

# Первое универсальное интегрированное решение

## для различных приводов электродвигателей

**Компании Infineon Technologies и TDK объединили свои усилия для разработки универсального интегрированного решения для инверторов, которые могут быть с успехом использованы в силовых агрегатах электромобилей и найти применение в широком спектре промышленных приложений. Предложенная конструкция позволяет разработчикам быстро и легко проверять и реализовывать концепции самых различных приводов электродвигателей.**

**Анатолий Савельев**

anatoly.saveliev@eu.tdk.com

**Олег Гнеушев**

oleg.gneushev@eu.tdk.com

В большинстве электрических приводов для промышленного применения обычно используются асинхронные двигатели, а в автомобильных — синхронные двигатели с постоянными магнитами. Во всех случаях производители, в соответствии с рекомендациями IEC 60034-18-41, ограничивают управление этими двигателями по максимально допустимой скорости нарастания напряжения  $dv/dt$  на клеммах инвертора значением порядка 5 кВ/мкс<sup>1</sup>. Это связано с ограниченной диэлектрической изоляцией прочностью обмоток по пробивному напряжению. Кроме того, когда электродвигатели приводятся в действие инвертором, возникают большие токи утечки на землю, которые вызваны паразитной емкостью в обмотках в сочетании с  $dv/dt$  инвертора. Эти токи могут привести к искрению в подшипниках, вызвать их поверхностную эрозию и, следовательно, существенно ограничить их срок службы.

Для достижения высокой энергетической эффективности (КПД) силовые полупроводниковые приборы инверторов (как правило, это IGBT-модули) работают на частотах переключения в диапазоне 4–15 кГц. Из-за ограничения скорости нарастания и значения непосредственно самой рабочей частоты коммутации<sup>2</sup> это приводит к гармоникам с высокой амплитудой, лежащим в частотном диапазоне около 1 МГц. Таким образом, в частности в автомобильных приложениях, силовой привод вызывает значительные помехи в диапазоне вещания на средних волнах в диапазоне частот 526,5–1606,5 кГц (иногда по типу модуляции называемом АМ-диапазоном). Это делает невозможным прослушивание в автомобиле радиостанций, работающих на средних волнах.

### Основные преимущества новой конструкции

Чтобы создать инвертор, который мог бы работать на двигатель с выполнением требований по электромагнитной совместимости, компании Infineon и TDK переработали основные компоненты системы, а также улучшили существующий модуль HybridPACK1, в результате чего добились их четкого согласования друг с другом.

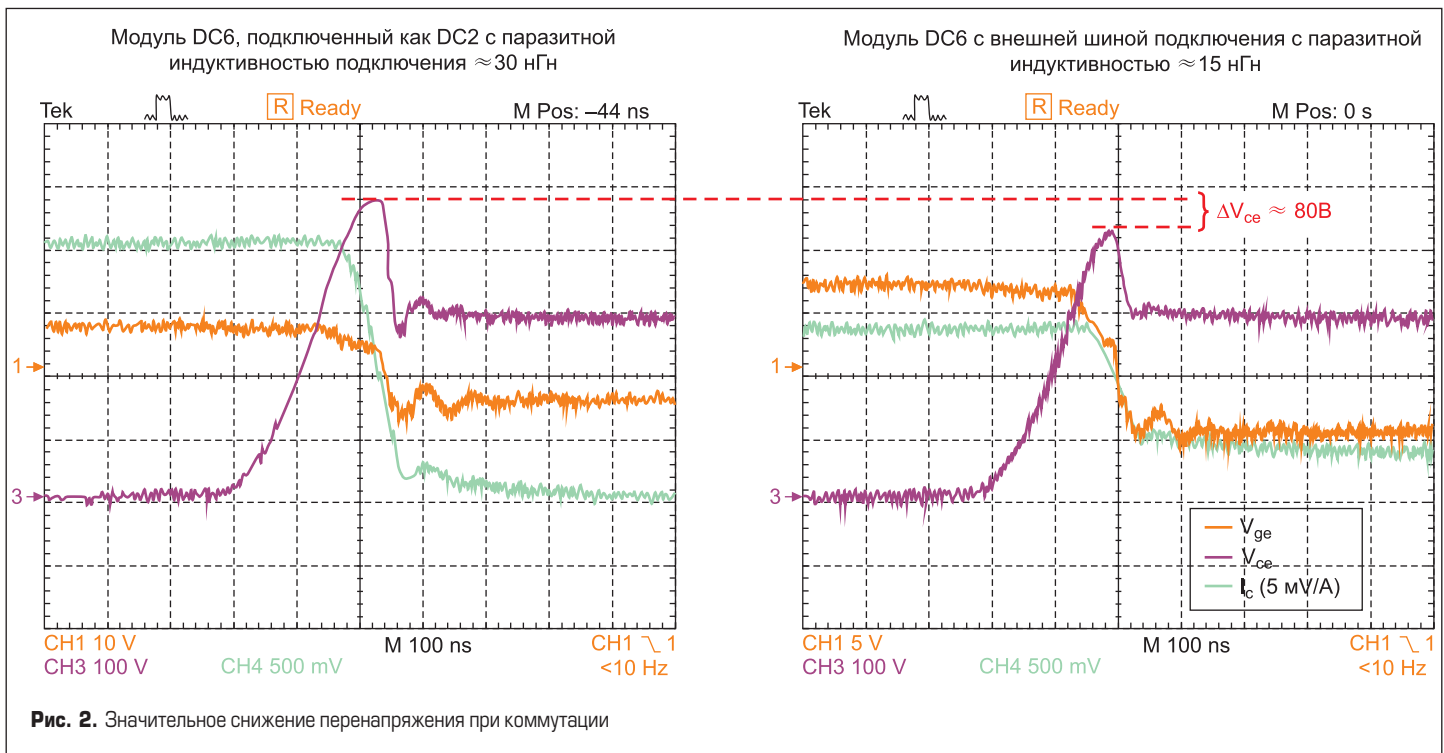
#### Низкая паразитная индуктивность

Помимо использования последнего поколения чипов IGBT3 с диэлектрической прочностью изоляции в 705 В, новое решение имеет шесть терминалов для подключения шины постоянного тока



**Рис. 1.** IGBT-модуль HybridPACK1-DC6 рассчитан на напряжение 705 В и номинальный ток 400 А. Благодаря шести клеммам шины постоянного тока эта конструкция имеет очень низкую паразитную индуктивность

<sup>1</sup> В РФ действует аналогичный стандарт ГОСТ IEC/TS 60034-18-41-2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 18-41», определяющий время нарастания импульса на выходе инвертора в пределах 0,05–2,0 мкс. — Прим. перев.  
<sup>2</sup> ГОСТ IEC/TS 60034-18-41-2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 18-41. Квалификационные и типовые испытания для систем электроизоляции типа I, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения» регламентирует частоту коммутации пределами 0,1–20 кГц. — Прим. перев.



на модуле HybridPACK вместо двух терминалов, имевшихся в предыдущем варианте (рис. 1). В сочетании с модифицированным DC-link конденсатором EPCOS это позволило на шине постоянного тока уменьшить почти вдвое эквивалентную последовательную индуктивность ESL (Equivalent Series Inductance) — от типичной в 30 до 15 нГн. Такое уменьшение паразитной индуктивности соответственно снижает перенапряжения, возникающие при выключении силовых ключей, выполненных на IGBT, рассчитанных на номинальный ток 400 А, в диапазоне рабочих напряжений 500–420 В (рис. 2).

Вместе с терминалами для подключения на DC-link конденсатора оставшиеся для подключения четыре дополнительных клеммы шины постоянного тока увеличивают возможности модуля HybridPACK в части рабочих токов. Таким образом, новое конструктивное решение модуля HybridPACK1-DC6 может использоваться для более эффективных перспективных IGBT-технологий с более высокими возможностями в части рабочей нагрузки. Силовые возможности существующих приложений, основанных на текущей версии модуля HybridPACK1 с двумя терминалами для шины постоянного тока,

могут быть легко увеличены с помощью нового модуля HybridPACK1-DC6. Это связано с тем, что новый модуль имеет почти те же размеры, что и предшественник, и, тем самым, обеспечивает хорошую масштабируемость для различных xEV-приложений (электромобили и гибриды).

Модуль HybridPACK1 с двумя терминалами постоянного тока имеет очень компактную конструкцию благодаря встроенной шине. По соображениям совместимости эта функция была сохранена и в новом конструктивном решении модуля HybridPACK1-DC6. Внешняя шина к DC-link конденсатору EPCOS шины постоянного тока позволяет лучше распределять ток питания, обеспечивая тем самым и более эффективное использование непосредственно самого модуля. На рис. 2 (справа) показана форма тока через внутреннюю сборную шину при номинальном токе 400 А. Он представляет собой симметричное распределение тока между шиной DC-link конденсатора EPCOS и током модуля.

**Предотвращение генерации помех на шине постоянного тока**

Еще одной новой разработкой в этом направлении является DC-link конденсатор

EPCOS B25655P4607J. Его клеммы спроектированы так, чтобы точно соответствовать клеммам шины звена постоянного тока IGBT-модуля. Это дальнейший шаг в развитии существующих DC-link конденсаторов EPCOS, которые были разработаны для серии модулей Infineon HybridPACK. Новый конденсатор имеет емкость 600 мкФ и доступен с номинальным напряжением 450 В постоянного тока. Его габариты всего 140×72×50 мм. В основе этой компактной конструкции лежит технология PCC (Power Capacitor Chip), в которой для достижения коэффициента заполнения объема, равного единице относительно корпуса конденсатора, используется специальная стэковая намотка. Существует также вариант с плоской конструкцией, имеющий емкость 470 мкФ (B25655P4477J), который является наиболее экономичным типом DC-link конденсатора (рис. 3). Оба типа конденсаторов доступны с прямым подключением к фильтру подавления электромагнитных помех или для использования без него.

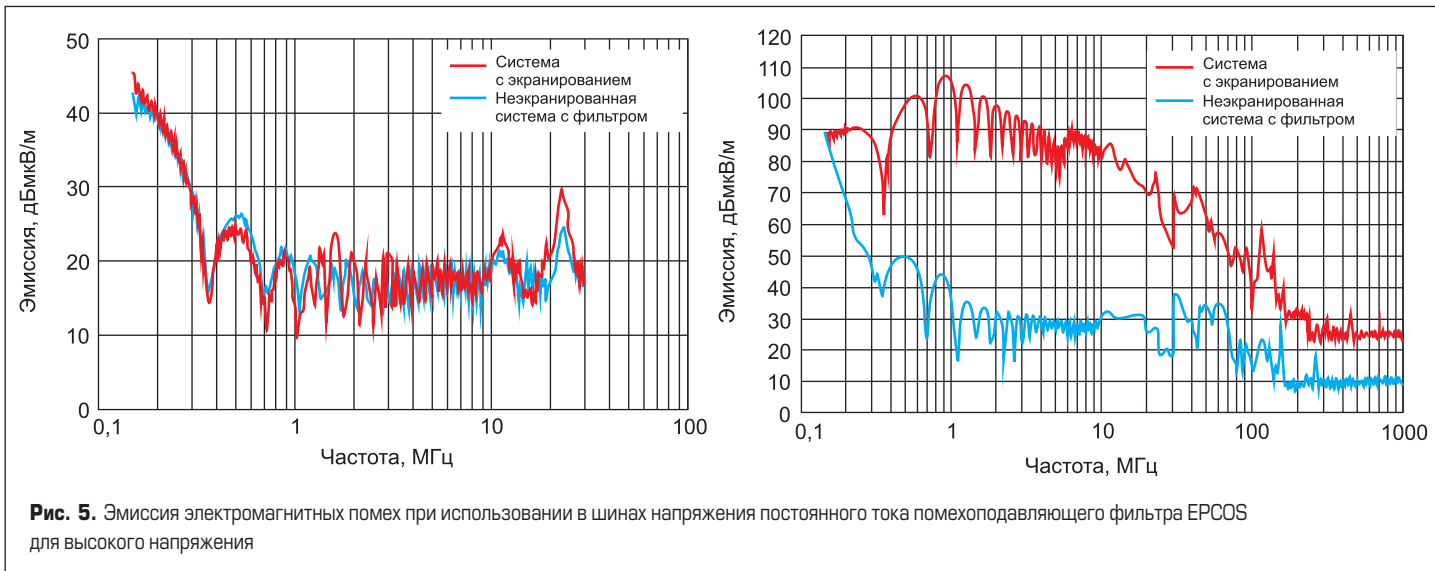
**Высокие характеристики по ЭМС без использования экранированного кабеля**

С учетом требований к электроприводам для транспортных средств, компания TDK также разработала серию специальных, адаптированных для данной области применения двухпроводных высоковольтных фильтров шины постоянного тока — EPCOS DC HV EMC filter. Их использование обеспечивает выполнение всех требований в части электромагнитной совместимости (ЭМС) в соответствии с требованиями UN ECE<sup>3</sup> (Regulation No. 10, Rev. 55).

Серия высоковольтных DC-фильтров EPCOS P100316\* (рис. 4) рассчитана на мак-



<sup>3</sup> В РФ следует использовать ГОСТ Р 51524-2012 «Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью. Часть 3. Требования ЭМС и специальные методы испытаний». — Прим. перев.



**Рис. 5.** Эмиссия электромагнитных помех при использовании в шинах напряжения постоянного тока помехоподавляющего фильтра EPCOS для высокого напряжения

симальное рабочее напряжение 600 В постоянного тока и, таким образом, соответствует типовым напряжениям, которые обеспечиваются от высоковольтных батарей транспортных средств. Фильтры рассчитаны на рабочие токи 150 или 350 А. Это означает, что они могут использоваться даже в системах привода с мощностью до 100 кВт. Сопротивление по постоянному току для всех типов фильтров составляет всего 0,05 мОм, что означает, что оно не вносит значительные потери даже в случае прохождения через такой фильтр предельных рабочих токов. Терминалы для подключения версии P001 сформированы таким образом, что они могут быть подключены непосредственно к DC-link конденсатору EPCOS. Помимо компактной конструкции, они также обладают такими электрическими преимуществами, как низкая паразитная индуктивность и малое контактное сопротивление.

Эффективность данных фильтров настолько велика, что при их использовании более не возникает необходимости в при-

менении для организации связи между батареями и инвертором экранированных кабелей (рис. 5). Это не только дает неоспоримые преимущества с точки зрения стоимости и веса, но также обеспечивает большую долговременную стабильность подключения, поскольку здесь можно обойтись без дорогого и уязвимого экранированного соединения.

Несмотря на использование неэкранированного кабеля в цепях постоянного тока, применение фильтра EPCOS для высокого напряжения снижает уровень кондуктивных (т. е. наводимых по цепям питания) помех до 70 дБ, что эквивалентно коэффициенту их ослабления в 3000 раз. И это не единственное преимущество: новые фильтры также снижают количество мер, которые ранее необходимо было предпринимать в отношении отдельных компонентов системы для решения вопросов электромагнитной совместимости.

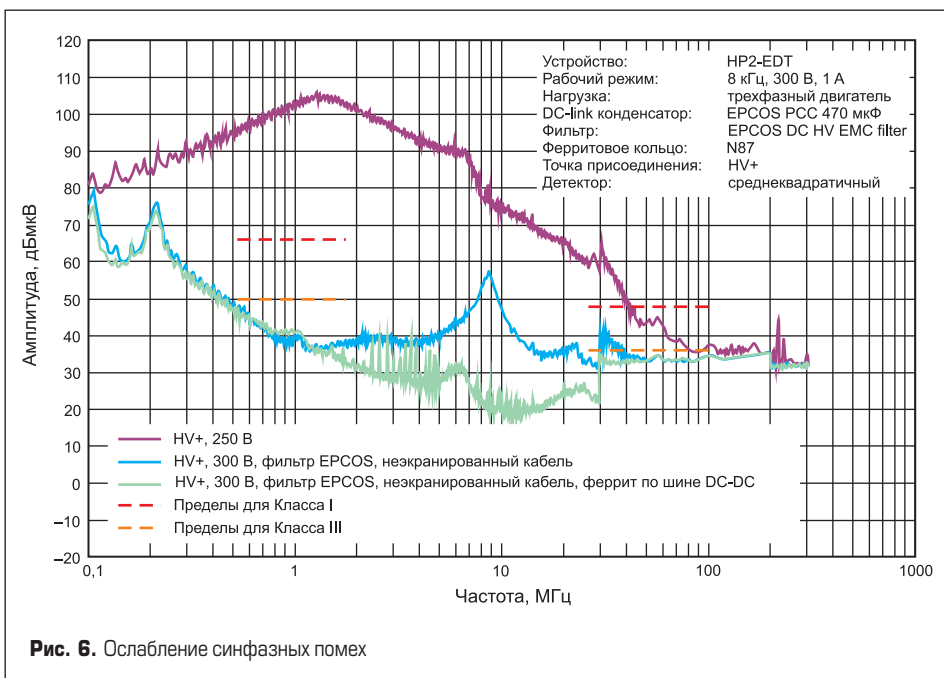
Помимо превосходных электрических характеристик, рассматриваемые фильтры также

впечатляют своим малым весом и компактными размерами, то есть именно теми техническими параметрами, которые необходимы для их использования в транспортных средствах. В зависимости от конкретного типа фильтра, размеры, как правило, находятся в диапазоне между 186×65×65 и 121×52×52 мм. Помимо версий с обычным решением в части подавления синфазных помех, имеются также типы фильтров с особенно высоким подавлением в длинноволновом спектре радиоволн, а именно — в диапазоне частот 150 и 300 кГц.

**Ферритовые сердечники EPCOS**

Если на выходе инвертора имеются импульсы с высокой крутизной фронтов, они, как известно, вызывают всплески напряжения, которые могут быть дополнительно усилены паразитными индуктивностями кабелей подключения двигателя и резонансными явлениями. При неблагоприятном раскладе такие выбросы напряжения могут привести к образованию электрической дуги, способной разрушить изоляцию обмоток двигателя. В то же время высокая частота переключения инвертора при наличии паразитной емкостной связи между обмотками двигателя и его корпуса (потенциала земли) вызывает рост токов утечки, которые могут протекать через подшипник двигателя и, следовательно, вызывать искрообразование. Это приводит не только к ускоренному изнашиванию самого подшипника, но и к генерации и излучению радиопомех.

Одним из средств устранения описанных выше негативных явлений является применение ферритовых колец, которые надеваются непосредственно на кабели двигателя в точке их подключения непосредственно на выходе инвертора. Благодаря более интенсивному снижению скорости нарастания импульса напряжения  $dv/dt$ , это решение также может значительно уменьшить помехи синфазного режима и снизить ток утечки до не критического уровня, что гарантирует соблюдение существующих ограничений по уровню электромагнитных помех до уровня Классов I–III



**Рис. 6.** Ослабление синфазных помех

(рис. 6). Для этой цели компания TDK предлагает широкий спектр кольцевых сердечников серии B64290L\*. Они доступны с различными типоразмерами и изготовлены из ферритовых материалов, оптимизированных для определенных частотных диапазонов и рабочих температур, и могут быть использованы в любой системе привода. Здесь следует обратить внимание на такие ферритовые материалы, как T65, N30, N87, которые также используются и для помехоподавляющих дросселей EPCOS и прошли проверку временем.

### Новая плата драйвера от Infineon

Кроме того, компания Infineon разработала еще и новую плату драйвера для модуля HybridPACK1 DC6, которая основана на проверенной и хорошо себя зарекомендовавшей серии драйверов Infineon 1ED020I12FA2. Плата

**Таблица.** Перечень элементов для инвертора

Наименование	Тип/характеристика	Код для заказа	Изготовитель
IGBT-модуль HybridPACK1-DC6	705 В/400 А	FS400R07A3E3	Infineon
Драйвер затвора		1ED020I12FA2	Infineon
DC-link конденсатор	470 мкФ/450 В или 380 мкФ/450 В	B25655P4477J B25655P4387J	EPCOS
ЭМП-фильтр	600 В/150 А	P100316-P001	EPCOS
Ферритовые сердечники	Кольцевые	Серия B64290*	EPCOS
Индуктивности	Синфазный дроссель 0,7 мГн/4 А	B82721A2402N020	EPCOS
Трансформатор драйвера затвора		B78307A2276A003	EPCOS
Конденсаторы	Несколько керамических многослойных конденсаторов (MLCC)		TDK

обеспечивает эффективную работу, полное выполнение требований по ЭМС и позволяет легко реализовать преимущества рассмотренной в настоящей статье улучшенной конфигурации модуля. Результатом является первый комплексный выходной силовой каскад, состоящий из IGBT-модуля, DC-link конденсатора

шины постоянного тока, фильтра подавления ЭМП и драйвера затвора IGBT, плюс все рассмотренные ранее дополнительные элементы, необходимые для выполнения жестких требований по обеспечению электромагнитной совместимости. Перечень элементов такого инвертора приведен в таблице.