

# Беспокойтесь по поводу долговременной надежности изоляции драйвера затвора?

Посмотрите на результаты тестирования,  
проведенного в ходе НИОКР VIER

**Все виды развивающихся повреждений изоляции начинаются с частичных разрядов. В статье рассматриваются проблемы долговременной надежности силовых преобразователей, в том числе инверторов и электроприводов, с точки зрения устойчивости их изоляционного барьера к частичным разрядам.**

**Маркус Штёгер  
(Markus Stöger)  
Перевод и дополнения:  
Владимир Рентюк**

## Введение

Современные транзисторы на полупроводниках с широкой запрещенной зоной (Wide Band Gap, WBG), благодаря возможности сверхбыстрого переключения при высоких напряжениях и низких потерях, приближаются к идеалу ключа, однако и современные МОП-транзисторы и IGBT с пазовой структурой затвора (trench IGBT — кристалл такого транзистора содержит вертикально расположенный затвор и слой, блокирующий носители) также способны демонстрировать достаточно высокие уровни  $dV/dt$  и  $di/dt$ . Тем не менее быстрое переключение в цепях «со стороны низкого уровня» (низкой стороны, нижнего плеча) может быть связано с переходными процессами в цепи драйвера затвора, вызывая хаотическую работу или повреждение полупроводникового прибора, в то время как драйверы «со стороны высокого уровня» (высокой стороны, верхнего плеча) подвержены проблеме, вызванной формированием сигнала управления и изоляцией

по цепи их питания. В статье рассмотрены последствия этой проблемы и объяснено, как их можно смягчить, а также описаны результаты экспериментов по оценке стресса и повреждений, в частности от частичных разрядов (partial discharge, PD).

Полупроводниковые переключатели, использующие технологии полупроводников с широкой запрещенной зоной, и даже МОП-транзисторы и некоторые IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor — биполярный транзистор с изолированным затвором, является комбинированным прибором из биполярного и полевого транзисторов) способны к чрезвычайно быстрому переключению. Оно, как известно, уменьшает рассеивание мощности во время начальной фазы переключения, а кроме того, позволяет работать на более высоких частотах при высокой эффективности. Как бонус мы имеем более высокую плотность мощности, меньшие по номиналам и физическим размерам пассивные компоненты и в итоге более низкую себестоимость конечного решения.

Но у этой медали есть и обратная сторона — увеличения уровня генерируемых электромагнитных помех (ЭМП) и, как следствие, проблемы с электромагнитной совместимостью (ЭМС) и стрессовая нагрузка на систему изоляции драйвера затвора из-за высоких значений  $dV/dt$  и  $di/dt$ . На рис. 1 показана типичная схема управления затвором для IGBT, подающая для его включения положительное напряжение между 5–20 В, а также 0 В для его выключения. В общем, эта схема также отлично работает для кремниевых МОП- и широкозонных транзисторов, выполненных по технологии карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN), поскольку во всех случаях транзистор гарантированно отключается при наличии на затворе 0 В (как минимум ниже установленного порогового напряжения для каждого транзистора, которое приводится в спецификации).

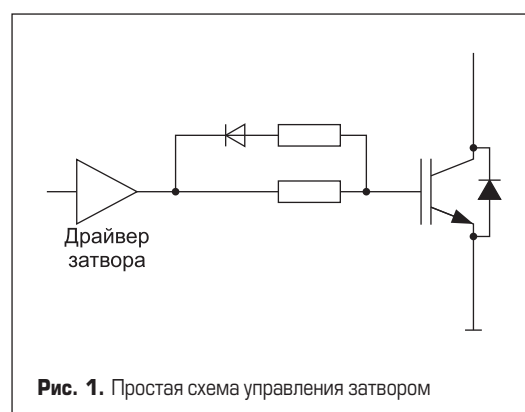


Рис. 1. Простая схема управления затвором

Однако проблемы возникают, когда устройство переключается быстро, поскольку здесь в игру вступают паразитные емкостные и индуктивные элементы, как это показано на рис. 2.

Итак, если мы возьмем, например, значения  $di/dt$  для тока сток-исток 10 А/нс, что вполне возможно с современными устройствами на основе нитрида галлия, а индуктивность в цепи истока 15 нГ и будем помнить, что на ней индуцирует ЭДС самоиндукции, равная  $V = -L(di/dt)$ , то из-за паразитной индуктивности получим скачок напряжения, равный 150 В. При выключении напряжение подтягивает исток транзистора относительно драйвера затвора в отрицательную область, а при включении — в положительную, то есть снова появляется противоположное напряжению драйвера. Следствием этого может быть потеря эффективности (в данном контексте — КПД) и даже повреждение из-за ложного включения, приводящее к возникновению сквозного тока в плече мостовой или полумостовой схемы.

На первый взгляд взятые в качестве иллюстрации проблемы 15 нГн могут показаться большим значением, но эта индуктивность представляет собой эквивалент дорожки печатной платы длиной около 25 мм. Даже переходное отверстие печатной платы имеет собственную индуктивность около 1,2 нГн, что создает напряжение переходного процесса, равное 12 В. На практике при таких высоких уровнях  $di/dt$  целесообразно только корпусирование чипов с подключениями драйвера затвора транзистора по схеме Кельвина (четырёхпроводная схема, при которой силовые цепи отделены от цепей управления, для этого в корпусе транзистора предусматривается отдельный вывод от его истока) по отношению к истоку. Также в случае, когда избежать некоторой индуктивности по тем или иным причинам нельзя, для гарантированного выключения транзистора помогает использование управления затвором драйвера с отрицательным напряжением.

В реальных схемах, таких как двухтактные или полные мостовые схемы в инверторах или

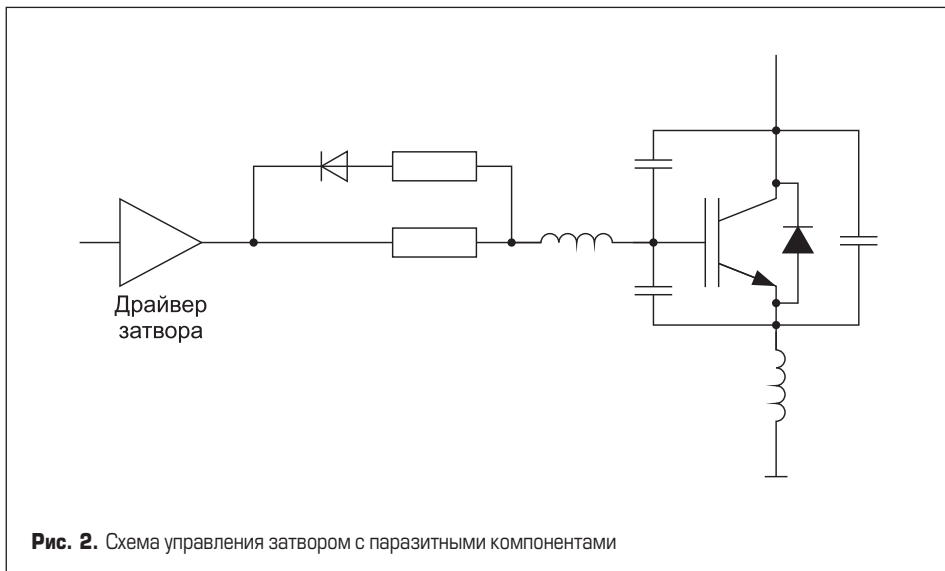


Рис. 2. Схема управления затвором с паразитными компонентами

в управлении двигателями, два транзистора низкой стороны часто имеют общую цепь возврата для тока в цепи истока и затвора, как это показано на рис. 3.

Однако именно здесь и кроется камень преткновения. Проблема заключается в том, что теперь соединения по схеме Кельвина становятся невозможны. Это связано с тем, что у нас имеется два драйвера, и каждый со своим возвратным током. Два заземления драйвера и два подключения эмиттера (истока) теперь должны соединиться вместе, и если эта точка, обозначенной как силовая «земля» 1 рядом с левым ключом, то правый ключ будет «видеть» большую индуктивность в цепи подключения истока, чем левый, приводя к асимметричному переключению. Такое переключение является потенциально опасным с точки зрения электромагнитного излучения и возможного повреждения транзистора из-за генерирования высокого напряжения переходного процесса вследствие большей индуктивности. Для симметрии точка, обозначенная как силовая «земля» 2, является единственным приемлемым вариантом. Но это плохой компромисс, поскольку теперь в контуре управления затво-

ром оба драйвера в цепи истока имеют одинаковую, но все равно большую индуктивность соединения. Особенно негативно это сказывается в системах большой мощности, где транзисторы просто физически могут не находиться достаточно близко друг к другу.

Решение состоит в том, чтобы обеспечить изолированные сигналы управления и источники питания для двух драйверов затвора, как показано на рис. 4<sup>1</sup>. Теперь сигналы драйвера и источники питания могут беспрепятственно подключаться непосредственно к соответствующим эмиттерам (истокам) своего транзистора, исключая большинство внешних индуктивностей из контуров драйверов.

### Проблемы переключения верхнего плеча

Схема, приведенная на рис. 4, решает проблему, вызывающую изменение напряжения затвора под влиянием паразитной индуктивности в цепи эмиттера (истока). Обычно она

<sup>1</sup>Эта проблема не нова и всегда представляла интерес для разработчиков, поэтому ей всегда уделялось должное внимание, в том числе и издательством данного журнала, например в материале [6], который поможет читателям в понимании настоящей статьи.

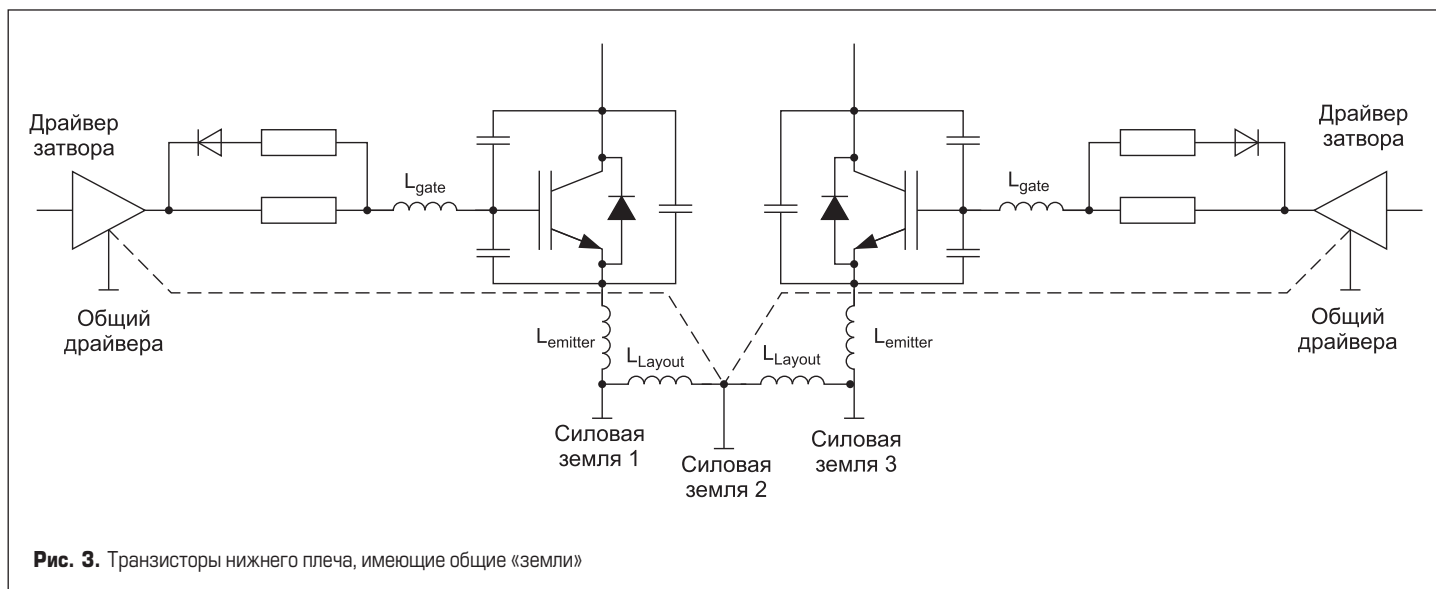


Рис. 3. Транзисторы нижнего плеча, имеющие общие «земли»

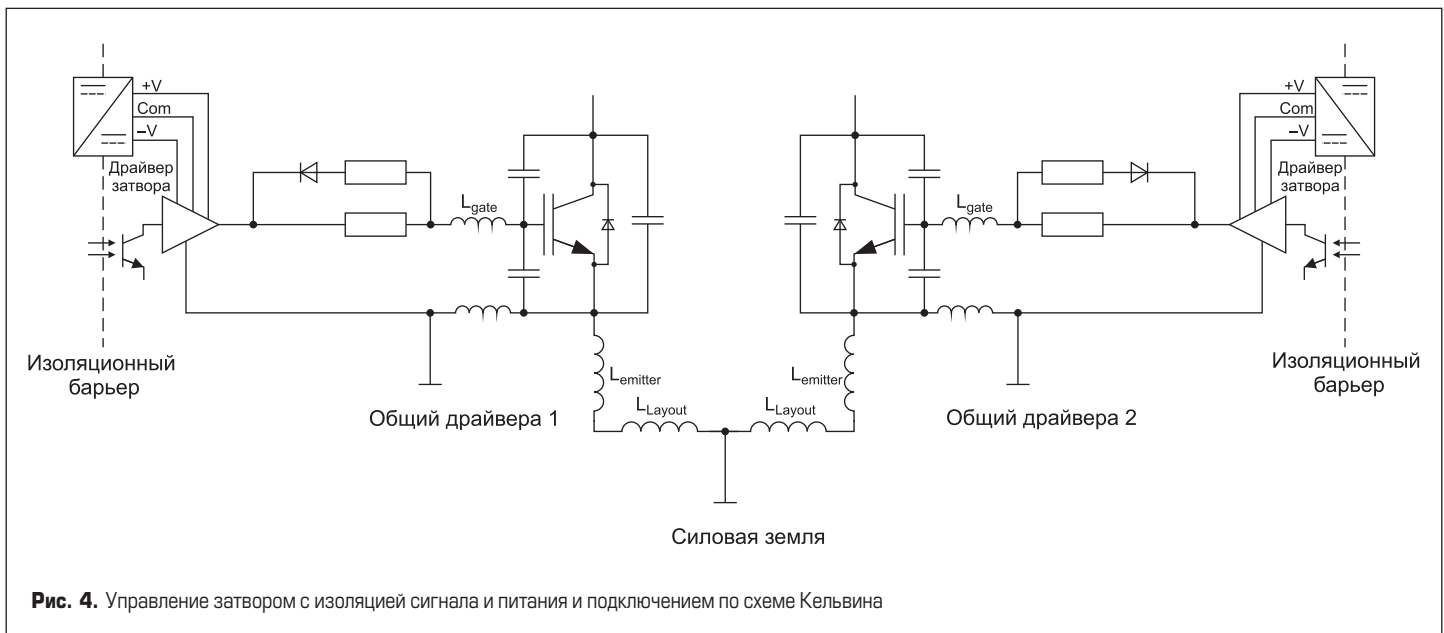


Рис. 4. Управление затвором с изоляцией сигнала и питания и подключением по схеме Кельвина

также используется и для двух верхних ключей в полном H-мосте, где две цепи возврата тока драйвера затвора фактически являются узлами противофазной коммутации и поэтому, опять-таки, должны быть изолированы друг от друга.

Однако на верхнем плече моста возникает коммутируемое напряжение высокого уровня, а оно, естественно, будет присутствовать и проявляться на компонентах изоляции драйвера затвора, что может вызвать соответствующие проблемы. Высокие значения  $dV/dt$  — вот причина появления таких проблем, которая приводит к току смещения, обусловленному быстрыми видами поляризации в изоляционном диэлектрике и протекающему через емкость изоляционного барьера в соответствии с зависимостью  $I = C(dv/dt)$ , причем этот ток находится на уровне ампер. При предельных скоростях 100 В/нс барьерная емкость всего в 10 пФ будет пропускать через себя 1 А тока, который станет циркулировать через первичную цепь драйвера затвора с потенциально возможным нарушением его функционирования.

В цепи затвора компоненты изоляции сигнала управления обычно представляют собой оптопары или трансформаторы, причем иногда сознательно используется и конденсаторная связь. Рабочие характеристики микросхем изолированного драйвера затвора определяются ключевыми параметрами, показанными в таблице 1. Главный из них — их устойчивость к воздействию синфазных помех (Common Mode Transient Immunity, CMTI) между входом и выходом. Это наиболее подходящий параметр для нашей схемы при высоком значении  $dV/dt$ . Однако это значение получено путем лабораторных измерений и, скорее всего, с единичными импульсами. Кроме того, как правило, в спецификации ничего не сказано о долговременной надежности изоляционного барьера при постоянном высоком напряжении с одновременным высоким значением  $dV/dt$ .

Помимо уже упомянутого выше параметра CMTI, конечно, не менее важны и другие параметры —  $V_{IORM}$ ,  $V_{IOWM}$ ,  $V_{IOTM}$ ,  $V_{PR}$ , но они не имеют прямого отношения к нашей коммутационной схеме. Кроме того, не забывайте,

что они определены стандартными тестами, в которых часто используется напряжение переменного тока частотой 50/60 Гц, напряжение постоянного тока или пиковое значение напряжения. Трансформаторы драйверов с разделным управлением затворами имеют аналогичные ограничения по техническим характеристикам в своих спецификациях. Но это, как правило, тоже простые испытания при повышенном напряжении (в англ. терминологии Hi-pot — «испытание высоким напряжением»), рассчитанные на воздействие длительностью 1 с или 1 мин, обычно также на некотором уровне напряжения постоянного тока или переменного тока с частотой 50/60 Гц. Редко можно найти оценку надежности при высоком, коммутируемом напряжении в зависимости от частоты, приложенном к изоляции обмотки трансформатора, или хотя бы значение CMTI.

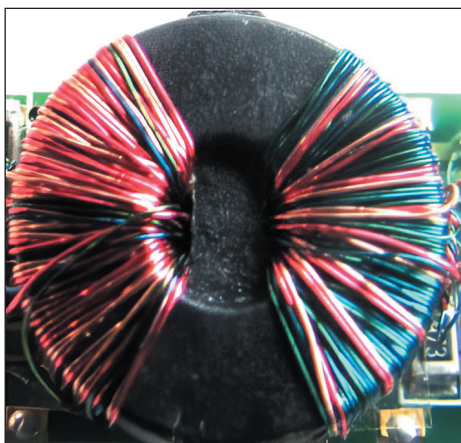
Что касается непосредственно изоляции, то для импульсных трансформаторов обеспечение высокого уровня изоляции варьируется в зависимости от области применения. Это может быть эмалированная проволока, способная выдержать одиночное испытание повышенным напряжением, но она с почти всегда гарантированными точечными, пусть и микроскопическими, отверстиями в эмалевом или лаковом покрытии априори не является надежной.

Органы сертификации, зорко следящие за безопасностью электрооборудования, безусловно, не допускают использования такого решения в качестве защитного барьера при любом напряжении. Однако специальный провод с улучшенной, например тройной, изоляцией может получить одобрение сертификационной организации. Но тут возникает другая проблема: этот провод является довольно-таки толстым и его использование приводит к относительно высокой емкости связи между обмотками трансформатора и, как следствие (о чем мы уже говорили выше), к высокому току смещения. Данный провод также показал низкие характеристики

Таблица 1. Основные (ключевые) параметры изолированных драйверов затвора

Аббревиатура (сокращенное обозначение)	Расшифровка (определение согласно стандартам*)	Типовое значение
DTI	Distance through Isolation — толщина изоляции (физическая).	Иногда не превышает 10 мкм
Cr	Creeperage distance — длина пути тока утечки или путь утечки (кратчайшее расстояние по поверхности изоляционного материала между двумя токопроводящими частями).	Несколько мм
CI	Clearance — воздушный зазор (кратчайшее расстояние между двумя токопроводящими частями).	Несколько мм
$V_{IORM}$	Maximum working insulation Voltage — максимальное рабочее напряжение изоляции (максимальное среднеквадратическое или пиковое значение напряжения переменного или постоянного токов, которое может быть приложено к рассматриваемой части изоляции, когда оборудование работает при номинальном напряжении).	600-2500 В (пиковое)
$V_{PR}$	Production Test Voltage (1 Sec) — испытательное напряжение (1 с).	$V_{IORM} \times 1,875$
$V_{IOTM}$	Sinusoidal overvoltage for 60 seconds — синусоидальное испытательное повышенное напряжение (1 мин).	Несколько кВ
$V_{Surge}$	1.2µs/50 µs Surge Voltage — перенапряжение длительностью несколько миллисекунд или меньше, колебательное или не колебательное, обычно быстро затухающее. В данном случае испытательное напряжение на устойчивость к переходным процессам длительностью 1,2 мкс и периодом повторения 50 мкс.	Несколько кВ
CMTI	Common Mode Transient Immunity — устойчивость к воздействию (переходных) синфазных помех.	До 400 кВ/мкс

Примечание. \*Определения в круглых скобках даны согласно [5].



**Рис. 5.** Трансформатор драйвера затвора с физическим разделением между обмотками

производительности при коммутации высокого напряжения из-за накопления дефектов, вызванных частичным разрядом в слоях изоляции. Идеальная конструкция — та, в которой обмотки физически разделены гарантированным расстоянием по воздуху (воздушным зазором). Такое решение полностью удовлетворяет требованиям органов контроля безопасности и обеспечивает низкую емкость связи. Кроме того, что немаловажно, здесь не нужно отдавать все на откуп твердому изоляционному материалу, который может подвергаться деградации из-за негативного влияния частичного разряда (рис. 5).

Точно такие же соображения применимы и к трансформаторам в источниках питания изолированных драйверов затвора, характеристики которых в части СМТИ нередко опускаются, а устойчивость изоляции при воздействии высокого напряжения определяется другими способами.

### Влияние эффектов частичного разряда

Мы уже несколько раз упомянули частичный разряд — медленную деградацию твердого изоляционного материала, подверженного воздействию высокого напряжения<sup>2</sup>. Этот эффект вызван наличием неоднородностей, чаще микроскопических пустот, наполненных газом, присутствующих в изоляционном материале. Постепенное последовательное разрушение таких микропор в материале, если он органического типа, приводит к его карбонизации, производимой во время электрического разряда плазмой. Даже несмотря на то, что порождающий их заряд измеряется в пикокулонах, энергия разряда определяется пикоджоулями, и это может привести к карбонизации материала изоляционного барьера. В таком случае пустоты становятся постоянными

короткими замыканиями, уменьшая эффективную общую толщину изоляции, приводя к более высокой напряженности поля на оставшейся «целеей» изоляции и возможному ее полному отказу. Самое плохое последствие частичных разрядов в том, что такие дефекты сложно обнаруживаются при изготовлении и «срабатывают» уже через достаточно длительный промежуток времени на месте эксплуатации конечного оборудования, часто с катастрофическими последствиями для последнего. Возникновение частичного разряда начинается внезапно при некотором начальном напряжении  $V_{PD}$ . Частичный разряд происходит только при высоком приложенном напряжении с конкретными условиями возникновения и определенным коэффициентом экстинкции, эти условия совместно определяют размер пустот и давления газа или воздуха в пустотах и характеризуются кривой закона Пашена<sup>3</sup> [1]. При коммутуемом напряжении точка «срабатывания» частичного разряда зависит еще и от частоты переключения, а если говорить точнее — то от скорости нарастания напряжения.

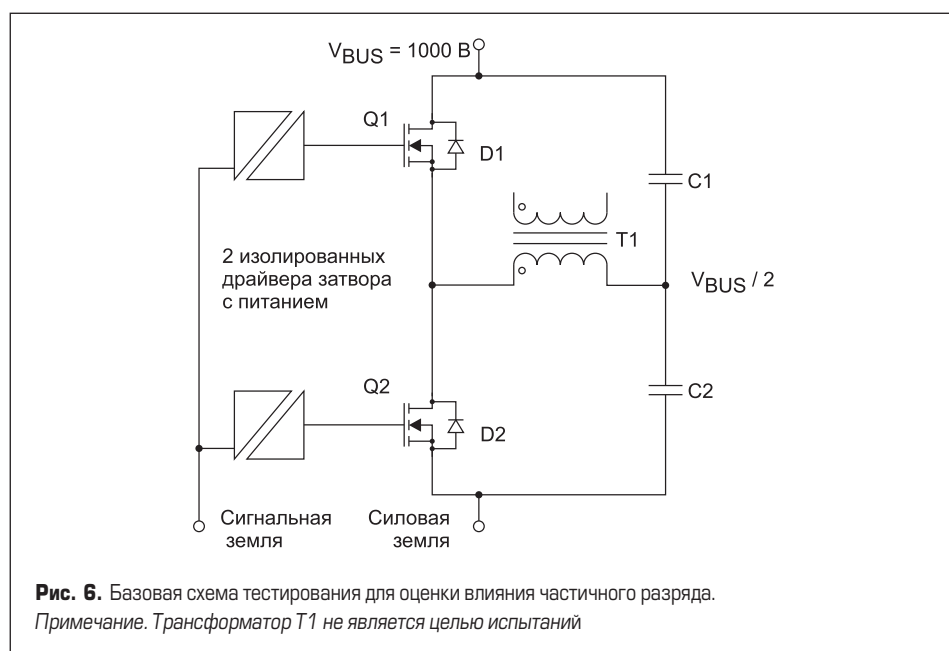
Даже напряжение пробоя твердых неорганических материалов не следует принимать за чистую монету. Например, стекло, считающееся отличным изолятором, имеет пробивное напряжение около 60 кВ/мм, но это при частоте 60 Гц. А вот на частоте 1 МГц данный показатель составляет менее одной десятой от этого значения и равен 5 кВ/мм. Поскольку толщина изоляции интересующих нас микросхем драйверов затвора не превышает 10 мкм, здесь необходимо тщательно рассмотреть возможные негативные эффекты частичного разряда, особенно на высоких частотах коммутации.

Таким образом, в качестве итога отметим, что ключевыми параметрами при оценке долговременной надежности изоляции драйверов затвора являются уровень скорости нарастания напряжения переключения  $dV/dt$  и частота. Также не забываем и о том, что при выборе рабочего напряжения изоляции

драйвера должны быть оценены и добавлены к напряжениям системных шин переходные процессы напряжения в виде выбросов и резонансов, связанных с паразитными емкостями и индуктивностями. Причем это касается не только транзисторов ключей, а рассматривается в варианте их конструктивного включения со всеми линиями связи.

### Результаты НИОКР по оценке долговременной надежности изоляции

Известный производитель блоков питания для драйверов затвора компания RECOM [2, 4] признала потенциальные проблемы с трансформаторами в изолированных DC/DC-преобразователях, которые подвержены воздействию высоких коммутуемых синфазных напряжений. В связи с чем она провела соответствующие данной проблеме исследования. Они были выполнены совместно с экспертом по изоляционным материалам приват-доцентом, инженером и доктором технических наук Кристофом Шумерером (Christof Sumereder) из Технического университета Граца (Technische Universität Graz) и Fachhochschule Joanneum — второго по величине университета прикладных наук в Австрии. Эта НИОКР носила условное наименование BIER — Barrier Insulation Evaluation and Research «Оценка и исследование барьерной изоляции» и состояла из оценки специально сконструированных 30 мощных полумостовых каскадов с изолированным переключением на высокой и низкой стороне (верхнее и нижнее плечо полумоста). Использованная топология схемы приведена на рис. 6. Для оценки поведения изоляции были построены и использованы три различные конфигурации подключения драйверов, как указано в таблице 2. При этом устройства подвергались испытания при температуре окружающей среды +70 °С при рабочей частоте переключения 50 кГц и граничной скорости нарастания напряжения, равной 65 кВ/мкс в течение 1464 ч с воздействием на изоляци-



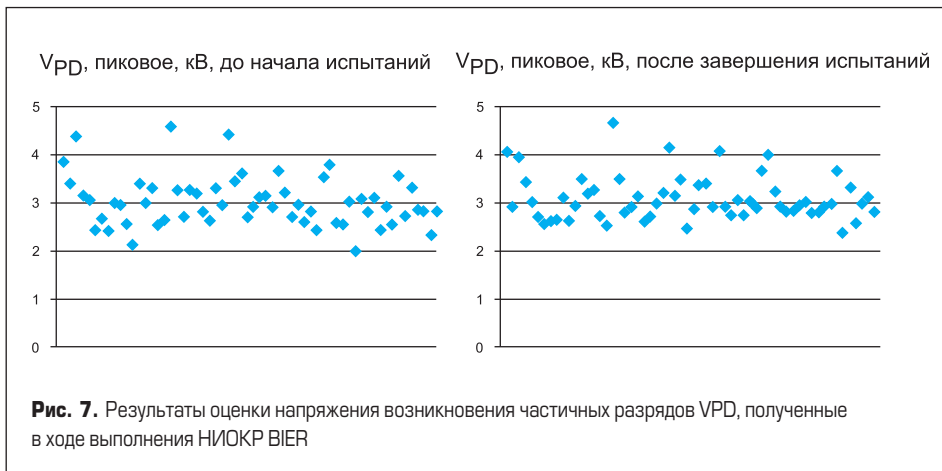
**Рис. 6.** Базовая схема тестирования для оценки влияния частичного разряда.  
Примечание. Трансформатор T1 не является целью испытаний

<sup>2</sup> Частичные разряды — электрические разряды, которые происходят в изоляции электрооборудования, обычно возникающие в электрических системах, работающих при напряжении от 3000 В и выше. Согласно международному стандарту IEC 60270 и ГОСТ 20074-83, частичным разрядом называется локальный электрический разряд, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе.  
<sup>3</sup> Уравнение на основании закона Пашена описывает зависимость напряжения пробоя от произведения давления газа и расстояния между электродами, выведено немецким физиком Фридрихом Пашеном в 1889 году.



**Таблица 2.** Тестовые конфигурации, использованные в рамках НИОКР BIER

Конфигурация	Точка подключение сигнальной «земли»	Напряжение на изоляции драйвера нижнего плеча, В	Напряжение на изоляции драйвера верхнего плеча, В
Конфигурация № 1	Силовая «земля»	0	0–1000
Конфигурация № 2	$V_{BUS}/2$ (500 В)	$\pm 500$	$\pm 500$
Конфигурация № 3	$V_{BUS}$ (1000 В)	1000	0...–1000



ционный барьер на высокой стороне остается подверженным влиянию высокого уровня синфазного напряжения, а его негативное действие усугубляется при наличии высокой рабочей частоты преобразования при преобразовании энергии и высоких граничных скоростях по скорости нарастания при включении. Практические испытания на предмет оценки негативного действия частичного разряда показали, что использованные компанией RECOM изолирующие компоненты в источниках постоянного тока драйвера затвора могут иметь и обеспечить достаточно хорошую долговременную надежность.

Для упрощения разработки полумостовых и мостовых силовых каскадов компания RECOM предлагает своим клиентам линейки DC/DC-преобразователей с выходными напряжениями и номинальными характеристиками изоляции, подходящими для драйверов затворов с высокой стороны — как для традиционных IGBT, так и для транзисторов, выполненных на базе карбида кремния и нитрида галлия.

онный барьер напряжения шины постоянного тока 1000 В. Поскольку традиционные акустические тесты для испытаний устойчивости изоляционного барьера к частичным разрядам применительно к изолированным DC/DC-преобразователям априори невозможны, то для такого тестирования имеется соответствующее специализированное испытательное оборудование, способное регистрировать небольшие импульсы тока, возникающие вследствие разряда пикокулонных зарядов.

Измерения частичного разряда проводились до и после испытаний. Они показывают, что в используемых конфигурациях не было обнаружено какого-либо значительного ухудшения характеристик изоляции (рис. 7). Начальное напряжение частичного разряда

оставалось более чем в два раза выше приложенного пикового напряжения переключения, что указывает на хороший технологический запас и с высокой долей вероятности гарантирует надежную долговременную работу изолированных DC/DC-преобразователей компании RECOM. Полный отчет по НИОКР BIER доступен на сайте компании [3].

**Заключение**

Изоляция управляющих сигналов драйвера затвора и питания в двухтактных и мостовых схемах решает проблему воздействия напряжения переходных процессов на цепи затвора как по низкой, так и по высокой стороне (нижнему и верхнему плечу). Однако изоля-

**Литература**

1. [www.en.wikipedia.org/wiki/Paschen%27s\\_law](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Paschen%27s_law)
2. [www.recom-power.com](http://www.recom-power.com)
3. [www.recom-power.com/emea/downloads/reports/report-gate-drive-converter-under-dvdt-stress.html](http://www.recom-power.com/emea/downloads/reports/report-gate-drive-converter-under-dvdt-stress.html)
4. [www.recom-power.com/de/index.html?0](http://www.recom-power.com/de/index.html?0)
5. ГОСТ IEC 60730-1-2011 «Автоматические электрические управляющие устройства бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Общие требования».
6. Ли П., перевод: Рентюк В. Результаты тестирования изоляции DC/DC-преобразователей питания драйверов затвора на ее устойчивость к частичным разрядам // Компоненты и технологии. 2016. № 8.