.
2. Эраносян С., Мацерат И. Проблемы разработки и выбора унифицированных узлов и блоков вторичного электропитания для РЭА морского флота. Ч. 1 // Силовая электроника. 2012. № 3.
3. Эраносян С., Мацерат И. Проблемы разработки и выбора унифицированных узлов и блоков вторичного электропитания для РЭА морского флота. Ч. 2 // Силовая электроника. 2012. № 4.
4. Эраносян С. А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Эраносян С., Ланцов В. Квазирезонансные источники вторичного электропитания: проблемы, новый взгляд // Силовая электроника. 2007. № 3.
6. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу // Силовая электроника. 2007. № 4.
7. Эраносян С., Ланцов В. Импульсные источники с низким уровнем пульсаций и помех // Силовая электроника. 2008. № 3.
8. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Ч. 2, 3 // Силовая электроника. 2007. № 1, 2.