

Ключи к возрождению производства российской силовой электроники

Часть 2

В статье проведен анализ компонентной базы изделий средств вторичного электропитания силовой электроники в период до распада государства СССР, то есть в последние 25 лет прошлого столетия. Отмечены достижения прошлых лет в производстве компонентов и узлов на основе гибридной технологии. Выполнен обзор применения структур и функциональных схем драйверов зарубежного и отечественного производства. Сформулированы и обобщены основные требования к драйверам нового поколения, использование которых приведет к подъему отечественной электронной промышленности.

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

В первой части статьи [1] проведен анализ неудовлетворительного состояния в разработке и производстве отечественных электронных компонентов. Рассмотрены объективные исторические причины, такие как, например, распад СССР, а также стратегические ошибки в экономической политике, которые были совершены за первые 15 лет строительства нового государства — Российской Федерации (РФ). В эти и последующие годы РФ оставила все структуры электронной отрасли без всякой помощи, которая была жизненно необходима для планового, постепенного перехода на работу в новых условиях — от модели социалистической экономики к капиталистической. В результате проведенного анализа состояния электронной промышленности в России было предложено для возрождения производства современной отечественной компонентной базы разрабатывать унифицированные силовые модули и узлы на основе гибридной технологии для систем вторичного электропитания (СВЭП), входящие практически во все типы изделий (как оборонного, так и коммерческого назначения), которые имеют радиоэлектронные комплексы нового поколения.

Одним из первых усовершенствований электронно-вакуумных устройств, широко распространенных в начале XX в., была идея поместить в один корпус (стеклянный баллон электровакуумной лампы) два вакуумных прибора различного назначения, которые могут использоваться в изделии и работать независимо друг от друга. Речь

идет об электронной комбинированной лампе, название которой составляется из наименований простых приборов, например двойной тетрод-пентод.

По одной из версий, к этой идее американские инженеры пришли в 30-х годах прошлого столетия. Дело было в том, что в итоговую стоимость радиоприемника входил налог на использование вакуумных ламп. Этот налог, видимо, был введен с целью экономии электроэнергии в быту. Причем считался он просто по количеству ламп в радиоприемнике. Практичные американцы разработали технологию «помещения» нескольких приборов в один баллон, что позволило как снизить цену изделия, так и уменьшить его энергопотребление. Отечественные производители электронных компонентов хорошо усвоили этот метод синтеза в одном корпусе нескольких образцов различного типа электронных компонентов.

Отечественные технологии компонентной базы: положительный опыт прошлого

Надо отметить, что в СССР разработчики электронных компонентов, как, впрочем, и в других отраслях техники, были очень изобретательны и находчивы — возможно, ввиду ограниченных средств, отпускаемых государством. Стараясь найти выход из данной ситуации и отвечая на запросы разработчиков РЭА и отдельных функциональных приборов, используемых как

для вооружений, так и для военной и специальной техники (ВВСТ), ученые и инженеры старались создавать компонентную базу на основе новейших электронных изделий, используя гибридную технологию для получения новых, более сложных функциональных узлов, основанных на синтезе их на специальной подложке, на которой удается, по существу, смонтировать отдельную схему соединения узлов из дискретных элементов, в том числе и в бескорпусном исполнении с применением пассивных элементов, изготавливаемых на основе тонкопленочной технологии.

Можно утверждать, что начиная с середины 70-х годов это направление создания сложных, функционально законченных изделий вычислительной техники, а также в виде набора дискретных компонентов, в том числе и мощных, бурно развивалось, опережая зарубежный опыт, который в то время был сосредоточен, в основном, на разработках монокристалльных сложных приборов. Эта работа велась комплексно и на разных направлениях — как для маломощных изделий элементов вычислительной техники, так и для приборов повышенной мощности, предназначенных для создания малогабаритных источников вторичного питания (ИВЭ).

В качестве примера маломощной микросхемы серии 218 (разработка 1970 г.) [2] приведем некоторые характеристики для устройств, например 2ТК181 (триггер с комбинированным запуском) и 2ГФ181 (мультивибратор с самовозбуждением). Структура схемы триггера состояла из следующих компонентов: шесть транзисторов 2Т307Б, три диода 2Д901А, пять конденсаторов и 12 резисторов. Номинальное напряжение питания $E_k = 6,3$ В, $I_{\text{потр}} < 3$ мА. Напряжения на выходах при $E_k = 5,7$ В и нагрузке $R_n = 820$ Ом и $C_n = 100$ пФ: для открытого плеча $U_{\text{вых}} \leq 0,15-0,2$ В; для закрытого $U_{\text{вых}} \geq 4,0-3,8$ В. Помехоустойчивость по счетному входу не хуже 0,8 В. Структура схемы мультивибратора включала в себя: два транзистора 2Т307А, две диодные матрицы 2Д901Б (по два диода в матрице), два диода 2Д901А, два конденсатора и 10 резисторов. Номинальное напряжение питания $E_k = 6,3$ В, $I_{\text{потр}} \leq 12,5$ мА. Напряжения на выходе $U_{\text{вых}} \geq 2,8$ В при $E_k = 5,7$ В и нагрузке $R_n = 2$ кОм и $C_n = 100$ пФ. Период повторения импульсов 0,6–1,5 мкс. Эти микросхемы имели типовой металлический корпус с 14 выводами (штыревыми), вес 2 г, температурный диапазон $-60...+70$ °С.

Благодаря внедрению гибридных микросхем отечественные разработчики силовых преобразовательных устройств смогли уже к середине 70-х годов применять их в перспективных информационно-вычислительных комплексах ВВСТ. В частности, речь идет о передовых методах преобразования энергии в системах с первичным источником питания, в качестве которого используется сеть переменного напряжения. В этих новых ИВЭ принципиально отсутствовал силовой транс-

форматор, работающий на частоте первичной питающей сети, а основная полезная (нагрузочная) мощность, которая образуется на выходе блока, формировалась на основе высокочастотных регулируемых преобразователей. Причем рабочая частота в этих преобразователях была значительно (от 100 до 2000 раз) выше частоты сетевого напряжения. То есть силовой трансформатор в этих новых блоках питания работал частотах 5–100 кГц и выше, поэтому в технической литературе такие ИВЭ стали называть бестрансформаторными (БИВЭ) [3, 4].

Именно в таких технически сложных БИВЭ стали чаще применять, особенно в узлах управления, гибридные и монокристалльные интегральные микросхемы (ИС). Причем разработка новых типов микросхем велась параллельно с учетом требований разработчиков функциональных приборов РЭА. Например, когда была разработана транзисторная матрица из четырех транзисторов *n-p-n*-типа 1НТ251 ($U_{кб} = 45$ В, $I_{к,макс} = 400$ мА), через некоторое время было разработано аналогичное устройство по параметрам и составу — «транзисторная сборка» из четырех транзисторов *p-n-p*-типа 2ТС622. Эта микросборка, по сути, являлась гибридной микросхемой из четырех бескорпусных транзисторов в том же планарном корпусе, что и микросхема 1НТ251.

Благодаря параллельной работе разработчиков как электронной компонентной базы, так и функциональной аппаратуры, появлялось опережающее по времени преимущество при проектировании новейших электронных комплексов. Это привело к тому, что на ведущих предприятиях по разработке ВВСТ стали разрабатывать блоки питания нового типа практически одновременно с разработкой нового изделия оборонного комплекса, т. е. начиная с этапа разработки эскизного проекта. Для преодоления возникающих трудностей при серийном освоении новых электронных компонентов, которые всегда имеют место при внедрении новых технологий и приборов, на всех предприятиях действовали специальные планы по освоению новой техники, с отдельной строкой финансирования, которая предусматривала в том числе и материальное стимулирование этих работ из центра. Именно эти благоприятные технические и организационные обстоятельства явились одним из важнейших условий того, что ЦНИИ «Гранит» (Ленинград) удалось разработать и начать

серийное производство в 1974 г. первого в СССР блока БИВЭ, входящего в состав специального комплекса для корабля ВМФ. В блоке питания мощностью 400 Вт было использовано более девяти последних разработок компонентов с Приемкой 5. В частности, среди них: гибридные микросхемы 2ГФ181 и 2ТК181 (всего 5 шт.); операционный усилитель 1УТ401 (2 шт.); транзисторы средней мощности 2Т606 и 2Т904 (всего 3 шт.); первый мощный высоковольтный отечественный транзистор 2Т809 (4 шт.); силовые быстродействующие лавинные диоды 2Д206 (4 шт.); силовое реле РЭН33 и малогабаритный импульсный трансформатор в модульном исполнении ММТИ. Этот блок питания состоял из ряда унифицированных узлов и имел удельную объемную мощность $p_v = 46$ Вт/дм³.

Кстати, первый американский патент (1975 г.) на бестрансформаторный источник вторичного электропитания [5] был опубликован в СССР в 1976 г. Некоторые элементы системы управления блока БИВЭ, входящего в состав РЭА специального корабля ВМФ, представлены на рис. 1.

Позднее, в 80-х годах, была разработана силовая транзисторная сборка типа 2ТС843А (на основе кристаллов транзистора 2Т808). Она включала в себя два мощных транзистора ($U_{кз} = 120$ В). Причем каждый из них был образован из четырех параллельно включенных кристаллов. Максимально допустимый постоянный ток коллектора $I_{к,м} = 12$ А, $U_{кз,нас} = 0,6$ В, а максимальный импульсный ток $I_{к,имп} = 25$ А при длительности импульса не более 10 мкс и скважности не менее пяти, при этом допустимая импульсная мощность была 1600 Вт. Максимальная постоянная рассеиваемая мощность при температуре корпуса $-60...+100$ °С с теплоотводом — 10 Вт. Кроме двух силовых транзисторов, в этой гибридной сборке было еще два транзистора средней мощности ($U_{кз} = 120$ В). Причем постоянный ток коллектора $I_{к,м} = 3$ А, $U_{кз,нас} = 0,6$ В, а максимальный импульсный ток $I_{к,имп} = 6$ А при длительности импульса не более 10 мкс и скважности не менее пяти, а допустимая импульсная мощность — 400 Вт. Максимальная постоянная рассеиваемая мощность при температуре корпуса $-60...+100$ °С с теплоотводом — 2,5 Вт. Размеры металлического корпуса с 12 штыревыми выводами 75×55 мм, толщина 8 мм (без учета выводов). Масса сборки не более 62 г, масса накидного фланца не более



Рис. 1. Гибридные микросхемы и компоненты 1970-х годов



Рис. 2. Транзисторная сборка 2ТС843А

13 г. Транзисторная сборка 2ТС843А представлена на рис. 2.

Рассмотрим отдельно вопросы, связанные с разработкой больших интегральных схем (БИС) на основе отечественных базовых матричных кристаллов (БМК) [7–9]. В общем случае БМК представляет собой набор различных электронных компонентов, которые определяются термином (в настоящее время) «библиотека», которая характеризуется общим количеством ячеек (от единиц до десятков тысяч). Обычно в БМК имеется один-два верхних слоя металлизации кристалла, на поверхности которых проводится коммутация между элементами. В результате этих операций образуется конечная топология БИС, разработанной, к примеру, на основе электрической схемы, предложенной заказчиком. В микросхеме, спроектированной на основе БМК, реализуются также некоторые типы элементов, которые не имеют дискретных аналогов, например многоэмиттерные транзисторы, а при создании функционального узла предпочтение отдается активным элементам перед пассивными. Отметим, что при построении аналогичных узлов на дискретных элементах, наоборот, всегда стремятся уменьшить количество дорогих активных элементов (транзисторов, тиристоров и т. п.) и использовать, по возможности, более дешевые пассивные.

Разумеется, для грамотной и ускоренной разработки гибридных микросхем необходимо иметь комплект программно-технического обеспечения САПР, предназначенный именно для проектирования микросхем на основе БМК, причем адаптированного для определенного типа кристалла.

В качестве иллюстрации удачной разработки ИС на основе БМК приведем ИС управления резонансными и квазирезонансными преобразователями в ИВЭ с максимальной частотой 1,5 МГц [10], работа над которой начиналась в конце 80-х годов. Одним из инициаторов разработки микросхемы управления для квазирезонансных преобразователей (КвРП) был главный конструктор Слынько Валерий Петрович, талантливый разработчик микросхем и хороший организатор серийного производства микроэлектронных изделий. Активное участие в разработке принимал Денисов Борис Георгиевич, который руководил работами по программному обеспечению САПР в процессе разработки топологии микросхемы и проведения работ по моделированию и оптимизации отдельных узлов, например источника опорного напряжения. Разработка новой микросхемы управления для КвРП производилась на основе БМК «Фархад-2». Отметим, что при проектировании микросхем на основе аналоговых БМК необходимо учитывать ряд дополнительных требований, предъявляемых к схемным решениям [10]:

- минимум компонентов;
- минимальное количество резисторов;
- минимальное количество транзисторов *p-n-p*-типа.

Микросхема включает в себя семь основных узлов:

- усилитель рассогласования (УР);
- источник опорного напряжения (ИОН);
- компаратор защиты от пониженного напряжения питания ИС (КПН);
- преобразователь «ток–частота» (ПТЧ), формирующий на выходе пилообразное напряжение;
- компаратор-формирователь длительности выходного импульса в системе ЧИМ (КФДИ);
- выходной усилитель (ВУ) импульса управления;
- усилитель защиты от перегрузки по току (УЗПТ).

Среди технических характеристик микросхемы, первое наименование которой было «ВИП-МИКРО», выделим некоторые из [10]. Опорное напряжение $U_{он} = 2,5 \pm 0,05$ В; передний и задний фронт выходного напряжения при $C_n = 1000$ пФ — 50 нс; коэффициент усиления УР — 90 дБ; минимальная частота преобразования 10 Гц; ток потребления $I_{cc} = 10$ мА при рабочей частоте преобразования $f_{пр} = 1$ МГц и 2,5 мА при $F_{раб} = 2,5$ кГц.

Работа по формированию проекта технических условий на микросхему («Микросхемы интегральные КН1055ЕУ5. Технические условия АДБК.431420.458 ТУ») была практически завершена в конце апреля 1995 г. Основные параметры, приведенные в ТУ: $U_{он} = 2,45 \pm 0,1$ В; максимальная частота преобразования $f_{пр,max} = 1,5$ МГц; напряжение питания (предельнодопустимый режим) $U_{cc} = 7-16,5$ В; импульсный выходной ток $I_{н.и} = 400$ мА при скажности $Q > 10$; корпус планарный 24 вывода (5122.24-1), масса не более 1 г; темпера-

тура окружающей среды $-60...+125$ °С. Опыт использования ИС КН1055ЕУ5 показал, что ее применение в системе управления КвРП повышает надежность и позволяет уменьшить габариты унифицированного модуля управления (МУ). Так, например, для управления силовыми модулями источника бесперебойного питания [11] был разработан МУ, который обеспечивал основные регулировочные функции всего блока конвертера и осуществлял ЧИМ-регулирование для однотактного преобразователя квазирезонансного типа. Схема МУ состояла из следующих элементов: одна микросхема КН1055ЕУ5; четыре транзистора (корпуса SOT-23, SOT-8); один набор диодов (корпус SOT-23); два стабилитрона разработки АОЗТ «Светлана ЭП» (корпус SOD); 14 бескорпусных конденсаторов (К10-17в); 25 бескорпусных резисторов (Р1-12); потенциометр (СП-19а). Конструктивно этот модуль выполнен в виде печатной платы размером 70×25 мм с двусторонним монтажом SMD-элементов. Модуль имел 11 штыревых выходных выводов, благодаря которым он вертикально устанавливался на кросс-плату. Максимальная толщина платы (с элементами) определяется высотой потенциометра СП-19а. Некоторые электронные элементы, входящие в состав модуля управления, и печатная плата (основание) представлены на рис. 3.

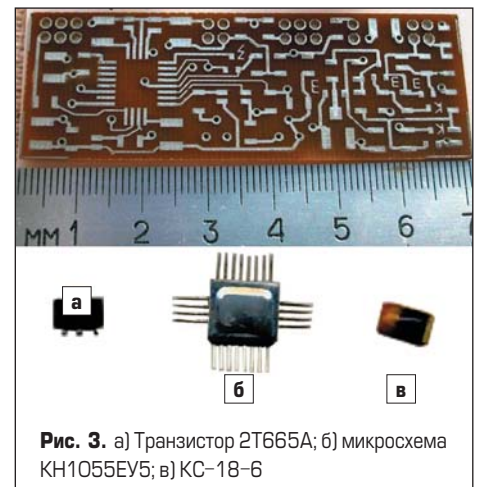


Рис. 3. а) Транзистор 2Т665А; б) микросхема КН1055ЕУ5; в) КС-18-6

Анализ структур управления (драйверов) для мощных силовых электронных модулей

Современная силовая электроника невозможна без микросхем, обеспечивающих управление мощными полупроводниковыми приборами, их защиту, преобразование и коммутацию энергии. Большой вклад в разработку и производство силовых электронных приборов, микросхем и драйверов внесло известное всем отечественным разработчикам РЭА НПП «Пульсар» [12]. Много лет оно выпускает электронные компоненты высокого уровня. Среди них: интегральные микросхемы драйверов силовых транзисторных ключей; микросхемы защиты силовых транзисторных ключей; микросхемы управления силовыми модулями источников питания и т. п. Кроме

того, НПП «Пульсар» внесло свой вклад в разработку силовых модулей — как переключающих, так и «разумных».

Однако надо признать, что в настоящее время отечественные разработчики силовых устройств (СУ) вынуждены применять чаще всего импортные компоненты, что обусловлено почти 20-летним периодом развала и стагнации в электронной промышленности России [1].

Рассмотрим основные структуры схем управления силовыми электронными элементами, которые предназначены для включения/отключения мощных высоковольтных электронных ключевых приборов (ЭК) типа MOSFET и IGBT.

Наиболее эффективно решаются проблемы управления этими приборами с помощью устройств, которые принято называть драйверами [13–21]. Микросхемы драйверов изготавливаются в общем случае по гибридной технологии с использованием технологии монокристаллических высоковольтных интегральных схем. Обычно в схему драйверов входят два (или больше) канала управления силовыми транзисторами как верхнего, так и нижнего плеча силового контура преобразователя. Функциональные схемы драйверов включают в себя следующие узлы: входные логические элементы; схемы сдвига уровня управляющих сигналов; мощные выходные, усилительные каскады на транзисторах. Кроме этого, в драйверы или в силовые модули (IPM) встраиваются эффективные узлы защит и блокировок, назначение которых — ограничение перегрузок по току и короткому замыканию. Причем эти узлы гарантируют при перегрузке ЭК работу на безопасном уровне тока, а в случае короткого замыкания формируется повторно-кратковременный режим работы ключа, благодаря которому обеспечивается допустимо-комфортный режим температуры перегрева кристалла. Если режим короткого замыкания является необратимым, то поступает команда блокировки включения для всех ЭК преобразователя. Аналогичным образом функционируют и узлы защит и блокировок от других нештатных режимов работы, например при возникновении перенапряжений или недопустимо пониженном напряжении, которые могут быть как на постоянных питающих силовых шинах преобразователя, так и на вводных клеммах вспомогательных источников питания, от которых получают энергию все элементы электрической схемы драйвера. Для выполнения этих защитных функций в схемах драйверов встраиваются различные электронные компоненты: компараторы, операционные усилители, таймеры, генераторы импульсов и т. п.

Для краткого пояснения работы отдельных узлов рассмотрим гибридные драйверы фирмы Mitsubishi [17] на основе микросхем M57962AL для управления мощными IGBT-модулями. На рис. 4 представлена функциональная схема драйвера M57962AL.

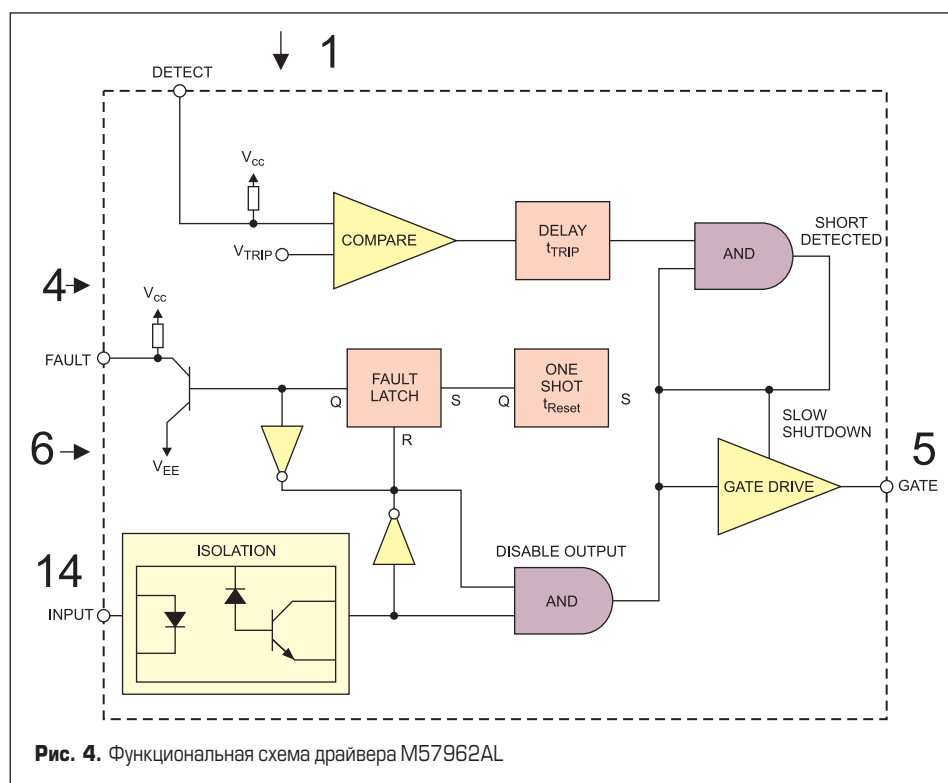


Рис. 4. Функциональная схема драйвера M57962AL

Как показано на рис. 4, схема драйвера включает в себя различные типы триггеров, компаратор, операционные усилители, транзисторный оптрон, транзистор, а также различные элементы цифровой логики. Поясним коротко назначение основных функциональных узлов. Входной сигнал INP вырабатывается микросхемой (контроллером, на рисунке он не показан), входящей в модуль управления для силовых ЭК. ЭК входят в состав СУ, например преобразователя блока питания, входящего в состав СВЭП. Сигнал INP поступает на вход (диод) оптрона. Отметим, что микросхема драйвера имеет на входе встроенный резистор 185 Ом, предназначенный для корректного режима по току диода оптрона при входном напряжении +5 В. Если входное напряжение выше, то необходимо установить внешний дополнительный резистор для обеспечения работы оптрона (при оптимальном токе диода), обычно этот ток имеет значения 15–20 мА.

Надо подчеркнуть, что оптрон выполняет одну из важнейших функций драйвера, обеспечивая гальваническую изоляцию модуля управления (МУ), как правило, «привязанного» к «земле», от потенциала выводов ЭК, которые обычно привязаны к потенциалу первичного источника энергии, например к переменному сетевому напряжению. Напряжение изоляции V_{ISO} между выводом INP, то есть потенциалом МУ, а также вспомогательных источников вторичного электропитания V_{CC} и V_{EE} должно, по крайней мере, в два раза превышать максимально допустимое напряжение на ЭК. Например, для IGBT прибора V_{CES} на 1200 В $V_{ISO} > 2400$ В. Вывод компаратора DET через высоковольтный диод с малым временем обратного восстановления соединяется с коллектором

(для IGBT). При отпирании ЭК на вход компаратора поступает напряжение насыщения $V_{CE(SAT)}$. Когда оно превышает допустимый уровень, при нормированном токе он срабатывает. При этом запускается алгоритм выключения ЭК и последующих интервалов «плавного», постепенного (осторожного) повторного включения (после аварии). Кроме того, обеспечивается контроль текущего уровня напряжения насыщения, и одновременно с помощью триггера-защелки (FAULT LATCH) через транзистор формируется сигнал неисправности (FAULT). Разумеется, алгоритм выключения и последующих включений ЭК (работа при возникновении аварии) обеспечивает в заданные интервалы времени блокировку (запрет) запуска (сигнал GATE) на выходе драйвера с помощью узла DISABLE OUTPUT.

Здесь необходимо подчеркнуть следующее обстоятельство. Непосредственно в схемах драйверов аварийные режимы предназначены только для защиты от повреждения самого ЭК. При этом драйвер «не знает», сколько ключей в СУ, какова логика их нормальной работы, очередность включения при работе на силовой трансформатор и т. п. В связи с этим в силовых интеллектуальных ключах, кроме применения драйверов и силовых модулей IPM, необходимы специальные устройства, которые решают задачи обеспечения безопасных и комфортных условий для всего комплекса силового изделия (преобразователя, инвертора, электропривода и т. п.). Речь идет о процедуре включения и выключения СУ [4], о контроле тока нагрузки, температуре перегрева внутри изделия, контроле всех важных напряжений как в силовом контуре, так и в узлах управления. Эти специальные узлы и устройства будут рассмотрены

минимизации времени перехода транзистора в открытое состояние, так как коммутация происходит в режиме номинального или повышенного (из-за переключения «нулевого» диода выпрямителя) [4] импульсного тока через транзистор. Для управления режимом запирания IGBT требуется источник питания с меньшим напряжением 8–10 В. Общая мощность вспомогательных источников вторичного электропитания, которая должна гарантировать оптимальное управление силовым ключом во всех режимах его работы, в том числе и при допустимых перегрузках по току, зависит от рабочей частоты силового устройства.

Таким образом, разработчик СУ после определения типономинала выбранного ЭК, с учетом его технических параметров и выбранной структурной схемы, может сформировать требования для синтеза дополнительных источников. Во многих приложениях желательно, в том числе и с точки зрения повышения надежности всего СУ, использовать один изолированный ИВЭ для питания драйвера. В этом случае для организации двух дополнительных источников (положительного и отрицательного) делается искусственная средняя точка, например с помощью конденсаторного делителя напряжения, которая обычно соединяется с эмиттером (IGBT) или с истоком (MOSFET). Причем, номинальное напряжение отрицательного (относительно средней точки источника) V_{EE} организуется с помощью стабилизатора и резистора. Вариант такой схемы [17] представлен на рис. 5в, где средняя точка образована

конденсаторами емкостью 47 мкФ. Для низкочастотных (до 15 кГц) преобразователей возможно использование электролитических конденсаторов, для СУ с рабочими частотами 50–200 кГц необходимо применять танталовые или оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы. Это объясняется тем, что танталовые конденсаторы допускают значительную переменную составляющую на высоких частотах, а также в импульсных режимах работы.

Ток потребления драйвера ЭК состоит из двух составляющих. Первая — ток «покоя» $I_{пок}$ необходимый для формирования внутренних режимов схемы драйвера, величина которого постоянна и зависит от фиксированных значений V_{ce} , V_{EE} . Вторая составляющая — ток, необходимый для управления затвором. Он определяется рабочей частотой и общей емкостью затвора (т. е. величиной заряда Q_g затвора). Например, для СУ с ШИМ частотой $F_{ршм}$ требуемый ток питания I_D будет:

$$I_D = Q_g \times F_{ршм} + I_{пок}$$

Некоторые особенности драйверов других фирм

В настоящее время многие фирмы (TI, IR, Vishay, Semikron, Электрум АВ и др.) [18, 19] предлагают огромный ассортимент интегральных драйверов для MOSFET/IGBT. Для управления высоковольтными ЭК (600 В и выше) фирма International Rectifier во второй половине 90-х годов выпустила серии драйверов типов IR2112, IR2121-IR2133,

а для управления более высоковольтными ключами (1200 В) — IR2213-IR2233. Микросхемы [15, 16] управляются посредством входных (логических) сигналов уровней (КМОП, ТТЛ). Они изготовлены по технологии монолитных высоковольтных интегральных микросхем (HVIC), т. е. могут содержать высоковольтные маломощные транзисторы. Рассмотрим особенности этих драйверов на примере одноканального IR2125 [24, 20].

Особенность таких драйверов состоит в том, что они могут управлять мощными транзисторами «верхнего уровня», которые работают как на потенциале всегда выше уровня «земли», так и на потенциале, когда вывод ЭК, например истока (MOSFET) или эмиттера (IGBT), привязан к потенциалу «земли». При этом управляющие сигналы, как правило, привязаны к «земле» для ЭК как верхнего, так и нижнего уровня. Алгоритм работы драйвера для управления транзистором верхнего уровня непростой. Функциональная схема драйвера IR2125 представлена на рис. 6.

Энергия для управления затвором ЭК образуется на «бутстрепном конденсаторе» (БК), который заряжается через диод от напряжения питания микросхемы V_{ce} либо через нагрузку, подключенную к земле, либо, при наличии второго ЭК, после его отпираания. Дело в том, что на затвор верхнего транзистора должен быть подан потенциал на 10–20 В больший, чем потенциал его истока, который у включенного ЭК, по существу, равен высокому напряжению питания, например когда нагрузка соединена с землей. А это означает, что схема управления высоковольтным транзистором

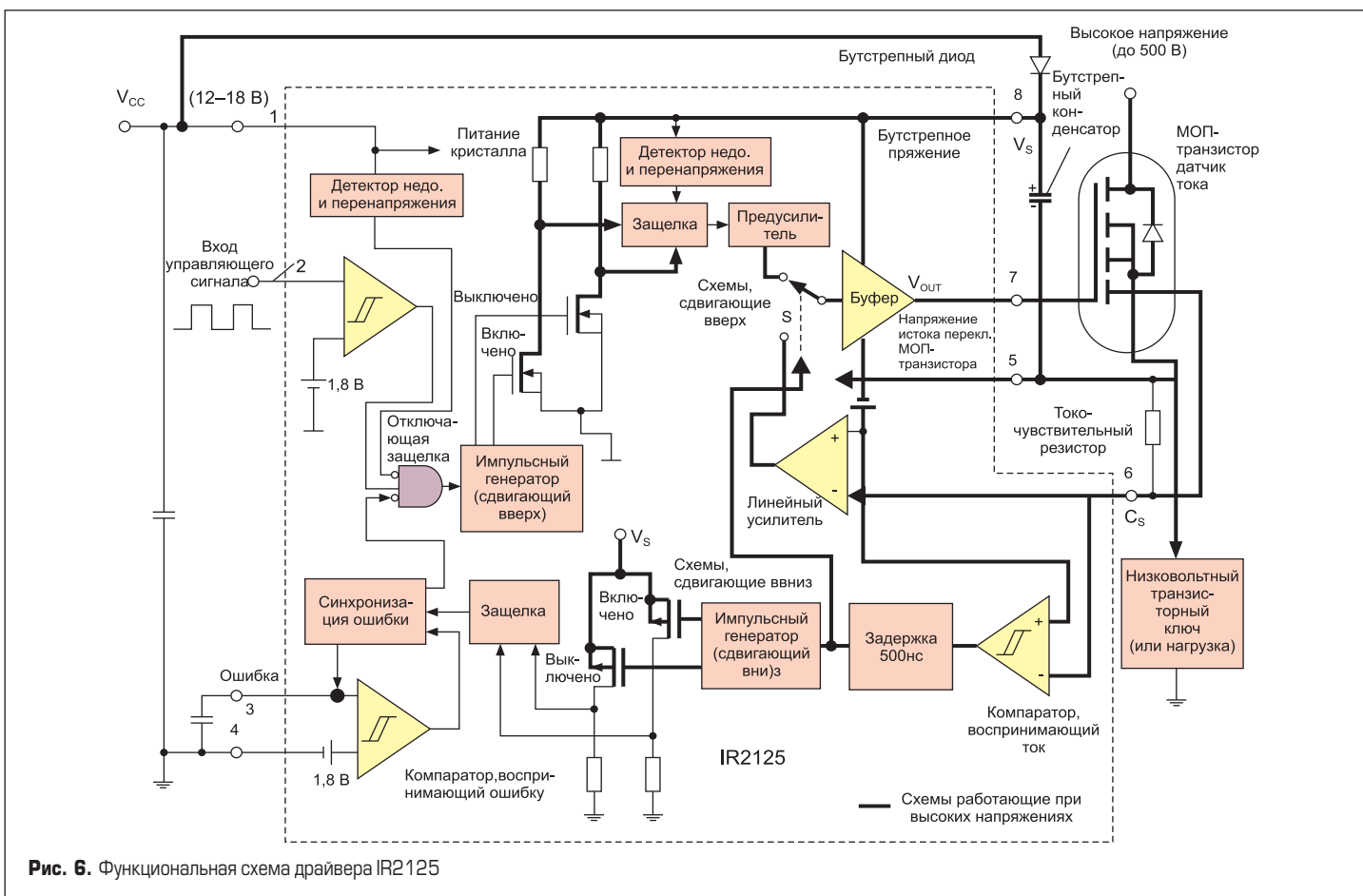


Рис. 6. Функциональная схема драйвера IR2125

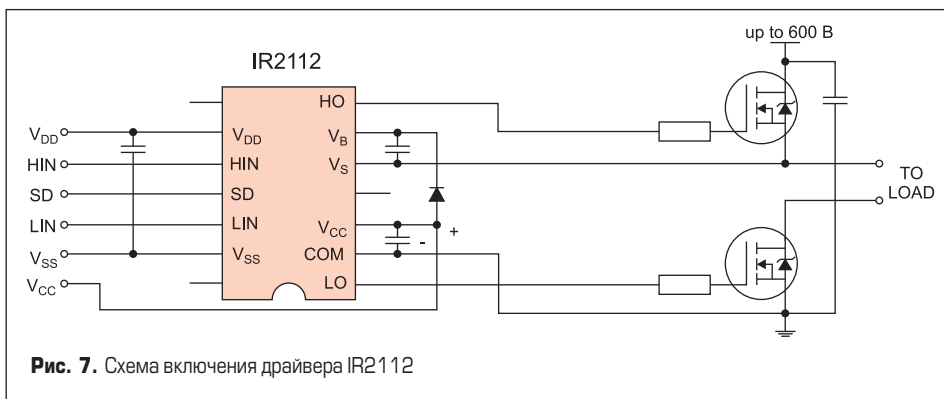


Рис. 7. Схема включения драйвера IR2112

должна работать от источника «плавающего» напряжения (10–20 В). Чтобы уровень логического «0» соответствовал потенциалу истока, необходимо обеспечивать формирование ряда функций драйвера, например защиту от ненормированного понижения или повышения напряжения питания на БК. При этом нужно обеспечить (вводить) изменение потенциала для ряда узлов микросхемы, который обозначается термином «сдвиг уровня вверх» (СУВ). С другой стороны, при работе токовой защиты драйвера, например для исключения ложных срабатываний в процессе времени переключения ЭК, существует запретное время (≈ 500 нс), при этом выходной сигнал схемы задержки должен быть сдвинут к низким уровням — термин «сдвиг уровня вниз» (СУН), с помощью схемы, аналогичной схеме СУВ. Причем для обеспечения работы схемы СУВ используются два *n*-канальных транзистора на 500 В, а для обеспечения работы схемы СУН — два *p*-канальных транзистора на 500 В.

Независимые двоянные драйверы, например типа IR2110 для ЭК до 500 В или IR2112 для ЭК до 600 В верхнего и нижнего плеча, могут применяться в преобразователях на основе

ШИМ или КвРП, выполненных по схеме «косого моста» [25]. Схема типового включения этих драйверов приведена на рис. 7.

Во многих случаях применения, особенно в устройствах электропривода и в источниках бесперебойного питания, ЭК работают от выпрямленного напряжения, полученного от сети переменного тока. В этих случаях для надежной работы силовых ключей требуются управляющие схемы с гальванической развязкой между входом и выходом, выдерживающей напряжение до нескольких тысяч вольт. Оригинальное решение для обеспечения гальванической развязки цепей управления драйвера, которые соединены с потенциалом «затвор–исток» ЭК, от управляющих сигналов драйвера, связанных с «землей», предложила фирма Unitrode Integrated Circuit [21, 26]. Для этого случая был разработан комплект из двух микросхем. Первая из них, недорогая UC3724, находится под потенциалом логической схемы, подающей входной управляющий сигнал. Вторая ИС (UC3725) подключена к плавающему потенциалу истока MOSFET. Схема драйвера, образованного этой парой микросхем, представлена на рис. 8.

Как показано на рис. 8, передача команд между двумя микросхемами на включение и выключение ЭК осуществляется с помощью специального импульсного трансформатора (ИТв.из.), с высоким напряжением изоляции между его обмотками. Одновременно с этим через него происходит передача энергии, которая обеспечивает питание V_{cc} для UC3725. При этом первичная обмотка ИТв.из. подключена к выводам (6 и 4) ИС UC3724 (эти выводы обозначены на рис. 8 как VA и VB), а вторичная обмотка подключена к выводам (7 и 8) ИС UC3725. Строго говоря, качество гальванической развязки ограничивается только электрической прочностью ИТв.из. По существу, ни на одну из двух ИС не подается высокое напряжение. Интегральная схема UC3724, получившая название изолированного управляющего передатчика, состоит из генератора прямоугольных импульсов с изменяемой скважностью и фиксированной частотой (несущей) около 600 кГц. Диаграмма сигнала на обмотках ИТв.из. приведена на рис. 9.

При этом напряжение несущей частоты с максимальной амплитудой V_{cc} передает энергию управляющей схеме UC3725, а с помощью ШИМ формируется (восстанавливается) управляющий сигнал, повторяющий по длительности и амплитуде сигнал на входе UC3724 (вывод 7). Передача импульсов управления (его длительности для ШИМ), которая выделяется (кодируется) фиксацией перепадов уровней амплитуды импульсов с одного возможного значения на другой, например с 30 на 70% и с 70 на 30%, осуществляется в управляющем передатчике UC3724. Необходимо также отметить, что в этой паре ИС успешно решена проблема возможного подмагничивания сердечника ИТв.из. Речь идет о том, что генератор импульсов несущей частоты в ИС UC3724 работает таким образом, что между каждыми двумя выходными

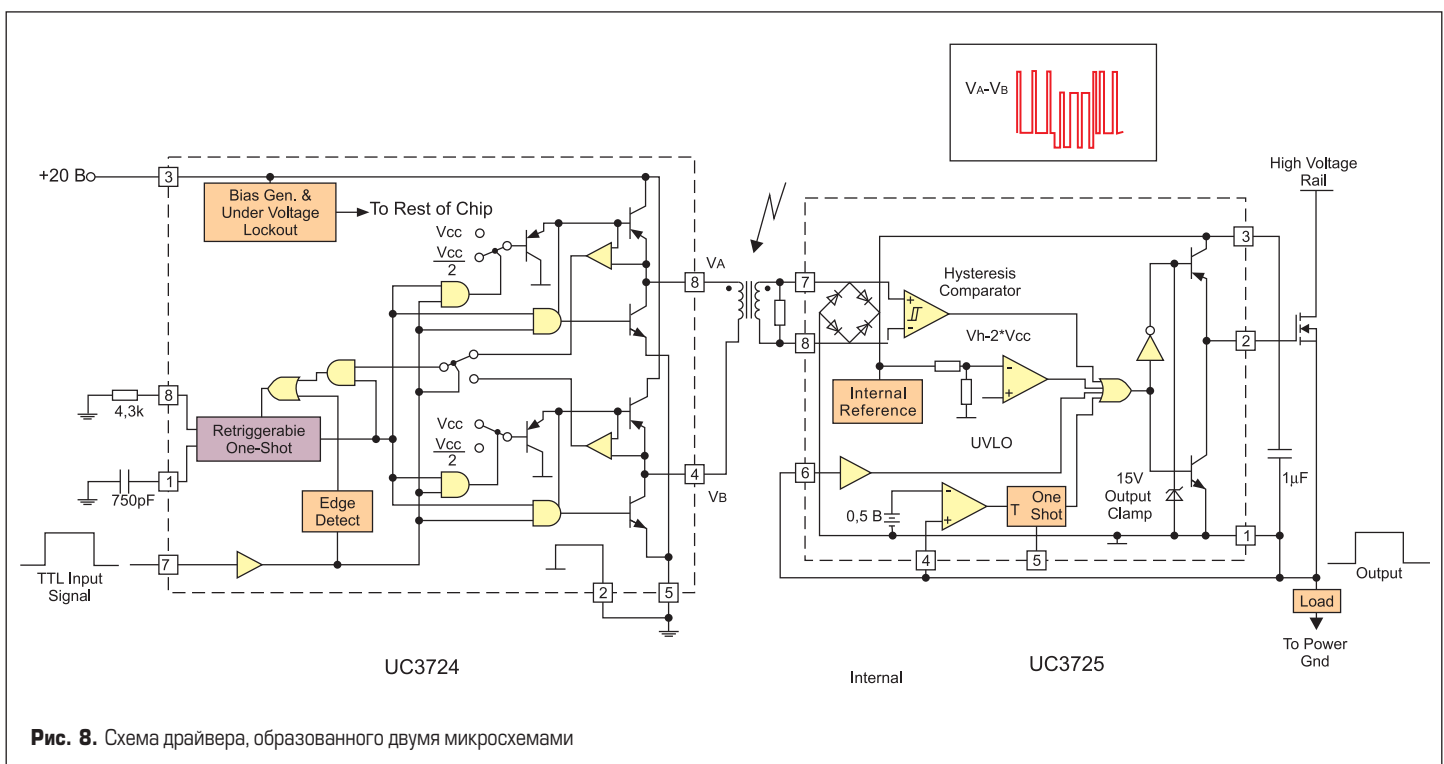
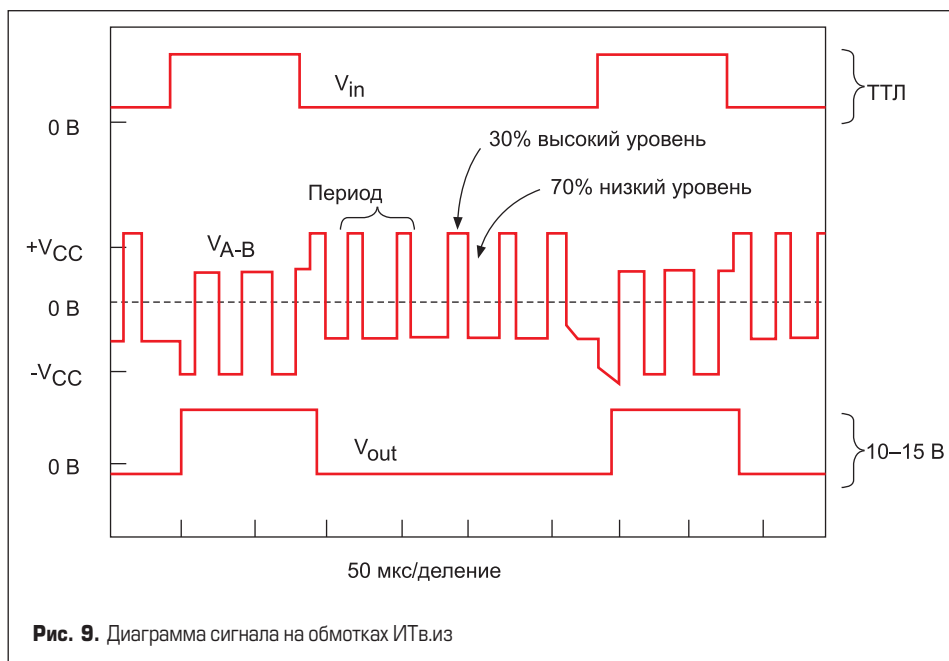


Рис. 8. Схема драйвера, образованного двумя микросхемами



циклами намагничивающий ток уменьшается до нуля благодаря действию отрицательного импульса, подаваемого на трансформатор. Отметим также, что чередование полярности импульсов на выходах VA и VB происходит путем коммутации специальных электронных ключей S1–S3 (рис. 8), если смотреть на рисунок ИС UC3724 сверху вниз.

Компаратор значений скважности в схеме UC3725 проверяет форму сигнала V_{A-B} и всего за один цикл определяет сдвиг уровня и длительность импульса. В результате этого создается на выводе 2 импульс управления с амплитудой 10–15 В (усиленный по напряжению сигнал, поступающий от ТТЛ In. на ИС UC3724). Мост на диодах Шоттки выпрямляет несущий сигнал, и таким образом формируется напряжение V_{cc} для питания UC3725 (вывод 3). Второй компаратор с программируемым временем выключенного состояния (timing) по выводам 4 и 5 может выполнять защиту от перегрузок по току. Вход разрешения (вывод 6) расширяет имеющиеся возможности управления и защиты, например при использовании микросхемы текущего контроля температуры кристалла силового ЭК типа UC3730T.

Информационное обеспечение разработчиков

В прошлом столетии разработчики микросхем старались подробно публиковать в периодических технических журналах и руководствах функциональные схемы новых приборов и тонкости их применения в разрабатываемых изделиях РЭА. Причем руководства по применению изделий электронной техники как для монолитных интегральных, так и гибридных микросхем (сборок) регулярно публиковались в виде статей в журналах или фирменных книгах-справочниках. Например, фирма UNITRODE выпустила справочник [21], в котором опубликованы не только подробные функциональные схемы, технические параметры, диаграммы работы отдельных узлов

и т. п., но и типовые электрические схемы для конкретных применений (конвертеров, инверторов, ИВЭ и т. п.), в которых указана полная спецификация активных и пассивных элементов. Сверх того, в ряде примеров для рассчитываемого изделия приведены инженерные методики вычисления электрических параметров и режимов работы основных узлов. Такие детальные сведения способствовали активному спросу на новые микросхемы (контроллеры), которые разрабатывались данной фирмой. Это приводило к активизации интереса у разработчиков аппаратуры и, в конечном итоге, к расширению применения ИС в различных изделиях РЭА. При этом приборы и электронные изделия могли разрабатывать инженеры, имеющие даже средний профессиональный уровень, поскольку он, по существу, компенсировался сведениями, приведенными в таких справочниках.

В настоящее время все происходит иначе. Многие фирмы, разрабатывающие драйверы и микросхемы для управления СУ, стараются не слишком афишировать функциональные схемы и подробности режимов работы узлов, чаще всего из-за надуманного явления — промышленного шпионажа. В результате неполная осведомленность пользователя о нюансах работы примененного компонента управления может спровоцировать возникновение нештатных режимов работы силового ключа, вплоть до его повреждения. Подобные негативные примеры из практики применения силовых модулей IGBT приведены в [22]. Дополнительно заметим, что публикуемые в периодических журналах по электронике статьи (в электронных версиях) могут быть получены специалистами от редакции чаще всего только после заказа и предоплаты. В то же время технические библиотеки (например, в учебных заведениях) не могут себе позволить приобретать подписку на ряд важных технических журналов из-за недостатка финансирования фонда своих библиотек. Многие фирмы, выпускающие драйверы, такие как

TI, IR, Электрум АВ и др., в своих описаниях и инструкциях приводят достаточно сведений, которые облегчают выбор оптимальных режимов работы силовых ключей MOSFET/IGBT. По мнению автора, одной из фирм, которая приводит в описаниях драйверов самые полные и детальные сведения, необходимые для разработки СУ, несомненно, является Mitsubishi Electric. Благодаря своей информационной политике она демонстрирует, особенно в части применения драйверов для управления силовыми модулями [17], исключительно подробное рассмотрение большого объема данных для применения в СУ различного назначения. К примеру, в опубликованных источниках приводятся рекомендуемые значения сопротивления резисторов цепи затвора R_{Gmin}/R_{Gmax} для силовых модулей от CM15-12H до CM400HA, а также рекомендации для выбора параллельного соединения модулей на основе формулы аналитического расчета суммарного тока для *n*-включенных модулей. Например, суммарный допустимый ток для четырех параллельных модулей на 300 А составляет 1037 А. Также приведены рекомендации по разработке печатной платы интерфейса для IPM приборов различных серий, среди них есть значения рекомендованных конденсаторов развязки для блоков питания и оптрона, советы по использованию экранов на печатных платах, которые помогают снизить импульсные наводки, и т. п.

Основные требования к драйверам, на основе которых можно разрабатывать современные устройства нового поколения

При выборе структуры организации вспомогательных источников питания как для функциональных узлов собственно микросхем (низковольтных узлов) драйверов, так и для синтеза выходных мощных управляющих импульсов включения/отключения ЭК необходимо учитывать следующее:

1. Выбор номинального напряжения питания V_{cc} . Это напряжение должно быть в пределах 20–25 В, что является безопасным и допустимым для большинства ИС, разработанных ведущими фирмами-производителями. Как показано выше, с помощью одного дополнительного источника легко образуется средняя точка (минус V_{EE}), необходимая для формирования выходных импульсов драйверов.
2. Проблема использования импульсного трансформатора $Tr_{уп}$, который формирует мощные импульсы управления, как положительной полярности, так и отрицательной, является актуальной и неоднозначной. Хотя многие фирмы делают упор на формирование выходных импульсов, получаемых от накопленного заряда в специальном конденсаторе БК, который заряжается через силовые (открытые) ключи ЭК, все же рассмотрим использование $Tr_{уп}$, как один из альтернативных вариантов.

Покажем основные преимущества использования импульсного трансформатора в схе-

ме драйвера. Во-первых, это оптимальное согласование входного питающего напряжения с импедансом нагрузки, т. е. для формирования мощных импульсов для управления затвором ЭК. Во-вторых, небольшие габариты такого $Tr_{уп}$, особенно при рабочих частотах силовых ключей 150–250 кГц. Оценочный расчет схемы драйвера с импульсным трансформатором, который был проведен при использовании методик и данных в [4, 23], показал следующее. Для мощного источника питания с преобразователем типа КвРП, выполненного по схеме «косого моста» [25] (структурный аналог, но с другими ЭК), был проведен расчет драйвера, который предназначен для управления двумя одновременно включаемыми транзисторами MOSFET типа IXFN82N60P ($V_{DSS} = 600$ В, $I_{D25} = 82$ А). Максимальная рабочая частота КвРП $F_{раб} = 150$ кГц. Габаритная мощность $Tr_{уп}$ лежит в пределах 12–14 ВА. Импульсный трансформатор формирует импульсы включения и отключения ЭК с помощью двух выходных обмоток, гальванически развязанных от силового постоянного напряжения. При этом сердечник этого трансформатора, выбранный по каталогу фирмы MAGNETICS, имеет вес 3 г, а потери в магнитопроводе, вычисленные по формуле, приведенной в [27], составили $P_{пот} \approx 0,5$ Вт при максимальной частоте КвРП 150 кГц. Это означает, что вопрос оптимальной структуры усилительного выходного каскада управления ЭК требует дополнительных исследований для его конкретного выбора между потенциальной схемой с накопительным конденсатором БК или при использовании развязывающего $Tr_{уп}$. Не исключено, что в ряде случаев применения может оказаться оптимальной структура драйвера с применением импульсного трансформатора.

3. Проблема создания интеллектуальных («разумных») силовых мощных модулей подталкивает разработчиков драйверов включать контроллер (управляющий типом модуляции силовых приборов), а может, и весь модуль управления процессами преобразования энергии в состав схемы драйвера. При этом может значительно упроститься проблема защиты (автоматической) от перегрузок по току ЭК, а также безопасного (повторного, пробного) включения СУ в режиме короткого замыкания в нагрузке. С другой стороны, узлы управления режимами рабочего процесса всего СУ объединяются в системный командный блок, который можно назвать блоком управляющих функций (БУФ). БУФ решает задачи безопасного запуска системы, выбора режимов работы, если их несколько, безопасного выключения энергетического оборудования, контроля входных и выходных ключевых параметров СУ, отслеживания критичных режимов работы, например входного сетевого напряжения и тока нагрузки, в том числе и токов через ЭК и т. п. Возможно, ключевым качеством, определяющим выбор структуры драйвера нового поколения, является оптимальное

распределение управляющих функций между включением некоторых из них в схему драйвера и сосредоточением других (остальных) в схеме БУФ. Этот аспект выбора необходимо рассмотреть на этапе исследований и разработки технического задания для драйвера нового поколения.

4. Конструкция драйвера и его расположение в общей структуре дизайна (синтеза) всех блоков и узлов изделия чрезвычайно важны и должны соответствовать следующим требованиям:

- Выходные клеммы драйвера должны быть расположены на минимальном расстоянии от затворов ЭК. Для мощных выходов необходимо применять медные шины с целью уменьшения паразитных индуктивностей и снижения потерь в силовых трассах.
- Низковольтные управляющие ИС и чувствительные узлы управления необходимо располагать вдали от силовых проводников.
- Для улучшения качества и сокращения времени ремонтпригодности всего изделия необходимо стремиться к тому, чтобы максимально упростить монтаж/демонтаж драйвера в конструкции СУ.

Продолжение следует

Литература

1. Эраносян С. Ключи к возрождению производства российской силовой электроники. Часть 1 // Силовая электроника. 2013. № 2.
2. Эраносян С., Ланцов В. Эволюция импульсных источников вторичного электропитания: от прошлого к будущему. Часть 2 // Силовая электроника. 2009. № 1.
3. Эраносян С. А., Журавлев Б. Н. Особенности построения бестрансформаторных инверторов // Тезисы докладов Всесоюзной НТК «Современные задачи преобразовательной техники». Ч. 6. Киев. 1975.
4. Эраносян С. А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат. 1991.
5. Пат. 3.914.679 (США) МКИ³ H02M5/453. Источник питания на транзисторах высокого напряжения с использованием схем ключевого стабилизатора и преобразователя постоянного тока в переменный ток // Открытия. Изобретения. 1976. Вып. 50. № 1.
6. Полузаказные «разумные» мощные ИС на базе матричных кристаллов, создаваемых всего за 45 суток // Электроника. 1988. № 10.
7. Васильев Г. В., Петровский Г. В. Особенности программно-технического обеспечения САПР БИС на основе БМК // Программа отраслевой НТК «Интегральные сервисные цифровые сети связи с коммутацией пакетов». Ленинград. 1986.
8. Губанов Д. Н., Зябкина Г. С., Беляев В. А. Базовый матричный кристалл для проектирования КМОП БИС // Программа XXVIII конференции молодых ученых и специалистов. ВНИИТ. Ленинград. 1987.
9. Малашевич Б., Симонов Б. Отечественные базовые матричные кристаллы. www.angstrom.ru
10. Слынько В. П. Интегральная схема управления частотно-импульсными ИВЭ с частотой преобразования до 1,5 МГц. Сб. докладов семинара «Источники вторичного электропитания с частотно-импульсной модуляцией. Практика разработки». М. 1991.
11. Эраносян С. А., Ланцов В. В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 2 // Силовая электроника. 2008. № 1.
12. www.pulsarnpp.ru
13. Васильев А., Крымко М. Развитие силовых полупроводниковых приборов и модулей. Актуальные проблемы // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2008. № 4.
14. Иванов В. В., Колпаков А. И. Применение IGBT // Электронные компоненты. 1996. № 12.
15. Шитиков А. Высоковольтные драйверы фирмы International Rectifier // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 1997. № 6.
16. Колпаков А. Мощные интегральные микросхемы серии IRIS40xx для импульсных источников питания нового поколения // Электронные компоненты. 2002. № 8.
17. «Платан». Электронные компоненты. 2002. № 3.
18. Волошин С. Современные драйверы IGBT и мощных полевых транзисторов // Компоненты и технологии. 2003. № 5.
19. Козенков Д. Драйверы MOSFET и IGBT // Современная электроника. 2005. № 6.
20. Россберг М., Воглер Б., Херцер Р. Драйверы MOSFET/IGBT технологии SOI с усовершенствованными каскадами сдвига уровня // Компоненты и технологии. 2007. № 12.
21. Integrated Circuits Unitrode. Product & Applications Handbook 1995–1996. USA. 1995.
22. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силовая электроника. 2008. № 1.
23. Pelly V. R. Используйте величину заряда затвора при проектировании схемы драйвера затвора мощных МОП ПТ и БТИЗ. Статья по применению продукции IR. AN-944A.
24. Гудинаф Ф. Высоковольтная ИС управления транзисторами с защитой от перегрузок по току // Электроника. 1991. № 9.
25. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
26. Гудинаф Ф. Высоковольтные схемы управления транзисторами, использующие низковольтные ИС и импульсный трансформатор // Электроника. 1991. № 9.
27. Эраносян С., Мацерат И. Проблемы разработки и выбора унифицированных узлов и блоков вторичного электропитания для РЭА морского флота. Часть 2. // Силовая электроника. 2012. № 4.