

# Драйверы МОП-транзисторов и приёмка «5»: всё ли так просто?

Павел Новиков (г. Орёл)

В статье обсуждаются практические вопросы создания драйверов МОП-транзисторов для жёстких условий эксплуатации.

На сегодняшний день силовые биполярные и полевые транзисторы с изолированным затвором приобретают всё большую популярность. И если не так давно хорошие силовые транзисторы производились только за рубежом, то сейчас ситуация изменилась – БТИЗ- и МОП-транзисторы производства ВЗПП-С (г. Воронеж), «Ангстрем» (г. Зеленоград) или ФЗМТ (г. Фрязино) мало чем уступают зарубежным аналогам. При этом они имеют неоспоримое преимущество: соответствие требованиям приёмки «5». Учитывая существующую тенденцию к перевооружению ВС, задача использования современных транзисторов с изолированными затворами в аппаратуре специального назначения является актуальной.

В свою очередь, такая задача требует решения сопутствующих проблем. В частности, любым транзистором надо управлять, а значит, необходим драйвер. И если схемы управления, конструктивные особенности и т.п. могут почти не меняться (относительно старой аппаратуры), то от разработки такой новой для многих микросхемы, как драйвер БТИЗ- и МОП-транзисторов, отказаться невозможно. Но так ли просто разработать драйвер отечественной комплектации, да ещё и с приёмкой «5»?

В предлагаемой статье приведён опыт такой разработки. Материал может оказаться полезным разработчикам оборудования специального назначения, в котором задействованы силовые транзисторы с изолированными затворами. Подразумевается, что человек, читающий эту статью, уже знает, что такое драйвер БТИЗ- и МОП-транзисторов и каковы его функции; осведомлён о проблемах, ожидающих его при разработке такого устройства; знает, как и на какой элементной базе можно создать драйвер с приёмкой «1». Даже если разработчик

ранее имел дело с конструированием драйверов специального назначения, быть может, и он узнает что-то новое.

Допустим, требуется разработать стандартный драйвер полумоста, функционально близкий к популярным приборам фирм Semikron или ST Concert. Это означает, что драйвер должен включать в себя следующие узлы:

- входную логику с функциями формирования «мёртвого времени», блокировки управления в режиме аварии и автоматического отключения через определённое время;
- развязку вход/выход с электрической прочностью не менее 4000 В;
- DC/DC-преобразователь;
- оконечный каскад, обеспечивающий необходимый импульсный и средний ток;
- схемы защиты (от превышения и понижения напряжения на затворе, от перенапряжения на переходе коллектор-эмиттер управляемого транзистора, от насыщения).

Кроме того, необходимо определиться с конструктивом драйвера. Само собой, что всё вышперечисленное должно отвечать требованиям приёмки «5». Элементная база для входной логики драйверов с приёмкой ОТК и приёмкой «5» в сущности отличается мало. Выбор логических микросхем специального назначения достаточно широк, и, как правило, проблем с их поставкой не возникает. Если для гражданских драйверов используются триггеры Шмита CD4093 или 74AC132, то для военных это будут 564ТЛ1 и 1564ТЛ3 соответственно. Хотя здесь и есть небольшое отличие: микросхемы CD4093 обладают большим быстродействием, чем 561ТЛ1, поэтому если отладка опытного варианта драйвера проводилась на CD4093, то на функциональном аналоге динамические характеристики схемы могут не сохраниться. Кроме того, динамические па-

раметры 564ТЛ1 зависят от напряжения питания. Если при напряжении 15 В задержка вход/выход составляет 60...80 нс, то при 5 В она увеличивается до нескольких сотен наносекунд, при этом изменяясь от температуры. С микросхемой 1564ТЛ3 при питании 5 В таких проблем не наблюдается. Отсюда следует, что серию 561 следует использовать, если только питание входной логики составляет 15 В, и уменьшить его никак нельзя. Во всех остальных случаях (и если требуется высокое быстродействие схемы) 1564ТЛ3 предпочтительнее. Справедливости ради следует сказать, что серия 561 надёжнее и эти микросхемы легче приобрести, поэтому если быстродействие не критично, то предпочтение следует отдать 564ТЛ1.

Входная логика обязательно должна включать в себя триггеры Шмита в качестве входных буферов, но все прочие её функции можно реализовать и на других микросхемах. Если для одноканального драйвера, как правило, достаточно одной микросхемы (один корпус 564ТЛ1 или 1564ТЛ3) для выполнения всех логических функций, то для двухканального требуется от трёх до шести таких микросхем, не считая ИС, формирующих «мёртвое время». Объясняется это более сложным алгоритмом работы двухканального драйвера, особенно в аварийном режиме работы, и дополнительными функциями.

Конечно, можно упростить задачу: убрать режим внешнего управления сбросом аварии, не обращать внимания на проскакивающие «некрасивые» импульсы на выходе того канала, который не находится в аварийном режиме, допустить переключение не по передним фронтам, а на любой части управляющего импульса, и т.д. Всё это значительно упрощает входную логику, а значит, снижает трудоёмкость разработки и уменьшает габариты. На частотах до 10...20 кГц такие «ослабления» допустимы, но если частота составляет сотни килогерц, то упростить схему уже не получится, в противном случае это обернётся «хроничес-

кими» выходами из строя управляемых транзисторов. И если поставлена задача создать драйвер с рабочей частотой до 100 кГц и выше, то габариты схемы существенно увеличиваются.

Выходом из данной ситуации является использование контроллеров, например, 1880BE71 или 1893BE1 производства «Интеграл», г. Минск. Если для одноканальных драйверов использование контроллеров является избыточным, то для двухканальных – практически необходимым. Для разработки устройства на контроллере гораздо сложнее, особенно в топологии. Однако если требуются небольшие габариты драйвера, то отказаться от контроллера не получится.

Допустим, входная логика спроектирована; далее требуется передать логический сигнал с входа на гальванически развязанный выход драйвера. Здесь существуют два варианта: оптическая или трансформаторная развязка. Оптическая развязка по реализации несравнимо проще. Выбор оптоэлектронных пар импортного производства с хорошим быстродействием и прочностью изоляции 4000 В достаточно велик, например, TLP250 или HCPL2201. Однако оптопар с приёмкой «5» просто не существует. Есть приборы либо с хорошей изоляцией, но малым быстродействием, либо с хорошим быстродействием, но с изоляцией, подходящей только для драйверов, используемых в преобразователях на напряжение не более 100 В. К последним относятся, например, микросхема 249ЛП8 или специализированная микросхема управления транзисторами с изолированными затворами 5П158 (обе – производства «Протон», г. Орёл). Микросхемы хорошие, но изоляция у них 500 В; 600 В они уже не выдерживают.

Требуемые габариты драйвера (например, 2005XX1 производства «Электрум АВ», г. Орёл) часто не позволяют использовать трансформаторную развязку из-за её сложности и значительных размеров. В этом случае можно попытаться приобрести отечественные военные оптопары с изоляцией 4000 В, но это – совсем другая история.

Трансформаторная развязка в смысле элементной базы гораздо проще, но эта простота «компенсируется» сложностью реализации. В простейшем случае трансформаторную развязку можно реализовать следующим образом: подаётся разрешающий сигнал,

по которому трансформатор начинает управляться как в обычном DC/DC-преобразователе; на выходе импульсы выпрямляются и сглаживаются, тем самым, непосредственно или косвенно, формируя отпирающий импульс в выходной цепи драйвера. Схема несложная, но с существенным недостатком: её быстродействие составляет в лучшем случае несколько микросекунд, и работать она может на частотах не выше нескольких десятков килогерц, а потому используется очень редко.

Другой вариант – использование трансформатора как части дифференцирующей цепочки, на которой выделяются передний и задний фронты, служащие метками для восстановления сигнала на выходе драйвера. Составными частями такой схемы являются входной формирователь коротких импульсов по переднему и заднему фронту сигнала управления, трансформатор и выходной каскад, восстанавливающий входной сигнал.

Далее появляется выбор: либо использовать логику (триггер), восстанавливающий привычный сигнал (как делает Semikron), либо заряжать/разряжать импульсами с трансформатора ёмкость или даже ёмкости затворов транзисторов оконечного каскада драйвера, если в последнем используются полевые транзисторы (как делает ST Concert). Первый вариант проще в разработке и отладке, но, как и второй, требует больших габаритов. Последнее объясняется тем, что вышеупомянутая схема критична к утечкам и динамическим параметрам используемых в ней компонентов, особенно к коэффициентам усиления биполярных транзисторов и их частотным свойствам, а также ко времени восстановления антипараллельного диода и заряду затвора для полевых транзисторов. Все эти параметры у элементов с приёмкой «5» традиционно хуже, чем у импортных приборов.

Для иллюстрации вышесказанного приведём пример. Требовалось собрать малогабаритную схему управления верхним ключом с трансформаторной развязкой для изделия с приёмкой «5». Схема – что-то вроде тиристора на полевых транзисторах. Для отладки использовались транзисторы IRLML2402, на которых схема работала быстро и хорошо, после чего они были заменены на близкие по параметрам КП505. В результате мощность импульса заряда затвора значи-

тельно снизилась (за счёт потерь на перезаряд затворов транзисторов схем управления), и пришлось увеличивать габариты трансформатора. Из-за слишком большого времени восстановления антипараллельного диода затвор после заряда успевал наполовину разрядиться, – пришлось этот диод исключить и установить быстрый обратный диод. Как следствие, возросло падение напряжения и увеличилась проходная ёмкости цепи заряда затвора. Пришлось домотать вторичную обмотку трансформатора, в результате выброс на включении стал приближаться к 20 В. Пришлось установить стабилитрон, утечки которого разряжали затвор с неприемлемой скоростью. В результате схема более или менее заработала, но габариты стали недопустимо большими, и в конечном итоге от неё пришлось отказаться. Это – дополнительное подтверждение того, что даже макетирование изделия с приёмкой «5» надо проводить на отечественной комплектации, иначе придётся переделывать уже собранный прибор.

Следующий этап – изготовление DC/DC-преобразователя. Для управления преобразователем существует огромное количество микросхем импортного и отечественного производства с приёмкой ОТК, например, 1211EY1 – простая и надёжная микросхема в корпусе SO-8. Для приёмки «5» также существуют такие микросхемы, например, 1156EY2 (аналог UC3825), но уже в корпусе внушительных размеров, что не очень удобно. Кроме того, микросхема 1156EY2 требовательна к топологии. Если обратная связь не используется, то печатные дорожки можно заводить как угодно, ничего страшного не будет. Если же обратная связь используется, то необходимо провести широкую землю без петель, чтобы на эту землю не наводились помехи от переключения силовых транзисторов преобразователя; питание также должно быть чистым; вся обвязка должна находиться как можно ближе и т.д.

Самый удобный, точный и надёжный способ – завести обратную связь через оптопару с выходного питания преобразователя. Но, как уже было сказано, такой способ приемлем для драйверов с изоляцией до 500 В, на 4000 В оптопар с приёмкой «5» нет. Выполнить обратную связь на отдельном трансформаторе – очень сложно и ненадёжно. Делать драйвер без какой-ли-

бо стабилизации по питанию – неправильно. Конечно, если нагрузка для трансформатора небольшая, т.е. на максимально допустимом выходном токе драйвера напряжение на вторичных обмотках трансформатора не «проседает», и если при этом входное напряжение изменяется незначительно (на проценты от номинального), то можно обойтись и без обратной связи. В такой ситуации колебания выходного напряжения будут вызывать только изменение магнитной проницаемости феррита от температуры, и это будет особенно заметно при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$  под нагрузкой, но в любом случае можно уложиться в диапазон  $+12...18\text{ В}$ . Если нагрузка изменяется в широком диапазоне (от десятков мА на холостом ходу до сотен мА на максимальной нагрузке) или драйвер должен обеспечивать свои параметры при разбросе напряжения питания 10% и более в температурном диапазоне  $-60...85^{\circ}\text{C}$ , то без стабилизации напряжения не обойтись. Можно установить линейный стабилизатор на выходе, но этот способ приемлем только для маломощных драйверов, иначе появляются тепловые потери и сопутствующие им проблемы.

Наиболее подходящим способом организации обратной связи в такой ситуации является использование измерительной обмотки на трансформаторе. Минус такого способа – снижение КПД преобразователя (дополнительная нагрузка), но за это мы получаем адекватное, пусть и косвенное, представление о напряжении в выходных цепях драйвера. Использование дополнительной обмотки позволяет избежать гальванически развязанных цепей обратной связи, а значит, избавляет от проблем с отсутствием высоковольтных оптопар и сложностями в организации схемы на трансформаторе. Безусловно, такая обратная связь малоэффективна для отслеживания тока нагрузки, но с этим можно справиться простым увеличением размеров трансформатора, если позволяют габариты.

Отдельно следует обсудить исполнительные элементы, а именно, силовые транзисторы, выпрямительные диоды и собственно трансформатор. Зачастую в гражданских приборах в качестве сердечников трансформаторов используются кольца от фирмы Epcos, и разработчик, взяв «аналогичное» отечественное кольцо, ожидает тех же вы-

ходных характеристик. Однако такая замена не проходит бесследно. Кольца Epcos при тех же габаритах и марке феррита выдают в несколько раз большую мощность и нормально работают на гораздо большей частоте, нежели отечественные ферриты. По сути нормальная рабочая частота для отечественных ферритов марок 1500НМ или 2000НМ составляет не более  $100...150\text{ кГц}$  без существенных потерь КПД, но лучше, если эта частота лежит в диапазоне  $50...80\text{ кГц}$ . Кроме того, отечественные кольца чувствительны к перегреву; при заявленной точке Кюри в  $200^{\circ}\text{C}$ , фактически кольцо (на поверхности) не должно нагреваться более чем до  $90...100^{\circ}\text{C}$  (в отличие от колец Epcos, которые нормально переносят и  $150^{\circ}\text{C}$ ), иначе трансформатор начинает насыщаться со всеми вытекающими последствиями. Вообще трансформатор преобразователя не должен нагреваться свыше  $40...50^{\circ}\text{C}$  при нормальных условиях, иначе могут возникнуть проблемы при температуре  $+85^{\circ}\text{C}$ . В итоге, если используется сердечник импортного производства, то при переходе на отечественное кольцо его размер должен быть увеличен как минимум до следующего типоразмера с соответствующим уменьшением рабочей частоты.

Существуют сложности и в выборе силовых транзисторов и выпрямительных диодов. Несмотря на довольно большой выбор полевых транзисторов с приёмкой «5», почти все они выпускаются в корпусах ТО-92, даже если их максимальный ток стока составляет всего несколько ампер. Поэтому если требуется ток несколько сотен миллиампер, то использовать такие большие корпуса нецелесообразно. Выход – применять в маломощных драйверах в качестве силовых транзисторов не полевые, а биполярные  $n-p-n$ -транзисторы, включённые по схеме с открытым коллектором. Тем самым и габариты уменьшаются, и проблем с поставками, как правило, не возникает. Если же выходной ток драйвера составляет  $0,5\text{ А}$  и выше, то лучше использовать полевые транзисторы с изолированным затвором.

Похожая ситуация наблюдается и с выпрямительными диодами. Конечно, лучше всего использовать диоды Шоттки, выбор которых с приёмкой ОТК весьма широк (например, серии VQ или STQ), да и с приёмкой «5» есть из чего выбрать. Пример –

2ДШ2123Д94 (производство ВЗПП-С, г. Воронеж), аналог 10BQ100; но корпус у наших аналогов значительно больше, что, безусловно, создаёт проблемы при проектировании драйвера малых габаритов. Если выходной ток драйвера невелик (в пределах  $100\text{ мА}$ ), то вполне подойдут и обычные выпрямительные диоды в металлокерамических корпусах или биполярные транзисторы в диодном включении.

После успешной разработки узлов управления, гальванической развязки и питания, подходит очередь окончательного каскада драйвера. Прежде всего необходимо определиться с типами транзисторов. Существуют три варианта: комплементарная пара биполярных транзисторов, комплементарная пара ключевых полевых транзисторов, пара  $n$ -канальных полевых транзисторов.

Самый простой вариант – комплементарная пара биполярных транзисторов. Это, во-первых, несложная схема управления, во-вторых, гарантированное отсутствие сквозных токов при переключении, в-третьих, простота реализации плавного выключения в аварийном режиме. Чуть более сложный вариант – комплементарная пара полевых транзисторов. И совсем сложно реализовать схему полноценного полумоста на  $n$ -канальных транзисторах, т.к. здесь требуется гальванически развязанный драйвер верхнего ключа и точное выравнивание задержек на включение и выключение (до нескольких нс) во избежание «ступенек» на фронтах или сквозных токов.

Впрочем, выбор типа окончательного каскада для драйвера с приёмкой «5» обусловлен, скорее, не схемными предпочтениями, а наличием соответствующей комплектации.

Оконечный каскад на биполярных транзисторах подразумевает использование комплементарной пары ( $n-p-n/p-n-p$ ) транзисторов. Несмотря на большой выбор  $n-p-n$ -транзисторов и неплохой выбор транзисторов  $p-n-p$ , комплементарных пар практически нет. Те транзисторы, что указаны в перечне МОП, давно не выпускаются (потеря технологий особенно затронула  $p-n-p$ -транзисторы). Можно, конечно, использовать похожие транзисторы, но это приведёт к искажению формы импульсов, неравномерности токов включения и выключения, температурным разбалансам и т.п. Для драйвера очень хорошо подошли бы

составные транзисторы КТ972 и КТ973, но с приёмкой «5» их нет. Тем более отсутствуют комплементарные пары более мощных и быстрых биполярных транзисторов.

И всё же подходящие транзисторы существуют – это 2Т664 и 2Т665 (производство «Кремний-маркетинг», г. Брянск). Это – довольно быстрые транзисторы, хотя и с относительно небольшим максимальным током коллектора и совсем небольшим коэффициентом усиления. Однако эти транзисторы хорошо работают в параллельном включении, и если применить несколько каскадов предварительных усилителей, то можно получить приемлемые выходные характеристики. В лучшем случае на 2Т664 и 2Т665 можно получить длительность фронтов на холостом ходу около 50 нс и импульсный ток включения/выключения 30...40 А (три каскада на 2Т3130/2Т3129 и 15...20 (!) пар 2Т664/2Т665 в окончательном каскаде). Дальнейшее экстенсивное наращивание мощности результатов почти не даёт, и вряд ли на данной комплектации можно получить импульсный ток свыше 40 А. Недостаток такого решения очевиден – большие габариты, хотя простота и, как следствие, надёжность того стоят. Использовать пару 2Т664 и 2Т665 целесообразно, если требуется выходной ток драйвера до 15 А (тогда достаточно одного каскада предусилителя и три параллельные пары). Но если требуется большая мощность, то на биполярные транзисторы ориентироваться не следует.

Оконечный каскад на комплементарной паре полевых транзисторов для драйвера с приёмкой «5» – решение весьма спорное по той простой причине, что выбрать р-канальный транзистор практически не из чего. С приёмкой «5» представлены транзисторы 2П7209 производства «Транзистор», г. Минск, и несколько приборов от «Ангстрем», г. Зеленоград (воронежские р-канальные транзисторы находятся на стадии освоения). Особым быстродействием они не отличаются, хотя имеют комплементарные пары. В результате получается драйвер на ток до 40 А, но возникают проблемы организации управления этими транзисторами и плавного выключения. Если же драйвер делается с «чистого листа» и требуется выходной импульсный ток 30 А и выше, то выбор схемы очевиден – полумост на n-канальных полевых

транзисторах с изолированными затворами.

Несмотря на сложность схемы, полумост на n-канальных полевых транзисторах обладает потенциально лучшими характеристиками по сравнению с вышеописанными вариантами. Конечно, транзисторы с приёмкой «5», обеспечивающие время включения/выключения 10...20 нс, недоступны, но удовлетворительные динамические (фронты в пределе 40 нс) и мощностные (импульсный ток 40...50 А) характеристики получить можно. Транзисторы какого производителя использовать лучше – сказать трудно, но, главное, есть выбор.

Силовой транзистор необходимо защитить от различного рода «неприятностей», а именно, от выхода из состояния насыщения, от перенапряжения или недостаточного напряжения на затворе и, по возможности, от превышения напряжения сток-исток (коллектор-эмиттер).

Самая простая задача – защита от недостаточного напряжения на затворе – решается обычным компаратором, контролирующим выходное положительное напряжение питания, и эти схемы, – что с приёмкой ОТК, что с приёмкой «5», – в сущности, не отличаются.

Следующая задача – защита от перенапряжения на затворе. В простейшем случае требуется ограничитель напряжения между затвором и эмиттером (истоком). Для драйверов с приёмкой «1» чаще всего используются ограничители типа 1,5KE18 либо стабилитроны (например, ВZХ55С18), если выбросы на затворе не велики. С приёмкой «5» также можно подобрать похожую комплектацию: 2С518 (НЗПП, г. Новосибирск) или ограничители того же производителя. Единственная сложность – ограничители на мощность 1,5 кВт (в драйверах, используемых в мощных преобразователях, лучше устанавливать мощные ограничители, а не стабилитроны) и на номинальное пробивное напряжение 18 В не существует, как и на напряжение 17...19 В. (напряжение ограничения 15 В слишком мало, а 20 В – слишком велико). Впрочем, подобрать необходимое напряжение ограничения можно установкой двух ограничителей последовательно, здесь выбор имеется.

Также не представляет особой сложности защита от перенапряжения

сток-исток (коллектор-эмиттер) управляемого транзистора. Конечно, выбор ограничителей для этой цели невелик, но один подходящий прибор всё же доступен, это – 2Р236А (НЗПП, г. Новосибирск), небольшой по габаритам, достаточно высоковольтный и довольно быстрый ограничитель, не уступающий 1,5KE300.

Самая сложная задача – организация защиты от перехода транзисторов в линейный режим. Для драйверов с приёмкой ОТК существуют специализированные микросхемы управления транзистором с функцией защиты от ненасыщения, например, МС33153, целая серия драйверов от International Rectifier или HСРL316, с которой задача построения не очень мощного и быстрого драйвера значительно упрощается. С приёмкой «5» таких микросхем нет, поэтому надо строить схему на дискретных элементах.

В теории всё выглядит очень просто: источник тока и компаратор, выходной сигнал которого блокирует управление, плавно выключает транзистор и подаёт сигнал через соответствующую развязку на входную логику драйвера. На практике всё оказывается сложнее. Проблемы начинаются уже с защитных диодов по цепи коллектора; для гражданских применений выбор очень большой, например, HER108, 1N4007 или диоды серии MUR – малогабаритные диоды средней мощности с быстрым восстановлением на напряжение более 1000 В. С приёмкой «5» подобных диодов нет. Подходящие приборы выпускает ВЗПП-С, г. Воронеж, – 2Д675А94 (400 В, 1 А); другие диоды либо низковольтные, либо слишком мощные, а избыточная мощность в данной схеме только мешает, т.к. на заряд проходной ёмкости диода тратится больше мощности источника тока, а значит, либо требуется упрочнить источник (рост габаритов), либо защита будет обладать низким быстродействием. Для получения обратного напряжения цепи коллектора 2000 В требуется пять диодов 2Д675А94 с размерами корпуса 7,6 × 10,2 мм. Итого площадь платы только под диоды составит около 450 мм<sup>2</sup>, что, конечно, несравнимо с площадью под два диода HER108. Если разработчик не сильно ограничен габаритами, это допустимо.

Другие проблемы в схемотехнике защиты от ненасыщения проявляются, как правило, в процессе отладки. Если драйвер низкочастотный (в пределах

десятков килогерц) и быстрдействие защиты составляет несколько микросекунд, то сделать правильно работающую схему защиты не так сложно. Если же требуется быстрдействие на уровне сотен наносекунд (драйвер на сотни килогерц), то задача усложняется.

Необходимо: убрать «дребезг» при включении и выключении; вычистить помехи до компаратора (избежать ложных срабатываний) и после него, т.к. даже незначительная наводка при срабатывании компаратора, усиленная предусилителем и оконечным каскадом, приводит к очень некрасивой картине на выходе драйвера; избежать «недосрабатывания» защиты, т.е. когда защита срабатывает, но не успевает заблокировать импульсы управления («двоение» импульсов перезапуска), и сделать однозначную задержку срабатывания защиты на пороге включения. Последнее, пожалуй, самое трудное. Если прочие проблемы можно устранить повышением быстрдействия схемы или правильной топологией, то с задержкой сложнее: компаратор (и ему подобные схемы) не могут срабатывать точно на каком-то напряжении непосредственно после прихода импульса плюс/минус несколько милливольт. Входная ёмкость схемы компаратора, переходные процессы при срабатывании, паразитные составляющие по входу компаратора и т.п. «растягивают» порог срабатывания, поэтому на границе ненасыщения длительность задержки срабатывания защиты всегда будет «плавать». Простое включение в схему обратной связи с выхода компаратора на один из входов этой проблемы не решает, т.к. чтобы эта обратная связь отработала, необходимо, чтобы компаратор уже сработал, а в этом срабатывании и есть проблема. Например, при использовании компаратора 1467СА1 без дополнительных стабилизирующих схем и выходном токе источника 2 мА задержка изменяется от 15 до 3 мкс при напряжении 10...12 В (норма срабатывания 10 В, номинальная задержка 3 мкс). Если эту ситуацию не исправить, то проблемы с представителем заказчика и с требованиями ТЗ наверняка обеспечены. В общем, собрать красиво работающую схему защиты по ненасыщению не так просто, как кажется на первый взгляд, и ещё сложнее, если габариты драйвера сильно ограничены.

Таким образом, у нас есть все составляющие схемы полноценного драйвера.

Осталось поместить данную схему в корпус. Инженер-электронщик часто недооценивает конструктивные и технологические проблемы, возникающие при корпусировании разработанной схемы. Драйверов, как импортных, так и отечественных, в металлических или металлокерамических корпусах на отечественном рынке силовой электроники не представлено (за исключением приборов от «Электрум АВ», г. Орёл), и непонятно, зачем такие корпуса вообще нужны? Действительно, в подавляющем большинстве случаев большого отвода тепла с драйвера не требуется, и следовательно, не требуется радиатора с корпусом. Стойкость платы драйвера к пыли, инею, росе, плесневым грибам и т.п. можно обеспечить покрытием платы соответствующим лаком, поэтому для герметизации корпус не нужен. Однако открытый стеклотекстолит не выдерживает испытаний на спецвоздействия, которые обязательно проводятся для военной аппаратуры.

Кроме того, в драйвере может быть использована комплектация с приёмкой «5», которая сама по себе, без защиты, не выдерживает спецвоздействий (например, вышеупомянутые 2Т664 и 2Т665 в пластмассовых корпусах). Следовательно, плата драйвера должна быть помещена в металлический (металлокерамический) корпус. Конечно, драйвер может использоваться в защищённой аппаратуре, когда всю ответственность за стойкость к спецвоздействиям берёт на себя заказчик. Тогда можно обойтись и открытой платой, но, как правило, заказчик на это не идет.

Итак, необходимо поместить драйвер в корпус.

*Проблема первая:* корпус. Несмотря на обилие корпусов импортного производства, готовых корпусов с приёмкой «5» нет. Следует рассчитывать на собственную конструкцию, т.е. делать корпус собственными силами либо заказывать у сторонних организаций. Корпус должен быть технологичным, герметичным (разработка и изготовление уплотнителей под крышку, если таковая имеется, – задача не проще и не дешевле, чем разработка самого корпуса) и эргономичным, т.к. подключить кабель к корпусу с различными выступами, креплениями и т.п. – задача сложная.

*Проблема вторая:* ограниченное пространство корпуса. Если выходной

средний ток драйвера составляет 100...200 мА, то особый теплоотвод не нужен. Но если требуется большая мощность? На открытой плате даже естественный теплоотвод значительно уменьшает нагрев силовых транзисторов и диодов; в крайнем случае под тепловыделяющий элемент можно поместить металлизированную площадку на плате или установить на корпус транзистора небольшой игольчатый радиатор. В закрытом корпусе естественная вентиляция отсутствует, и вышеупомянутые решения будут практически бесполезны. Элементы, склонные к нагреву, не только не будут охлаждаться, но и будут подогреваться всей схемой. Например, транзистор в корпусе ТО-92, нагревающийся при длительной работе и естественном охлаждении до 50...60°C в закрытом металлическом корпусе объёмом 7...10 см<sup>3</sup>, выходит из строя через 1 ч. Выход – помещать силовые транзисторы DC/DC-преобразователя и транзисторы оконечного каскада непосредственно на корпус с как можно меньшим тепловым сопротивлением (который станет теплоотводом). Это неизбежное решение приводит к другим проблемам, а именно, с изоляцией и ёмкостью.

*Проблема третья:* изоляция схемы от корпуса. Отодвинуть плату драйвера от корпуса, как правило, проблемы не составляет. Другое дело – разместить тепловыделяющие транзисторы на корпусе так, чтобы изоляция радиатор-корпус транзистора была не менее 4000 В. Можно установить транзистор на корпус через слюду с помощью прижима, но тогда тепловое сопротивление транзистор-корпус драйвера может оказаться недопустимо большим, да и конструкция получается не технологичной. Самый надёжный способ как в смысле теплового сопротивления, так и в смысле изоляции, – установка транзисторов на керамику, а керамики, в свою очередь, на корпус. Разумеется, все соединения паяные. Тем самым получается надёжная и функциональная конструкция, аналогичная конструкции силовых модулей. Однако керамику необходимо разработать и сделать (или заказать); необходимо соединение платы драйвера с керамикой, а это существенное усложнение конструкции; необходима корректировка топологии, чтобы элементы, чувствительные к перегреву, не были установлены на нижней стороне пла-

ты, т.е. непосредственно над теплопроводящими транзисторами. Но другого выхода нет.

**Проблема четвёртая:** ёмкость схемы на корпус. Установлен ли транзистор на корпусе через керамику или через слюду, – в любом случае мы получаем две обкладки конденсатора: с одной стороны – корпус драйвера, с другой – корпус транзистора. Ёмкость схемы на корпус не имеет принципиального значения для низкочастотных или низковольтных драйверов, поскольку в таких режимах работы потери на ней будут несущественными. Однако, если драйвер работает в преобразователе на напряжение более 500 В и на частоте от 50 кГц и выше, то потери из-за перезаряда вышеуказанной ёмкости будут значительными. Выход из этой ситуации только один – увеличение расстояния между корпусом драйвера и элементами схемы. Например, керамика с транзисторами толщиной 1,5 мм и площадью 50 см<sup>2</sup>, припаянная непосредственно на корпус, даёт ёмкость около 400 пФ (на частоте 1 кГц); если керамика находится на расстоянии 2,5 мм от корпуса, то ёмкость уменьшается примерно до 50 пФ. Но тогда возникает проблема с теплоотводом, т.к. из-за увеличения расстояния увеличивается и тепловое сопротивление. Наиболее эффективное решение данной проблемы – использование специальной заливки, обладающей малой диэлектрической проницаемостью и хорошими теплопроводными свойствами. Состав этой смеси пусть останется секретом.

**Проблема пятая:** герметизация, которая проявляет все недостатки в установке элементов. Если какой-то элемент установлен слишком высоко или плохо пропаян, он обязательно будет вырван; если провод на трансформаторе зачищен с изломом, провод будет оторван; если под оплёткой провода МГТФ осталась канифоль, он будет поломан и оторван. «Коварство» герметизации проявляется на термоциклировании. Необходимо знать, какой материал использовать. В зависимости от того, что именно защищается и с какими требованиями, должны быть выбраны различные типы герметиков и разная технология их заливки (количество отвердителя, температура застывания и т.д.). Иначе могут получиться пузыри, незалитые участки и, как следствие, проблемы с герметичностью, теплоотводом, изоляцией и

надёжностью в целом. Теплопроводные, изоляционные свойства и поведение всех материалов при высокой температуре отличаются, и, залив компоненты схемы теоретически подходящим герметиком, разработчик и технолог рискуют получить ненадёжный и зачастую неремонтопригодный прибор.

**Проблема шестая:** разъёмы. Для подключения входных и выходных цепей драйвера требуются разъёмы, и неприятность заключается в том, что малогабаритных разъёмов с приёмкой «5» с хорошей изоляцией попросту нет. Сложности с изоляцией заключаются либо в винтах крепления разъёма на корпус, которые находятся слишком близко к контактам, либо в близком расположении контактов к металлическому корпусу разъёма.

На изоляцию до 1000 В подходят разъёмы РШ(Г)-2Н или РПММ1; более того, разъём РГ-2Н фактически держит изоляцию и свыше 4000 В, но в его ответной части (РШ-2Н) контакты расположены очень близко к металлическому кожуху, и такой хорошей изоляции не получается. Более или менее держат изоляцию разъёмы СНЦ (фактически пробой происходит при 4200...4300 В) – удобные и надёжные разъёмы, но малогабаритными их назвать нельзя. Также хорошо держат изоляцию разъёмы группы РП, но их габариты мало кого могут устроить. Ещё сложнее с выходными разъёмами. Если импульсный ток драйвера составляет 10...20 А, то можно обойтись разъёмами СНЦ, но если выходной ток драйвера более 30...40 А – необходимы отдельные контакты под пайку. Ни малогабаритные разъёмы, ни резьбовое соединение (впрочем, проходных изоляторов с приёмкой «5» тоже нет) для таких мощностей не подходят. Например, резьбовое соединение М5 на импульсном токе 35 А (длительность импульса 200 нс, частота повторения 200 кГц) даёт сопротивление около 0,2...0,3 Ом. Если выходное сопротивление драйвера составляет 0,85 Ом (30 В/35 А), тогда на соединении теряется минимум 20% импульсного тока. В итоге получаем 28 А выходного тока вместо 35 А. Но как вывести площадки под пайку с изоляцией на корпус 4000 В и выше? Тут всё решает фантазия конструктора, – готовых решений нет.

**Подведем итоги.** Существуют проблемы с разработкой и изготовлением корпуса, с изоляцией и теплоотводом,

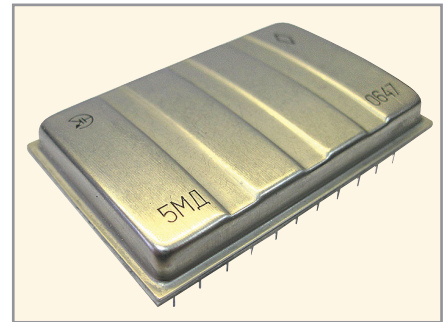


Рис. 1. Внешний вид драйвера 2005XX1

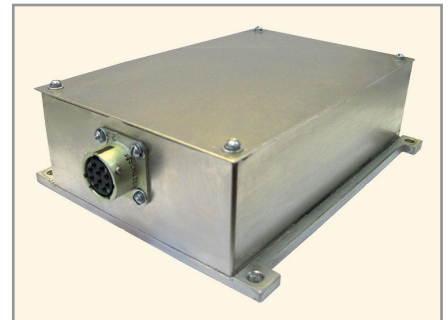


Рис. 2. Внешний вид драйвера 5ДРБ2300П-Б1

взаимной оптимизацией ёмкости и теплового сопротивления, с разъёмами (отсутствуют малогабаритные разъёмы с хорошей изоляцией), с герметизацией, с конструкцией и технологичностью. Образцов для подражания нет, – всё надо придумывать, основываясь на собственном опыте. Недоработки конструкции проявляют себя не сразу, а на второй-третий месяц испытаний на безотказность (постепенная деградация одного из кристаллов); проблемы с герметизацией – после десятого термоциклирования, проблемы с изоляцией – после появления трещин в изоляционных материалах через месяцы хранения и т.д. Избежать этого почти невозможно. Именно поэтому решение проблем, связанных с конструкцией и технологией, является самым затратным по времени.

Тем не менее, несмотря на все перечисленные выше проблемы, создать драйверы с приёмкой «5», близкие по параметрам к одним из лучших образцов импортных драйверов, можно. Например, такие, как военные драйверы 2005XX1 (маломощный драйвер, см. рис. 1) или 5ДРБ2300П-Б1 (высокочастотный мощный драйвер, см. рис. 2) от «Электрум АВ», г. Орёл. Сравнить первый драйвер, который разрабатывался уже довольно давно, можно с популярным импортным драйвером 2SD315 от ST Concept. Конечно, сравнение не совсем корректное, т.к. 2SD315 – двуканальный драйвер со встроенным DC/DC-преобразовате-

**Сравнение выходных параметров отечественных драйверов с приёмкой «5» и драйверов ST Concept**

Параметр	2SD315	2005XX1	1SC2060	5ДРБ2300
Максимальное напряжение коллектор-эмиттер управляемого транзистора, В	1700	1700	1700	1700
Выходные напряжения высокого и низкого уровня, В	+15/-15	+12...18/-5...18	+15/-10	+15/-15
Быстродействие защиты по насыщению (задержка срабатывания), не менее, мкс	4,9	1	1,2	0,5
Максимальная частота коммутации, кГц	100	100	500	500
Длительность фронтов по включению и выключению, нс	100/80 39 нФ/5,6 Ом	130/140 20 нФ/1 Ом	10/15 без нагрузки	60/40 без нагрузки
Выходной импульсный ток, А	+15/-15	+15/-14	+60/-60	+35/-38
Максимальный ток потребления, А (максимальная средняя мощность)	0,23 (один канал)	0,25	2,1	3,3

лем, в то время как 2005XX1 – драйвер одноканальный и собственного DC/DC-преобразователя не имеет. Тем не менее, идеологически – это очень близкие приборы. Второй драйвер будем сравнивать с самым мощным и быстрым на сегодняшний день серийным драйвером 1SC2060 той же фирмы ST Concept.

Как видно из **таблицы**, отечественные драйверы с приёмкой «5» уступают зарубежным драйверам, но их характеристики вполне сопоставимы даже в сравнении с лучшими образцами лучшего в мире производителя. На фоне аналогичных приборов Semikron отечественные драйверы смотрелись бы ещё лучше.

В заключение следует отметить, что прогресс не стоит на месте. За рубежом появляется второе поколение драйверов, в России – более или менее быстрые полевые транзисторы и неплохие контроллеры с приёмкой «5». Военный драйвер БТИЗ- или МОП-транзисторов – прибор не такой простой, как кажется на первый взгляд. Несмотря на все расчёты, затраты времени на разработку оказываются гораздо больше, чем предполагалось. По мере приобретения опыта проясняется реальное положение вещей. Главное – не

взяться за разработку драйвера под заказчика, пока не выяснены все проблемы.

