Гальваническая развязка

в силовых преобразователях специального назначения

В схемах управления силовой электроники практически всегда имеется гальваническая развязка. И если не по сигналам управления, то хотя бы гальваническая развязка верхних ключей инвертора присутствует обязательно. При разработке преобразователей на импортной комплектации здесь не возникает никаких проблем; существует множество специализированных микросхем и микросборок и для ВОЛС, и для развязки сигналов управления, и для драйверов силовых транзисторов. Это и опторазвязка, и трансформаторная развязка — словом, все, что угодно. Если же преобразователь должен быть собран на отечественной элементной базе (читай — преобразователь с «приемкой 5»), то все не так просто. Здесь организовать гальваническую развязку практически не на чем. Об этой проблеме и ее решении пойдет речь в настоящей статье.

Павел Новиков

Введение

В контексте гальванической развязки все преобразователи можно разделить на две группы: низковольтные — до 600 В (пиковое напряжение) и высоковольтные — свыше 600 В, в частности достаточно распространенные преобразователи 12- и 17-го классов. Первую группу, в свою очередь, можно разделить на две подгруппы: с полной гальванической развязкой цепей управления от силовых цепей и с развязкой верхних ключей инвертора, при этом схема управления и силовые цепи остаются гальванически объединенными. Вторую группу (преобразователи 12-го класса и выше) так разделять некорректно; для высоковольтных преобразователей обязательна полная гальваническая развязка управления от силовой схемы. И хотя зачастую разработчики используют преобразователи без полной развязки, это создает такое множество проблем с надежностью, безопасностью и помехоустойчивостью, что данный вариант рассматривать не следует. Далее обратимся к элементной базе каждой из этих групп.

Благодаря компании «Кремний Эл» (г. Брянск) самый простой вариант — это низковольтные преобразователи без полной гальванической развязки. «Кремний Эл» успешно (то есть *реально*, что немаловажно для микросхем специального назначения) производит микросхему 1308ЕУ3, являющуюся аналогом IR2113 от International Rectifier (Infineon). Данная микросхема, представляя собой драйвер полумоста с развязкой верхнего ключа прочностью 600 В, очень хорошо себя зарекомендовала и ее смело можно использовать по своему назначению. Единственный нюанс, который следует отметить из паспорта микросхемы совершенно непонятно значение напряжения управления. Указано «напряжение на выводе питания логической части» 5–20 В, из чего явно следует, что при питании 5 В можно осуществлять управление микросхемой с уровнем «лог.1» 5 В. Однако далее в паспорте указано: «Входное напряжение высокого уровня» *не менее* 9,5 В без привязки к напряжению питания. Значит, необходимо управление с «лог.1» 15 В. Из этого, помимо прочего, следует, что можно подать питание 5 В, а управление 15 В, что на самом деле, разумеется, недопустимо. На практике микросхема успешно работает как при питании 5 В (и «лог.1» 5 В), так и при питании 15 В (соответственно «лог.1» и 15 В). Единственно возможная здесь проблема: ВП может придраться, что нарушаются режимы эксплуатации (уровень «лог.1» ниже 9,5 В). Но тем не менее данная микросхема полностью решает проблему развязки верхних ключей для низковольтных преобразователей.

Для полной гальванической развязки 1308ЕУ3, к сожалению, не подходит, так как в данной микросхеме нижний ключ не изолирован от схемы управления. Необходимы микросхемы развязки (оптопары или на основе трансформаторной развязки) сигнальных цепей, а еще лучше — драйверы с развязкой. Прочность изоляции — не менее 1000 В (DC), а оптимально порядка 2000 В (DC) или 1000 В (AC). Начиная с 1980-х годов самая популярная микросхема для этих целей — 249ЛП8 производства «Протон» (г. Орел). Действительно, данная оптопара обладает достаточной прочностью изоляции (1500 В), очень хорошим быстродействием (задержки менее 100 нс) и проста в плане применения, однако при ее практическом использовании возникает одно «но», о котором, в связи с популярностью и практически безальтернативностью данной оптопары, будет сказано отдельно.

Помимо 249ЛП8, существуют и другие оптопары, сложнее в плане применения, медленнее, с менее прочной изоляцией, такие как, например, 3ОД120 или ряд диод-транзисторных оптопар, но такие микросхемы используются редко, поскольку каждая имеет какой-то критический недостаток, а потому о них речь идти не будет.

Есть и драйвер IGBT с опторазвязкой: 249АП1 также производства «Протон», который заявлен как аналог ACPL3120. Микросхема близка и к популярному драйверу TLP250. Однако и тут есть «но»: изоляция до 1500 В DC (у «аналога» 3750 В *AC*), то есть применяемость только для низковольтных преобразователей и несравнимо низкая устойчивость *du/dt* (которая, к слову, даже не нормируется). В результате 249АП1 никак не применим для той же области, что ACPL3120 или TLP250, и может использоваться только в низковольтных преобразователях по причине как низкой изоляции, так и слабой устойчивости к *du/dt*.

В последнее время появились и микросхемы специального назначения трансформаторной развязки. Например, 2015ВВ014 производства НПО «Физика» или 2011ВВ014 от ПКК «Миландр». Последняя микросхема позиционируется как ближайший аналог ADUM1200 от Analog Devices. И действительно, микросхемы функционально аналогичны и очень похожи по параметрам, кроме некоторых «маленьких нюансов»: габаритные размеры в несколько раз больше (22×38,5 мм (!) для корпуса МК4140.20-1 против 5×6 для SO-8), ток потребления в несколько десятков раз больше, а изоляция в несколько раз ниже. Изоляцию следует отметить отдельно: 2000 В (DC) против 2500 В (AC). В результате ADUM1200 и множество подобных микросхем можно использовать в преобразователях до 17-го класса, а 2011ВВ014 максимум до шестого класса. Хотя теоретически 2011ВВ014 можно использовать и для 12-го класса, выход из строя от этого не произойдет, но столь низкая прочность изоляции противоречит всем стандартам и такое схемное решение полностью на совести разработчика. Справедливости ради, низкая прочность изоляции — это проблема не производителей и не кристаллов, а «болезнь» металлокерамических корпусов, которые по своей конструкции (в частности, металлическая крышка) не могут обеспечивать приемлемую изоляцию. В итоге, и 2011ВВ014, и другие подобные микросхемы применять практически невозможно: для высоковольтных, относительно мощных и крупногабаритных преобразователей они не подходят по изоляции, а для низковольтных — по совершенно неприемлемым размерам. Площадь порядка 15×4 см (!) только на развязку — это редкая роскошь для маломощного низковольтного преобразователя.

В итоге и по габаритам, и по прочности изоляции, и по быстродействию 249ЛП8 остается вне конкуренции, чем и объясняется ее популярность. *Теоретически*. Практически 249ЛП8, без дополнительных схем, вообще неприменима для силовой электроники. Причина тому — уникально низкая устойчивость *du/dt*, порядка 100 В/мкс (измерено практически, производитель данный параметр не нормирует), в то время как у ближайшего аналога HCPL-2211 не менее 10 000 В/мкс, то есть в 100 раз (!) хуже. Это не мешает успешно эксплуатировать 249ЛП8 для развязки сигнальных цепей, например в различных интерфейсах, то есть в системах, не связанных с собственно силовой электроникой. Здесь, при напряжении 5 В, скорость *du/dt* редко превышает несколько десятков В/мкс. Но даже для низковольтного силового инвертора *du/dt* в лучшем случае составляет порядка нескольких сотен В/мкс, а для 12-го класса и несколько кВ/мкс вполне обычный показатель. Относительно большое воздействующее на оптрон *du/dt* приводит к возбуждению выхода оптрона: на включении/выключении появляется кратковременная генерация. Далее, при большем *du/dt* выход переходит в постоянное возбуждение (рис. 1): вместо закрытого состояния выходной транзистор «генерит» даже при закороченном светодиоде. Частота возбуждения — порядка 20 МГц, а при наличии хотя бы минимальной емкости нагрузки такая генерация сглаживается, и фактически сбой работы проявляется в «полуоткрытом» состоянии выхода, когда он должен быть закрыт. Как следствие, почти неизбежные выходы из строя: либо из-за увеличившейся задержки включения/выключения, либо из-за несанкционированного отпирания силового ключа.

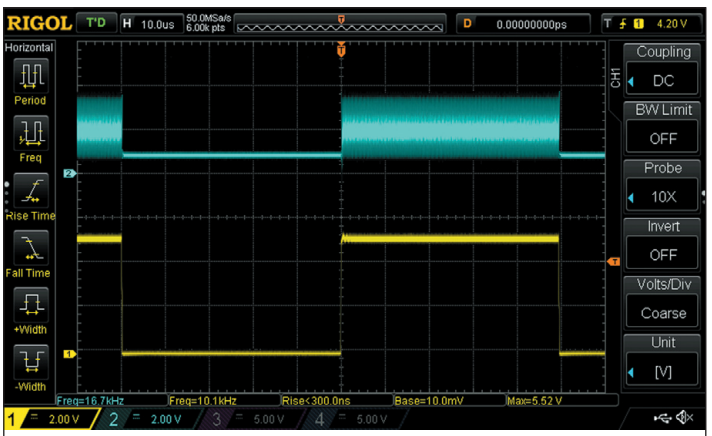

Рис. 1. Возбуждение выхода оптрона

Эта проблема (крайне низкая устойчивость к *du/dt*) характерна для всех быстродействующих оптопар производства «Протон» и, к сожалению, изготовителем никак не нормируется и тем более не исправляется. Как следствие — отдельная задача для разработчика преобразователя по исключению такого рода сбойных ситуаций. Один из наиболее эффективных способов (а нами, как активными пользователями данного рода оптопар, их было перепробовано множество) показан на рис. 2.

Резисторы на схеме рис. 2 порядка 1–10 кОм, в зависимости от параметров управляющей и выходной схемы. Резистивный делитель на выходе оптопары обеспечивает смещение уровня «лог.0» (период отпирания выходного транзистора оптопары), в результате чего напряжение в точке «Выход» значимо уменьшается (на 1–2 В) только при действительном отпирании выходного транзистора. Таким образом, при настройке последующего порогового элемента на уровень порядка 4 В возбужденное состояние уверенно считывается как «лог.1». Плюс к этому RC-фильтр, который, хотя и ухудшает быстродействие, успешно справляется с кратковременными помехами. Данный способ повышает устойчивость развязки до нескольких кВ/мкс. Но, тем не менее, не спасает полностью от сбойных ситуаций. Например, для высоковольтного преобразователя на основе 5П161Б (аналог 249ЛП8, но с изоляцией вход–выход не менее 4000 В DC) такого решения недостаточно; при значительных пусковых токах (порядка 100 А) не исключены сбои.

В итоге для низковольтных преобразователей существуют и микросхема с опторазвязкой, и микросхемы с трансформаторной развязкой, и даже развязанный драйвер IGBT. Все они имеют свои недостатки, но в принципе работать с этим можно, если позволяют габариты (для трансформаторной развязки) или если применены специальные схемные решения повышения устойчивости *du/dt* (для опторазвязки на основе 249ЛП8 и тому подобных оптопар). Для высоковольтных преобразователей (12-го класса и выше) применять такие микросхемы уже нежелательно. И если для подобных преобразователей на импортных комплектующих существует огромная элементная база, вплоть до микросхем законченных драйверов типа HCPL-316J, то в отечественной элементной базе, в частности заявленной в ЭКБ, нет *ничего*, что помогло бы решить задачу гальванической развязки высоковольтного преобразователя.

Фактически остается единственно возможный способ реализации развязки — трансформаторная развязка на отдельных, неспециализи-

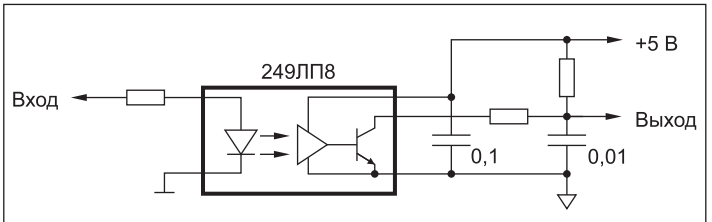

Рис. 2. Схема опторазвязки с повышенной устойчивостью *du/dt*

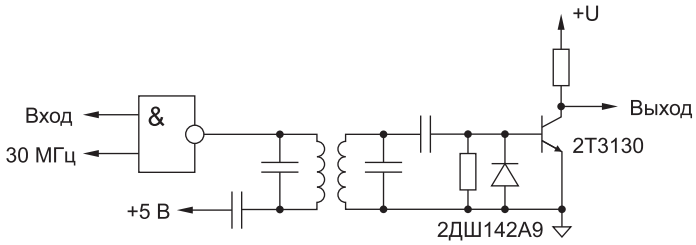

Рис. 3. Схема трансформаторной развязки

рованных элементах. Существует два основных принципа построения трансформаторной развязки. Первый — на основе модулирования сигнала управления высокочастотным сигналом, который и передается на выходную часть трансформатора, после чего интегрируется и тем самым восстанавливается исходный сигнал. Второй принцип — на основе выделения переднего и заднего фронтов управляющего сигнала, после чего эти импульсы передаются трансформатором, а исходный сигнал восстанавливается триггером выходной схемы. Второй принцип обладает значительным преимуществом в плане быстродействия (вполне реально добиться задержки менее 10 нс), но имеет и недостаток: более сложная схема на выходе (в частности, триггер, то есть для инвертора шесть триггеров) и неизбежное наличие «мертвого времени». Здесь «мертвое время» — период перемагничивания трансформатора, в который трансформатор еще не может передать последующий сигнал после предыдущего. На практике это означает, что если подать короткий импульс, то по фронту включения триггер на выходе взведется, а выделенный импульс на выключении будет недостаточной амплитуды, чтобы сбросить триггер. Как следствие, ложное состояние отпирания, что для инвертора наверняка означает выход из строя. Бороться с этой особенностью схемы очень

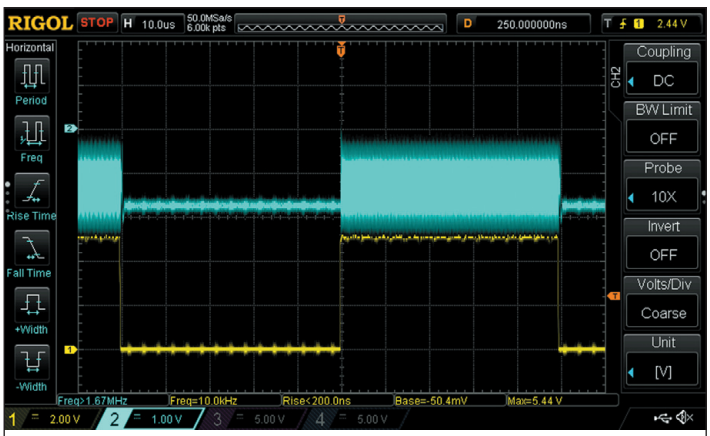

Рис. 4. Сигнал трансформаторной развязки

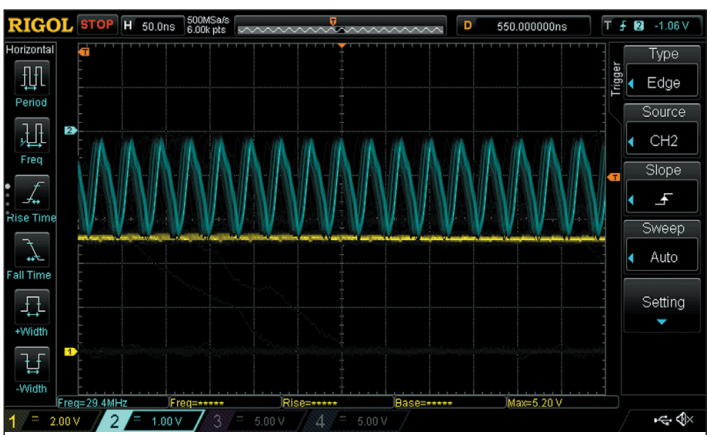

Рис. 5. Сигнал трансформаторной развязки

сложно, а итоговые габариты изделия могут оказаться совсем неприемлемыми.

Первый принцип хотя и обладает гораздо меньшим быстродействием, значительно проще в реализации. А учитывая, что для типового преобразователя вполне приемлемы задержки порядка нескольких мкс, такая организация гальванической развязки становится оптимальной. Тогда быстродействие схемы определяется только частотой модуляции сигнала управления. Без специальных схемных решений задержка такой трансформаторной передачи теоретически не менее чем в три раза больше периода, а практически больше в 5–10 раз. Следовательно, для обеспечения приемлемого быстродействия необходима частота 10–100 МГц, что соответствует задержкам в максимальных пределах 0,1–1 мкс. На рис. 3 показан пример схемы такой развязки.

Номиналы конденсаторов зависят от настраиваемой частоты контура. В частности, данная схема используется в модуле интеллектуального инвертора 5М31-50-12А (частота модуляции — 30 МГц). Осциллограммы работы такой развязки приведены на рис. 4 и 5, где сигнал канала 1 — управляющий, сигнал канала 2 — вторичная обмотка трансформатора.

Впрочем, схемных решений такого типа трансформаторной развязки множество, и на этом нет смысла заострять внимание. Также существует немало конструктивных решений. Наиболее распространенное — трансформатор на ферритовом кольце. Но подобное решение, несмотря на свою простоту и привычность, обладает целым рядом недостатков: трудоемкость сборки (шесть трансформаторов для одного инвертора), нетехнологичность, слабая виброустойчивость, относительно большие габариты и относительно низкая прочность изоляции. Например, для 5-мм кольца зазор между первичной и вторичной обмотками не позволяет получить прочность изоляции лучше 2 кВ (АС). Герметизация сборки для повышения прочности изоляции, помимо усложнения и еще большего ухудшения технологичности, чревата потерей устойчивости к термоциклированию, поскольку компаунд, который не разрывает 0,1–0,2-мм проволоку при расширении, — это отдельная задача. А тонкий изолированный высоковольтный провод отечественная промышленность еще не изобрела.

Но есть гораздо более простой и причем лучший по всем параметрам способ: трансформатор на печатной плате без сердечника как такового. На одной стороне стеклотекстолита «рисуется» первичная обмотка, на другой — вторичная. Связь между первичной и вторичной обмотками на частоте 10–100 МГц вполне достаточна для устойчивой передачи сигнала при индуктивности обмоток порядка мкГн. Конечно, КПД такого трансформатора (контура) невелик и желателен повышающий трансформатор, что легко реализовать последовательным включением обмоток, нанесенных на нескольких слоях многослойной платы, — в частности, в вышеупомянутом 5М31 две вторичные обмотки на третьем и четвертом слое платы, соединенные последовательно. Пример реализации такой развязки приведен на рис. 7.

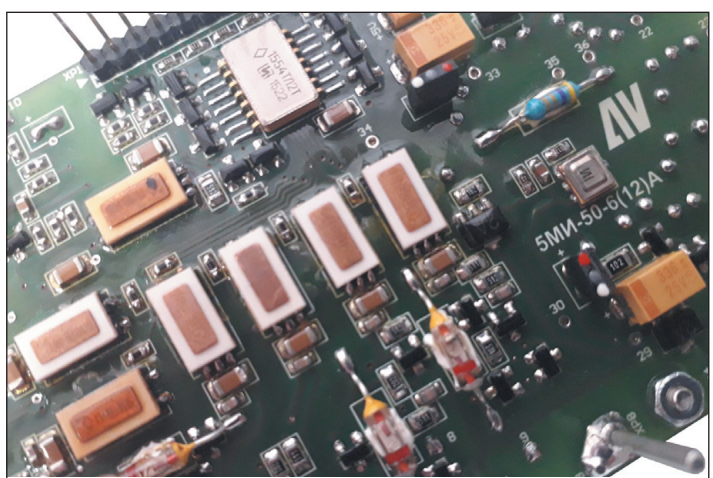

Рис. 6. Плата с опторазвязкой на основе 5П161Б

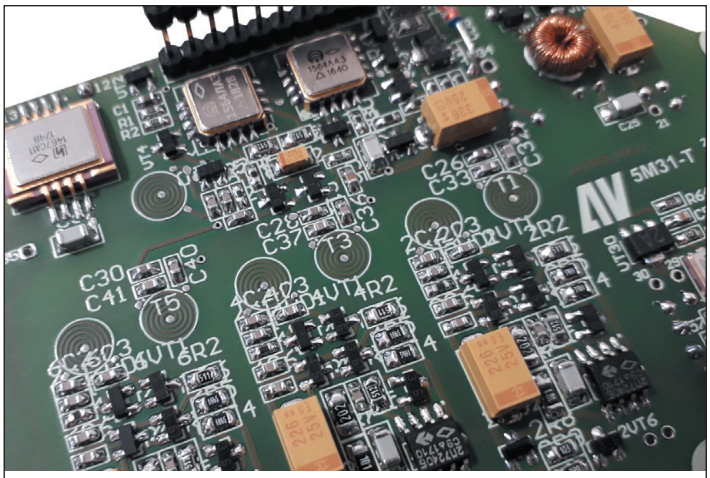

Рис. 7. Плата с трансформаторной развязкой

Если сравнивать опторазвязку на отечественных комплектующих и трансформаторную развязку в плане габаритов, то, как видно из рис. 6 и 7, трансформаторная развязка сильно не проигрывает. А если сравнить с 2011ВВ014 (и т. п.), то трансформаторная развязка, обладая площадью около 2–3 см^2 на канал, включая всю необходимую обвязку трансформатора, еще и выигрывает.

Изоляция предложенной конструкции трансформатора также значительно превосходит показатели микросхем. На рис. 8 приведены пробивные напряжения (АС, 50 Гц) для четырехслойной платы толщиной 1,5 мм производства «Резонит»; напряжения фактически измеренные. То есть если не учитывать ухудшение связи между обмотками при их отдалении, на обычном стеклотекстолите типа FR-4 теоретически можно получить развязку с прочностью изоляции 7,5 кВ (АС), что *в принципе* недостижимо для любых сборок в металлокерамических корпусах.

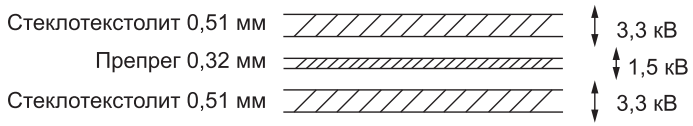

Рис. 8. Пробивное напряжение слоев платы

Таким образом, учитывая современное состояние элементной базы, гальваническую развязку в схемах управления силовыми преобразователями целесообразно реализовать следующим образом:

- Для низковольтных преобразователей без полной развязки — на основе 1308ЕУ3.
- Для низковольтных преобразователей с полной развязкой — надежнее на микросхемах с трансформаторной развязкой, если габариты позволяют, или на основе 249ЛП8 (и т. п. оптопар) со схемой повышения устойчивости *du/dt*.
- Для преобразователей 12-го класса без полной развязки — на основе микросхем с трансформаторной развязкой; оптопары производства «Протон» для этих целей почти неприменимы из-за крайне низкой устойчивости *du/dt*.
- Для высоковольтных преобразователей — на основе трансформаторной развязки на отдельных универсальных элементах. Это фактически безальтернативно. Наилучшее решение — развязка с модуляцией входного сигнала частотой 10–100 МГц и его передача через трансформатор, представляющий собой дорожки соответствующей формы на разных сторонах (слоях) печатной платы. Данный способ надежен в плане прочности изоляции, вибропрочности, температуроустойчивости, не занимает много места. Плюс к этому технологичен, прост в реализации и дешев, что, конечно, для изделия с «приемкой 5» последний аргумент, но тем не менее. По крайней мере нами получен положительный опыт при использовании такой развязки в высоковольтных преобразователях, тем более на фоне весьма отрицательного опыта организации развязки на основе отечественных оптронов.