

Решения устойчивого к переходным процессам первичного DC/DC-преобразователя системы питания автомобильной электроники

Учитывая постоянно растущий в автомобилях последнего поколения объем применения самого разнообразного электронного оборудования, возрастает и потребность во все более эффективном и надежном преобразовании мощности от аккумуляторной шины автомобиля. Однако шине постоянного тока от 12 В аккумуляторной батареи свойственны связанные с особенностями функционирования транспортных средств самые разнообразные переходные процессы. Статья представляет читателям и специалистам в области проектирования систем питания автомобильной электроники решение в виде уникальной архитектуры питания. Оно специально предназначено для питания оборудования автомобиля, которое не имеет прямого подключения к его основной шине постоянного тока. Кроме того, в статье описываются типы переходных процессов, возникающих на шинах постоянного тока аккумуляторных батарей автомобилей, причины возникновения этих переходных процессов, а также регламентирующие их стандарты и технические требования, определяющие условия испытаний на устойчивость к воздействию этих переходных процессов.

**Виджай Чоудхари
(Vijay Choudhary)**

**Перевод:
Владимир Рентюк**

Чтобы обеспечить устойчивость к переходным процессам и свести к минимуму прерывание питания нагрузки, используются различные архитектуры питания, которые имеют и схемы преобразования энергии, и элементы защиты. В таких архитектурах сочетаются преимущества и неизбежные компромиссы, связанные с реализацией повышающе-понижающих и повышающих DC/DC-преобразователей, а также преобразователей для предварительного повышения напряжения. Эти преобразователи должны обеспечить бесперебойную работу электронного оборудования в условиях холодного запуска двигателя (то есть проворачивание коленчатого вала непрогретого двигателя, cold-crank или cold-cranking) и сброса нагрузки (dump load). В статье будут представлены различные подходы к организации защиты от подачи напряжения обратной полярности, которые включают сравнение решения на базе использования «умных» диодов по отношению к альтернативным подходам. Предлагаемая информация может дать проектировщикам более глубокое понимание переходных процессов на шинах питания автомобилей и подходы к преодолению их негативного влияния при проектировании систем с использованием DC/DC-преобразователей.

Особенности переходных процессов на шинах напряжения постоянного тока в автомобилях

Переходные процессы на аккумуляторной шине постоянного тока в автомобильных системах обу-

словлены целым рядом факторов. Назначение первичных DC/DC-преобразователей заключается в изоляции чувствительных электрических и электронных нагрузок от широких вариаций основного питающего напряжения. Они предназначены для организации питания нагрузок от основной шины напряжения постоянного тока уже очищенным и кондиционным напряжением. Из-за большого количества типов транспортных средств и разнообразных условий эксплуатации проектировщику может оказаться весьма затруднительно предусмотреть все потенциально возможные переходные процессы, которые могут возникнуть на пути тока от батареи к электронному модулю. Это означает, что для определения требований к кондиционированию мощности необходимо использовать различные стандарты, устанавливающие требования по испытаниям на устойчивость автомобильного оборудования к возможным воздействиям.

Для решения этой проблемы многие производители оригинального оборудования (ОЕМ) и организации указывают не просто лишь то, какие испытания на устойчивость были проведены, а и стандартизированные условия поведения таких испытаний для автономных автомобильных нагрузок. Ряд этих требований обобщен в международных стандартах¹ ISO 16750-2 и ISO 7637-2 [1, 2].

¹ В РФ используются аналогичные стандарты ISO 16750-2:2012 «Транспорт дорожный. Условия окружающей среды и испытания электрического и электронного оборудования. Часть 2. Электрические нагрузки» и ISO 7637-2:2011 «Транспорт дорожный. Электрические помехи, вызываемые проводимостью и взаимодействием. Часть 2. Нестационарная электропроводимость только по линиям электропитания». — Прим. перев.

Схемы защиты от большинства наиболее значимых экстремальных переходных процессов, которые необходимо учитывать при проектировании автомобильного оборудования, показаны на рис. 1. Большинство этих напряжений, с которыми обычно приходится иметь дело при разработке схемы организации питания, а также физические источники их происхождения, суммированы на рис. 2 и приведены в таблице 1 [1–3]. Здесь также приведены соответствующие международные стандарты серии ISO и несколько документов, полезных для конкретных OEM-производителей. Все эти документы регламентируют условия испытаний на устойчивость к переходным процессам по первичной шине постоянного тока автомобиля, а в широком понимании — транспортных средств.

Проектирование ступени преобразования напряжения питания

Первая ступень DC/DC-преобразования во время внезапного резкого сброса нагрузки должна выдерживать напряжение приблизительно до 42 В (условие для батареи 12 В) и также должна обеспечивать питание нагрузки во время холодного пуска двигателя; напряжение при этом может быть менее 4 В (рис. 3). Таким образом, как следует из вышесказанного, DC/DC-преобразователь, чтобы обеспечивать стабильное выходное напряжение в этом диапазоне входных напряжений, должен быть в состоянии понижать его в условиях подачи высокого уровня напряжения и повышать входное напряжение при его провале. Кроме того, требуется разработать схему защиты от напряжения обратной полярности, что необходимо для предотвращения катастрофических последствий или ограничения вероятности повреждения в случае ошибочного подключения с обратной полярностью — так называемой переполюсовки.

Повышающая + понижающая ступени

На рис. 4 показаны преимущества и ограничения для нескольких подходов к реализации решения DC/DC-преобразования для организации питания автомобильного электронного оборудования, не предназначенного для прямого подключения к общей шине напряжения постоянного тока. Один из подходов заключается в использовании в качестве первой ступени повышающего DC/DC-преобразования, которое создает шину с более высоким, чем

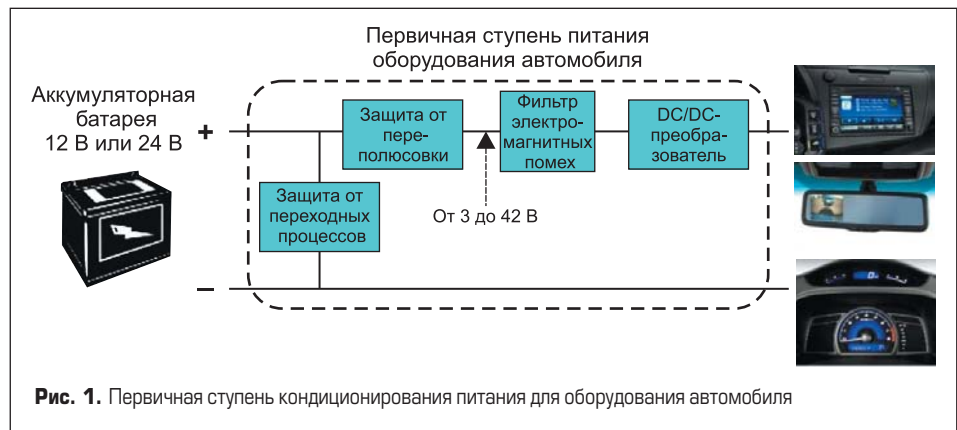


Рис. 1. Первичная ступень кондиционирования питания для оборудования автомобиля

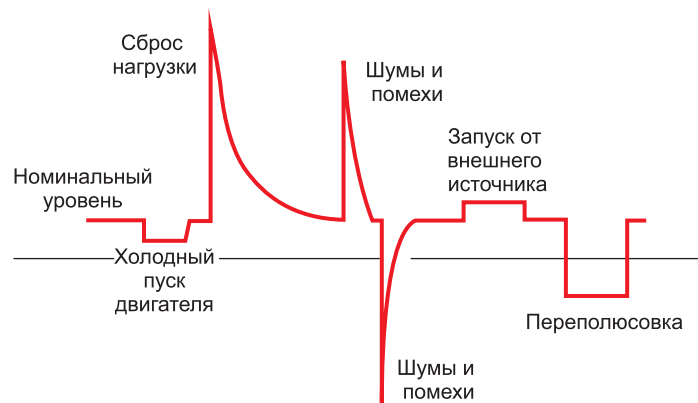


Рис. 2. Типичные изменения напряжения на шине питания от автомобильного аккумулятора

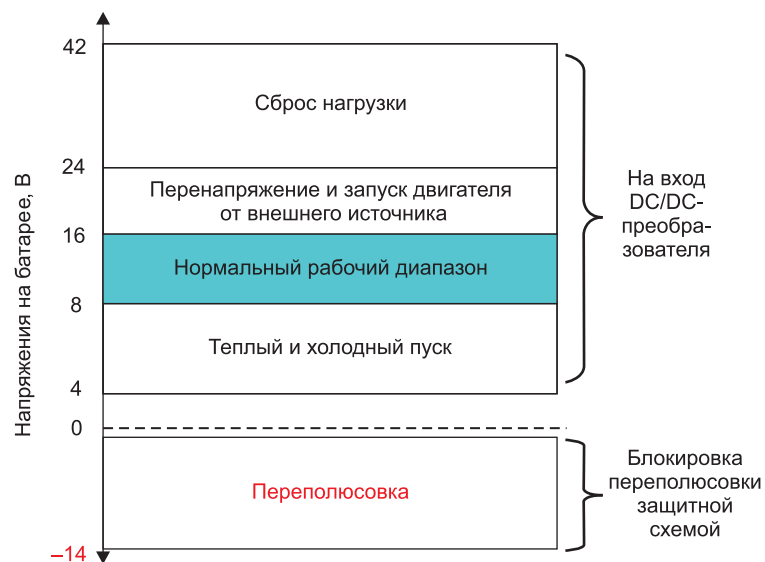


Рис. 3. Распределение возможных воздействующих напряжений при питании электронного оборудования автомобиля от шины 12 В аккумуляторной батареи

Таблица 1. Воздействующие переходные процессы и источники их происхождения

Испытания	Что моделируется	Основной регламентирующий документ
Сброс нагрузки	Аккумулятор отключается от генератора, работающего на нагрузку (т. н. режим load dump или сброс нагрузки)	ISO 16750-2 (sec 4.6.4), FMC1278 CI 222
Включение двигателя стартером	Имитирует возмущения на шине питания, возникающие во время и после холодного пуска двигателя	ISO 16750-2 (sec 4.6.3), FMC1278 CI 230-231
Наложение напряжения переменного тока	Остаточные пульсации напряжения после выпрямления напряжения переменного тока от генератора	ISO 16750-2 (sec 4.4)
	Наложение импульсы имитируют внезапные возникающие высокие токи, требующие подключения батареи	FMC1278 CI 210, 220, GMW3172, BMW E-06
Обратное напряжение	Ошибка в полярности подключения питания при использовании вспомогательного пускового источника	ISO 16750-2 (sec 4.7)
Запуск от внешнего источника	Повышенное напряжение постоянного тока из-за отказа генератора или запуска от внешнего источника с использованием батареи на 24 В	ISO 16750-2 (sec 4.3), FMC1278 CI270

напряжения на входной шине, напряжением (рис. 4а). За этим следует вторая ступень DC/DC-преобразования, которая представляет собой преобразователь с большим уровнем допустимого входного рабочего напряжения V_{IN} . Ступень с повышением напряжения обеспечивает работу электронного оборудования автомобиля в том случае, когда напряжение на шине аккумуляторной батареи падает слишком низко, например во время холодного пуска. Затем уже понижающая ступень уменьшает напряжение до заданного уровня, необходимого непосредственно для питания электроники автомобиля. Важным преимуществом такого решения является то, что ток дросселя входного повышающего преобразователя имеет относительно небольшие пульсации, что обеспечивает значительное уменьшение тока пульсаций, которые наводятся на шине аккумуляторной батареи. Это уменьшает требования к фильтру для подавления электромагнитных помех (ЭМП), таким образом, размер и стоимость фильтра электромагнитных помех оказываются существенно ниже.

Ограничение относительно предварительной ступени преобразования, работающей в режиме повышения входного напряжения, заключается в том, что, хотя она и выравнивает провалы напряжения на батарее, но не имеет возможности ограничить всплески напряжения, обычно возникающие, например, во время переходных процессов при сбросе нагрузки

или при запуске двигателя стартером. Так что следующий понижающий каскад в системе DC/DC-преобразования должен быть рассчитан на полное напряжение, возникающее при сбросе нагрузки. Это напряжение в большинстве практических конструкций обычно составляет около 42 В. Все это приводит к увеличению габаритов и стоимости двух ступеней, которые, как уже было сказано, должны быть рассчитаны на широкий диапазон входного напряжения и токи полной нагрузки.

Дополнительная повышенная стоимость решения в виде двух ступеней преобразования является следствием того, что в этой архитектуре используется двойное преобразование, при котором на обоих этапах преобразования используется ШИМ-регулирование, а также имеются потери проводимости. Это двойное преобразование работает все время, даже тогда, когда напряжение батареи находится в рабочем диапазоне, так что здесь было бы вполне достаточно использовать только лишь понижающее преобразование. Чтобы избежать этих дополнительных потерь мощности из-за постоянно включенного режима повышения уровня напряжения, как это показано на рис. 4а, более разумный подход мы можем видеть на рис. 4б, который использует режим повышения только в случае необходимости, т. е. при провалах напряжения. Архитектура, предусматривающая повышение напряжения лишь при необходимости, использует режим байпаса (обхода), который показан

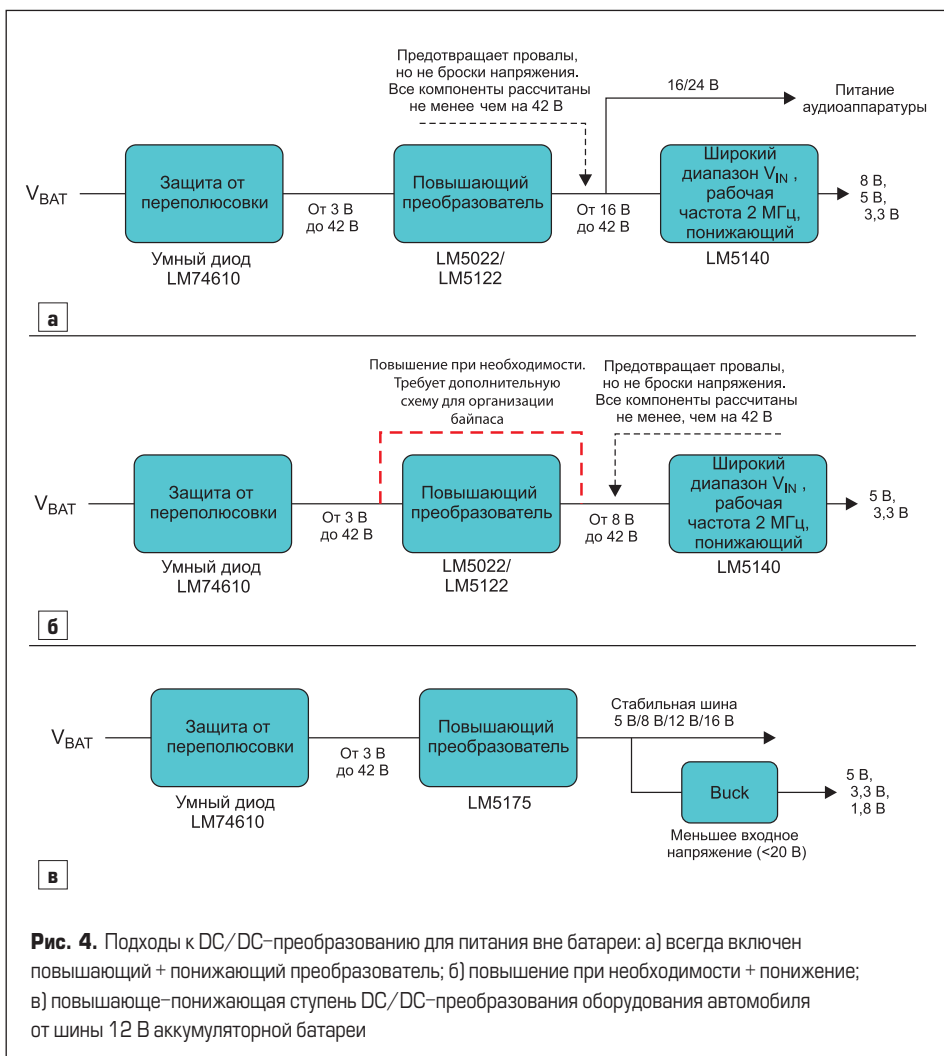
красной пунктирной линией на рис. 4б. Режим повышения включается и начинает использоваться только тогда, когда напряжение на шине аккумуляторной батареи падает ниже предопределенного значения. Уровень этого напряжения следующей ступени преобразования определяется минимально необходимой для ее должного функционирования величиной собственного падения напряжения. Поскольку повышающий преобразователь большую часть времени отключен, это позволяет снизить коммутационные потери ступени, отвечающей за повышение напряжения. Однако при такой архитектуре повышающий DC/DC-преобразователь должен реагировать и включаться в работу достаточно быстро. Это необходимо, чтобы максимально быстро предотвратить слишком низкое падение напряжения на нагрузке. Для обнаружения падения батареи и перехода от байпаса к режиму повышения напряжения может потребоваться еще и дополнительная следящая схема. Так как повышение напряжения по необходимости ожидается только при падении напряжения на шине аккумуляторной батареи, эта архитектура подходит только для относительно низковольтных шин питания, таких как 5 и 3,3 В, другими словами, напряжения на этих шинах должны лежать значительно ниже нормального диапазона напряжения на шине аккумулятора автомобиля.

Повышающе-понижающая ступень DC/DC-преобразования

Повышающе-понижающие DC/DC-преобразователи должны обеспечивать одноступенчатое преобразование для входных напряжений от шины аккумуляторной батареи в широком диапазоне (рис. 3) и гарантировать при этом стабильное напряжение на выходе. Для такого преобразования используется несколько топологий [4]. Пример на рис. 4в показывает использование микросхемы контроллера повышающе-понижающего DC/DC-преобразователя LM5175 с четырьмя ключами. Это вызвано тем, что, благодаря своей архитектуре, он отличается более высокой эффективностью (КПД) и широкими возможностями по управлению питанием.

DC/DC-преобразователь, выполненный на базе контроллера LM5175, отличается широким диапазоном входного напряжения V_{IN} и, благодаря возможности работы с четырьмя ключами, может как повышать, так и понижать входное напряжение. При этом он способен обеспечивать стабилизированное выходное напряжение даже в том случае, если его входное напряжение равно выходному. Упрощенная схема и временные диаграммы переключения ключей во всех режимах работы преобразователя показаны на рис. 5.

Когда входное напряжение выше заданного уровня выходного напряжения, рассматриваемый преобразователь работает в режиме понижения напряжения с выходным каскадом в проходном режиме. Когда входное напряжение ниже заданного уровня выходного напряжения, он работает в режиме повышения, в этом случае его входной каскад находится в режиме



прямой проводимости. Когда же напряжение V_{IN} находится близко к выходному V_{OUT} , то для поддержания плавной или, как ее называют, бесшовной работы он чередует циклы повышения и понижения. Поскольку в режиме повышения или понижения напряжения используется только одно плечо в цикле, это позволяет избежать высоких потерь, характерных для чистого двухступенчатого преобразования.

В отличие от повышающего предварительного преобразователя, задача которого заключается только лишь в повышении уровня выходного напряжения, которое, в случае его понижения, не сможет уменьшить выходное напряжение ниже уровня V_{IN} , повышающе-понижающий преобразователь обеспечивает устойчивость как к просадкам, так и к резким броскам входного напряжения. Для автомобильных применений с выходным напряжением выше номинального диапазона (≥ 16 В) повышающий преобразователь обеспечивает низкий уровень пульсации на входе и обеспечивает, кроме того, защиту от перегрузки и короткого замыкания, а также выполняет и ограничение пускового тока. Повышающий каскад преобразователя также избавляет от необходимости использования громоздких пассивных фильтров низких частот, необходимых для подавления наложенного переменного напряжения, которое может наводиться на шине 12-В аккумуляторной батареи как следствие выпрямления выходного напряжения переменного тока автомобильного генератора. Для стабилизированных выходных напряжений, лежащих ниже номинального напряжения аккумуляторной батареи (5 и 3,3 В), топология повышающе-понижающего преобразования обеспечивает одноступенчатое решение с более высокой эффективностью, чем архитектура из двух отдельных преобразователей — предварительного повышающего и основного понижающего. Тем не менее преимущество в размерах с использованием одноступенчатых повышающе-понижающих преобразователей нивелируется по причине того, что здесь, как правило, требуется больший по габаритам фильтр подавления электромагнитных помех.

Тем не менее для автомобильных систем именно повышающе-понижающий преобразователь, показанный на рис. 5, является оптимальным решением в качестве предварительного стабилизатора напряжения. Этот преобразователь сочетает преимущества первой ступени, где он может работать в качестве повышающего преобразователя, например для борьбы с просадками напряжения (для диапазона выходного напряжения 16–24 В, рис. 4в), и обеспечивать защиту в условиях холодного пуска двигателя. Этот преобразователь также включает в себя защиту от сброса нагрузки и защиту от перегрузки по току с одновременной защитой от короткого замыкания, обычно ассоциируемую с особенностями функционирования понижающих преобразователей. Кроме того, он обеспечивает полное отключение входа/выхода в режиме выключения без потребления остаточных токов.

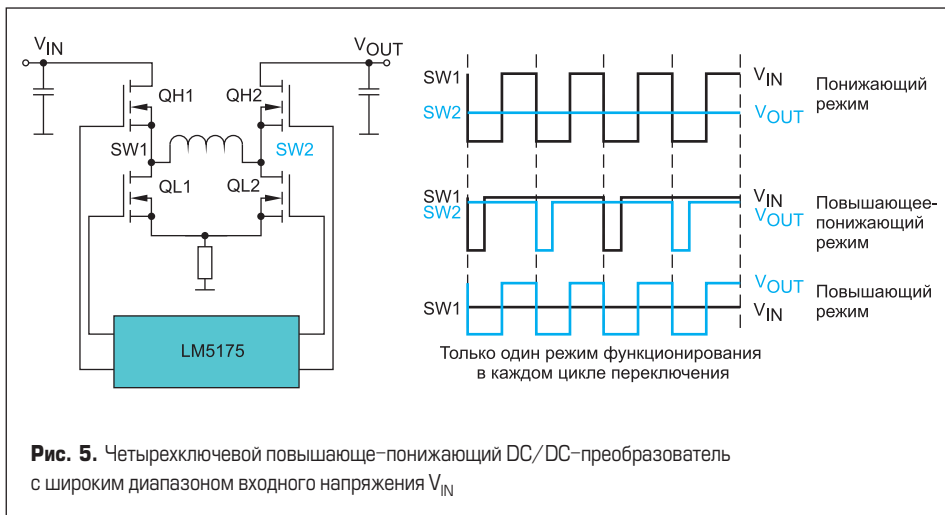


Рис. 5. Четырехключевой повышающе-понижающий DC/DC-преобразователь с широким диапазоном входного напряжения V_{IN}

Защита от переплюсовки

Для защиты компонентов электронного оборудования, подключенного к аккумуляторной шине, от отрицательного напряжения необходима защитная схема от переплюсовки, то есть защита от подачи напряжения обратной полярности, которая может быть вызвана, например, неправильным подклю-

чением внешнего источника питания для запуска автомобиля. В автомобильных системах используется множество подходов к предотвращению этого крайне негативного явления — от плавких предохранителей, диодов Шоттки до полевых транзисторов с p -каналом (PFET) и n -канальных полевых транзисторов (NFET). Примеры таких решений показаны на рис. 6.

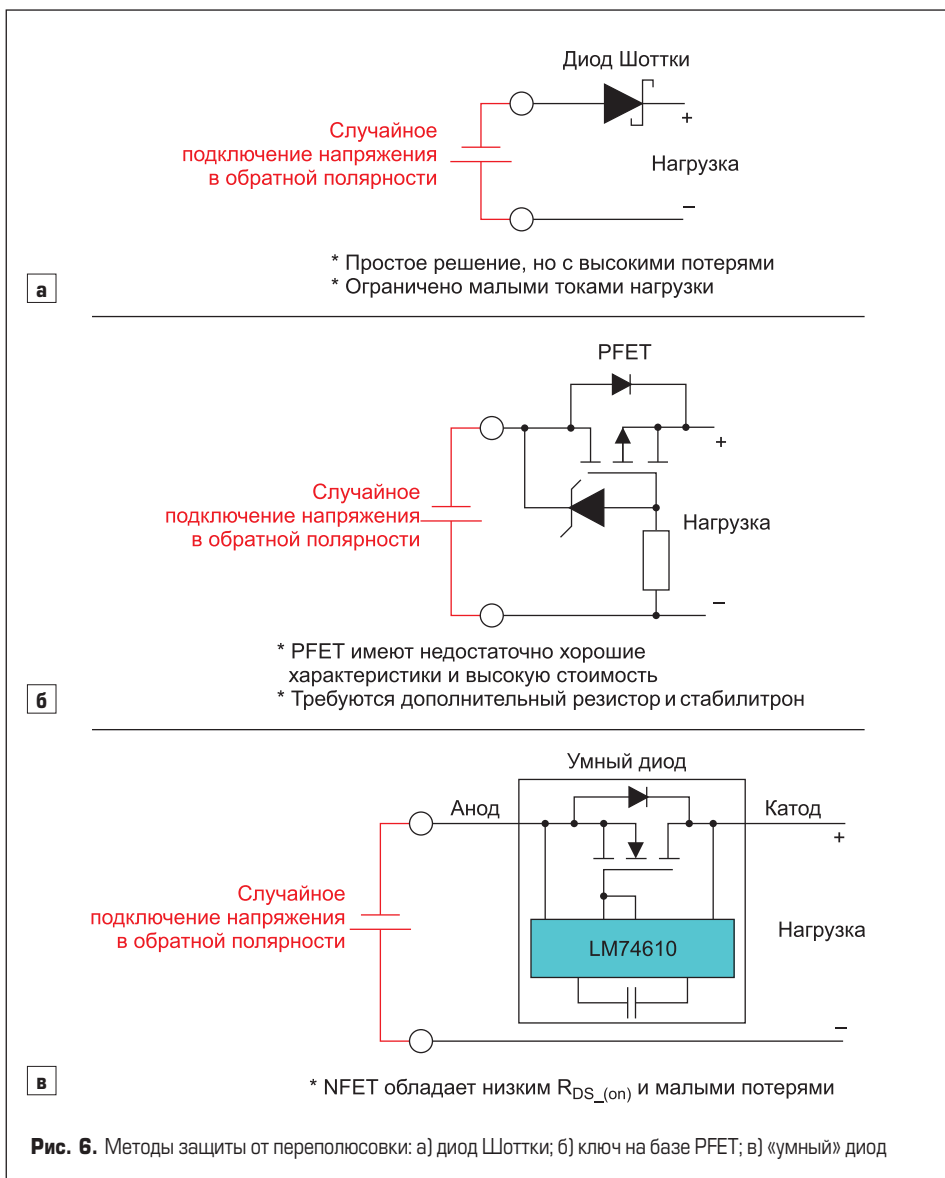


Рис. 6. Методы защиты от переплюсовки: а) диод Шоттки; б) ключ на базе PFET; в) «умный» диод

В случае относительно низких токов нагрузки оптимальное решение для защиты от напряжения обратной полярности — это обычный диод Шоттки. PFET могут работать с более высокими токами, но для их управления обычно требуется резистор подтяжки на землю и ограничительный стабилизатор, и на них рассеивается дополнительная мощность. Кроме того, PFET, по сравнению с NFET, имеют недостаточно низкое сопротивление канала в открытом состоянии $R_{DS(on)}$ и обычно более дороги. Решение в виде «умного» диода сочетает в себе лучшие характеристики n -канального МОП-транзистора с простотой подключения, характерной для обычных диодов.

Выводы

Первая начальная ступень преобразования напряжения для автомобильных приложений, не предназначенных для непосредственного питания от шины постоянного тока автомобиля, должна обеспечивать работоспособность в условиях широкого диапазона колебаний входного напряжения, в том числе и при питании непосредственно от аккумуляторной батареи автомобиля. Условия испытания с имитацией этих воздействий описаны в соответствующих автомобильных стандартах и документах, ориентированных на изготовителей конечного оборудования. Примеры таких испытаний, которые требуются при проектировании си-

стемы питания: проверка на устойчивость при подаче напряжения обратной полярности; холодный и горячий пуски двигателя; переходные процессы, возникающие при запуске стартера и повторном пуске двигателя, сбросе нагрузки; наложенное напряжение переменного тока в пределах номинального диапазона напряжения аккумуляторной батареи. Существенные перепады и колебания рабочего напряжения на шине аккумулятора обуславливают необходимость использования DC/DC-преобразователей с широким рабочим диапазоном входного напряжения. Такие преобразователи должны обеспечить формирование шины предварительного напряжения и стабилизацию необходимых уровней напряжения для питания нагрузок в виде конечного электронного оборудования. В зависимости от нагрузки и подсистем автомобиля, на которые рассчитано питание, проектировщики могут спроектировать силовой каскад с использованием предварительного повышающего преобразователя или в виде связки предварительного повышающего и понижающего преобразователей, а также в виде одноступенчатого повышающе-понижающего DC/DC-преобразователя. Оптимальное решение — использование четырехключевого повышающе-понижающего DC/DC-преобразователя, который обеспечивает наилучшее сочетание универсальности и малых габаритов конечного решения при его высокой эффективности. Что касается защиты

от переплюсовки, то имеется много вариантов в части защиты от воздействия напряжения обратной полярности, но наилучшее — это использование «умных» диодов, которые отличаются и высокими техническими характеристиками, и простотой исполнения непосредственно самого решения.

Литература

1. ISO 16750-2: Road vehicles—Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment.
2. ISO 7637-2: Road vehicles – Electrical disturbances from conduction and coupling Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only.
3. FMC1278: Electromagnetic Compatibility Specification for Electrical/Electronic Components and Subsystems, Ford Motor Company (FMC1278), July 2015.
4. Vijay Choudhary, Timothy Hegarty and David Pace. Under the hood of a non-inverting buck-boost converter. TI Power Supply Design Seminar 2016.
5. Vijay Choudhary and Mathew Jacob. Smart Diode and 4-Switch Buck-Boost Provide Ultra High Efficiency, Compact Solution for 12-V Automotive Battery Rail. PCIM Europe 2016, 10–12 May 2016. Vol. 1.
6. Matthew Jacob. Reverse-polarity protection comparison: diode vs. PFET vs. a smart diode solution. Texas Instruments, Behind the Wheel blog, December 21, 2015.