

# Десять советов для успешного проектирования автомобильной электроники с выполнением требований по ЭМС/ЭМП

Марк ЗАУЭРВАЛЬД (Mark SAUERWALD)  
Перевод: Владимир РЕНТЮК

Как и вся автоиндустрия в целом, так и отдельные производители оборудования и систем для автомобилей должны выполнять требования по электромагнитной совместимости (ЭМС). Например, два основных требования регламентируют, что сами электронные системы не должны излучать чрезмерных электромагнитных помех (ЭМП) и иметь защиту от таких помех, испускаемых другими системами автомобиля.

В статье рассматриваются основные требования, а также предлагается ряд советов и методов, которые могут быть использованы для того, чтобы спроектированное вами оборудование автомобиля соответствовало необходимым нормам по ЭМС.

## Краткий обзор требований по ЭМС

Документ Международного специального комитета по радиочастотам — CISPR 25 («Транспортные средства, суда и двигатели внутреннего сгорания. Характеристики радиопомех. Пределы и методы измерения для защиты бортовых приемников» — комментарии переводчика) — это основной стандарт, описывающий методы проведения испытаний с указанием предельно допустимых значений уровней излучения от компонента (узла, блока, устройства), установленного на транспортном средстве [1, 2]. В дополнение к требованиям, определенным в стандарте CISPR 25, большинство про-

изводителей имеют свой собственный набор внутренних стандартов, ужесточающих нормы CISPR 25. (Так, в Российской Федерации действует дополняющий CISPR 25 стандарт ГОСТ Р 51318.25-2012 (СИСПР 25:2008) «Совместимость технических средств электромагнитная. Транспортные средства, моторные лодки и устройства с двигателями внутреннего сгорания. Характеристики промышленных радиопомех. Нормы и методы измерений для защиты радиоприемных устройств, размещенных на подвижных средствах» — комментарии переводчика). Основная цель изложенных в CISPR 25 методов испытаний заключается в том, чтобы убедиться, что компонент, который планируется к установке в транспортное средство, например в автомобиль, не будет создавать помехи и мешать нормальному функционированию других систем внутри этого транспортного средства.

В положениях документа CISPR 25 сказано, что электромагнитный шум в помещении или камере для проведения испытаний должен быть не менее чем на 6 дБ ниже самых низких уровней, необходимых по условиям измерения. Поскольку в стандарте CISPR 25 есть требования по уровням электромагнитного излучения, не превышающим 18 дБ (мкВ/м), то для их оценки уровень внешних электромагнитных помех не должен превышать 12 дБ (мкВ/м). Для справки: это примерно напряженность поля типичной АМ-радиостанции в 1 км от ее излучающей антенны [3].

В нынешних условиях единственный способ выполнить это требование заключается в проведении испытаний в специальной экранированной камере или помещении, спроектированном и построенном для защиты испытуемого оборудования от влияния внешних полей. Кроме того, исходя из разумных затрат, естественно, необходимо, чтобы такая камера имела приемлемые конечные размеры. Здесь весьма важной является эффективная защита испытуемого оборудования от воздействия на него еще и отраженных сигналов, которые могут возникнуть внутри самого испытательного помещения, в частности отражения от его стен. Поэтому стены испытательной камеры следует облицовывать материалом, который будет поглощать, а не отражать электромагнитные волны (рис. 1). Камеры для испытаний — сооружения весьма дорогие, и, как правило, их арендуют лишь на время проведения испытаний. Тем не менее, чтобы в дальнейшем сократить возможные расходы, правильным решением является оценка проблем ЭМС/ЭМП еще на этапе проектирования оборудования, это позволит получить положительные результаты уже на первых испытуемых образцах.

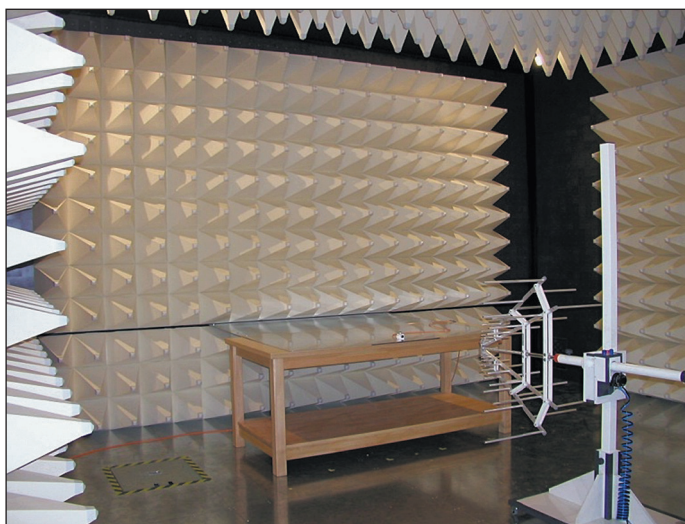


Рис. 1. Типичная испытательная камера, в покрытии стен и потолка которой используются специальные пирамидальные поглощающие структуры, что позволяет исключить отражения

Еще один международный стандарт, ISO 11452-4 Bulk Current Injection (BCI), содержит перечень испытаний, которые используются для определения устойчивости электронных компонентов легковых и грузовых транспортных средств к электрическим помехам от узкополосного излучения электромагнитной энергии. Проверка также осуществляется в экранированной камере с искусственным введением сигналов помех непосредственно в жгут проводов при помощи токовых клещей связи (в Российской Федерации действует версия этого стандарта в виде межгосударственного стандарта ГОСТ ИСО 11452-4-2007 «Транспорт дорожный. Методы испытаний компонентов на устойчивость к воздействию узкополосного излучения электромагнитной энергии. Часть 4. Инжекция объемного тока», который полностью идентичен стандарту ISO 11452-4 — комментарии переводчика).

## Десять советов для успешного выполнения требований в части ЭМС

### 1. Уменьшение площади петель

Когда присутствует переменное магнитное поле, то петля из токопроводящего материала действует в качестве антенны и преобразует магнитное поле в ток, протекающий по контуру. Сила тока в контуре пропорциональна площади петли. Таким образом, в каждом конкретном случае необходимо насколько это возможно вывести петли из зоны действия внешних полей и максимально сократить их площадь. Примером петли, которая может реально появиться на практике, является вариант использования для передачи сигналов дифференциальной линии. Здесь петля может образовываться между передатчиком и приемником с дифференциальными линиями связи. Другой распространенный вариант петли — если в одной общей системе оборудования имеется две разнесенные в пространстве подсистемы, например дисплей и блок управления двигателем ECU (*англ.* ECU — Engine Control Unit), который передает информацию на этот дисплей. Здесь существует петля общего заземления (GND) по шасси транспортного средства, а именно подключение провода заземления в точке размещения дисплея и подключение заземляющего проводника уже в точке размещения блока управления двигателем. Когда видеосигнал подсоединен к дисплею через свое собственное заземление, то данное подключение может создать одну огромную петлю внутри всего контура заземления, что в некоторых случаях становится неизбежным. Тем не менее после введения катушки индуктивности или ферритовых элементов (бусинок, колец, муфт) в цепь связи этого соединения с «землей» петля по постоянному току будет функционировать, как и прежде, но радиочастотное излучение прекратится.

Кроме того, когда сигналы передаются по витым парам, петля формируется из каждой дифференциальной пары передатчик/приемник. Как правило, такая петля имеет небольшую площадь в кабельной части линии передачи, поскольку свитые провода такой пары тесно связаны между собой. Однако как только сигнал попадает на плату, то необходимо принять соответствующие меры для предотвращения увеличения площади петли, то есть ее раскрытия.

### 2. Шунтирующие конденсаторы весьма полезны

Микросхемы технологии КМОП (*англ.* CMOS) очень популярны, в частности благодаря своим высоким скоростям переключения и чрезвычайно низкой собственной рассеиваемой мощности. Идеальная КМОП-микросхема рассеивает энергию, только когда меняет свое состояние и ее межузловые емкости либо заряжены, либо разряжены. С точки зрения электропитания схема КМОП, которой в среднем необходим ток в 10 мА, может во много раз увеличить ток потребления в моменты переключения, сохраняя малое потребление тока между рабочими циклами. Поэтому методы ограничения излучений здесь сфокусированы на пиковых выбросах токов и напряжениях, а не на их средних уровнях.

Основным источником излучения помех в этом случае является бросок тока потребления, возникающий во время переключения микросхемы на ее выводах подключения питания. Однако если в непо-

средственной близости к выводам питания микросхемы установить шунтирующий конденсатор, то повышенный ток, необходимый для ее питания во время переключения, будет поступать уже не из источника питания, а из этого конденсатора. Затем заряд в конденсаторе между циклами переключения накапливается более низким уровнем тока и уже без броска. Конденсаторы большой емкости хороши для подачи продолжительных импульсов тока, но, как правило, они слабо реагируют на короткие всплески при переключениях на высоких частотах. В отличие от них конденсаторы с малой емкостью могут быстро среагировать на импульс тока потребления, но их общая мощность заряда ограничена и может быстро исчерпаться, не выполнив свою задачу. Наилучшее решение для большинства схем — сочетание конденсаторов различной емкости, соединенных параллельно. Например, это может быть два конденсатора номиналом 1 и 0,01 мкФ. Причем конденсатор меньшей емкости необходимо размещать максимально близко к выводам питания микросхемы, в то время как конденсаторы большей емкости, а они еще и больше по размерам, могут быть размещены немного дальше.

### 3. Хорошее согласование импедансов минимизирует излучение электромагнитных помех

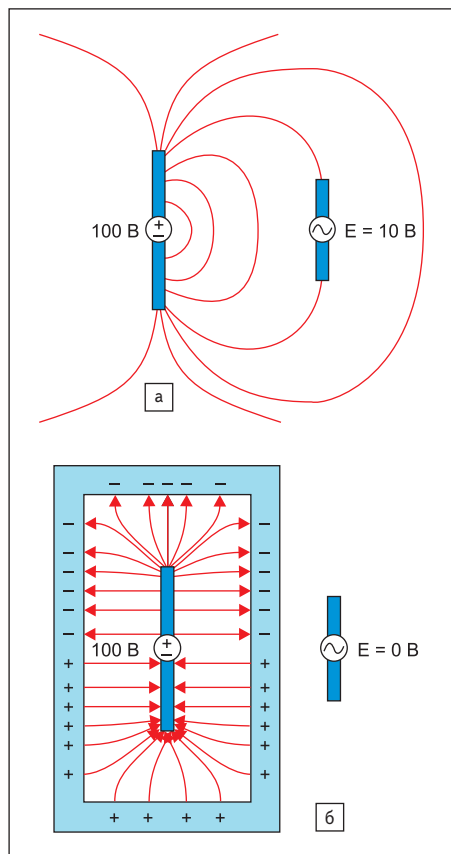
Когда через линию передачи посылается высокоскоростной сигнал и он сталкивается с неоднородностью волнового сопротивления в этой линии (то есть имеет место рассогласование импедансов), то часть сигнала отражается обратно к источнику сигнала, а часть продолжает двигаться в первоначальном направлении. Такие отражения неизменно приводят к излучению электромагнитных помех. Для обеспечения низкого уровня излучения помех при передаче высокоскоростных сигналов необходимо принять все меры для их передачи без отражений и искажений. Решению данной проблемы посвящено множество интересных публикаций, предоставляющих информацию по проектированию высокоскоростных линий передачи [4, 5].

Ниже приведены основные моменты, на которые необходимо обратить внимание при проектировании таких линий передачи:

- Всегда помните, что сигнал проходит по контуру, образованному сигнальным проводником и общим проводом, который часто выполняется в виде отдельного «земляного» слоя печатной платы. Причиной паразитного излучения помех здесь могут быть разрывы и неоднородности, причем как в самом сигнальном проводнике, так и в заземляющем слое печатной платы. Поэтому следует помнить о том, чтобы под сигнальными дорожками в заземлении не было ни вырезов, ни разрывов.
- Старайтесь избегать острых углов на сигнальных дорожках при их разводке. Красиво изогнутые углы гораздо лучше, чем резкие прямоугольные повороты.
- Часто сигнальные кабели связи с дисплеем будут иметь отдельные, не связанные непосредственно с передачей сигналов компоненты. Это могут быть линии с разьемами питания, проложенные поверх коаксиального кабеля, конденсаторы для обеспечения развязки по постоянному току и многое другое. Чтобы свести к минимуму отражения на компонентах, старайтесь применять компоненты небольших размеров, например типоразмера 0402, и использовать ширину печатного проводника такую же, как и контактная площадка элемента. Кроме того, убедитесь, что вы выполнили требование по волновому сопротивлению линии передачи непосредственно на печатной плате. Это осуществляется путем регулирования толщины диэлектрика между наложенными друг на друга проводниками платы (они образуют полосковую линию).

### 4. Экранирование

Не забывайте и не пренебрегайте техникой экранирования. При проектировании с целью минимизации уровня электромагнитных помех можно поставить экран вокруг излучающей помехи части цепи. Однако цепь все еще может излучать помеху, но хороший защитный экран захватит это излучение и отправит его на «землю», прежде чем оно выйдет из блока наружу. На рис. 2 показано, как экра-



**Рис. 2.** Пример влияния экранирования:  
 а) типичная проблема в виде ЭМП;  
 б) решение проблемы ЭМП путем экранирования

нирование может уменьшить уровень излучаемых электромагнитных помех.

Существуют различные формы экранирования. Это может быть как простое помещение некоего устройства в глухой токопроводящий корпус, так и использование небольших металлических экранов, которые опаяны по контуру и накрывают лишь определенные источники электромагнитных помех на печатной плате.

**5. Заземляющие цепи и проводники: чем короче, тем лучше**

Каждая порция тока, протекающего в микросхему, выходит из нее обратно. В этой статье уже было указано, что необходимо обеспечить минимально короткие соединения между микросхемой и блокировочными конденсаторами по ее питанию, также было дано несколько советов по уменьшению площади петель и т. д. Однако часто забывают, что для тока есть еще и путь по общему проводу (заземлению), по нему ток должен вернуться обратно к своему источнику, поскольку контур для его протекания всегда замкнут. В идеальной ситуации плата должна иметь отдельный внутренний слой именно для заземления (общий провод), и элемент будет подключен к общей цепи не таким длинным проводником, как в случае использования отдельного заземляющего проводника.

Тем не менее некоторые платы имеют вырезы в заземляющем слое, что может привести к увеличению пути тока. И хотя в итоге точка заземления элемента оказывается подсоединенной, но удлиненный путь ее подключения действует уже в качестве антенны для излучения или приема электромагнитных помех.

**6. Быстродействие должно быть оправданным, а не максимальным**

Для обеспечения минимального временного рассогласования сигналов существует тенденция, предусматривающая использование максимально быстродействующей логики. Это вызвано желанием избежать так называемых логических гонок, способных привести к разрушению сигналов. К сожалению, такая быстродействующая логика отличается высокой крутизной фронтов и, как следствие, очень высоким содержанием высокочастотных гармоник, производящих электромагнитные помехи. Один из способов уменьшить уровень ЭМП в системе — использование, насколько возможно, более низкоскоростной логики, которая по-прежнему удовлетворяет требованиям синхронизации, но уменьшает уровень излучаемых помех. Многие программируемые логические схемы (ПЛИС) позволяют программировать драйверы (выходные каскады) на более низкие уровни выходного тока, что является одним из способов уменьшения крутизны фронтов. В некоторых случаях на логических линиях могут быть применены последовательно включенные резисторы, которые образуют фильтры низкой частоты с собственной емкостью линии связи и входными емкостями и тем самым уменьшают скорости нарастания сигналов в системе.

**7. Дроссели в цепях питания весьма полезны**

В ходе обсуждения совета № 2, как способа уменьшить влияние бросков тока, было предложено использовать блокировочные конденсаторы в цепях питания микросхем. Дроссели на линиях подачи питания представляют собой другую сторону той же медали. Размещая дроссель или ферритовый элемент (бусинку, кольцо или муфту) на линии подачи питающего напряжения, вы принуждаете подключенные к таким линиям нагрузки реализовывать свои потребности в части динамического потребления тока в большей степени за счет не блокировочных конденсаторов, а прохождения импульсов тока по всему пути туда и обратно к источнику питания.

**8. Конденсаторы по входу и выходу импульсных стабилизаторов обязательны**

Одна из постоянно повторяющихся тем в поиске решения вопросов ЭМП — снижение (насколько это возможно) скорости на-

растания напряжения  $dv/dt$  и/или тока  $di/dt$ . В этом контексте DC/DC-преобразователи могут показаться совершенно безвредными, пока вы не поняли, что они не преобразовывают непосредственно напряжение постоянного тока в напряжение постоянного тока. Они реализуют свою функцию, преобразуя напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока, а уже потом осуществляют его обратное преобразование в напряжение постоянного тока. Следовательно, в середине их рабочего цикла мы имеем напряжение переменного тока, которое может вызвать проблемы в части превышения допустимого уровня излучения электромагнитных помех. Одна из областей, где конструкторы автомобилей весьма озабочены наличием таких помех, — радиоприемники с диапазонами, работающими в режиме амплитудной модуляции (АМ). Сегодня почти каждый автомобиль оснащен радиоприемником с АМ-диапазонами, которые характеризуются очень высокой чувствительностью и соответственно обладают высоким коэффициентом усиления усилителя радиочастоты в диапазоне от 500 кГц до 1,5 МГц. Если компонент излучает сигнал в этой полосе частот, то, вероятно, он будет слышен в виде помехи по радио. Многие импульсные блоки питания используют рабочие частоты переключения в пределах именно этой полосы частот, что приводит к проблемам в автомобильной промышленности. В результате большинство ориентированных на автомобильную промышленность импульсных стабилизаторов напряжения используют частоты переключения, которые лежат выше этой полосы, — обычно они работают на частоте 2 МГц или выше. При недостаточной фильтрации по входу и выходу таких импульсных стабилизаторов некоторые из коммутационных помех могут проникать в другие подсистемы автомобиля, чувствительные либо к основной рабочей частоте DC/DC-преобразователя, либо к ее гармоникам.

**9. Необходимо отслеживать и устранять паразитные резонансы в цепях**

Как же отмечалось, для различных источников помех, для уменьшения такого негативного явления, как повышенные значения  $dv/dt$  и  $di/dt$ , которые могут привести к недопустимо высокому электромагнитному излучению, используются катушки индуктивности и конденсаторы. Тем не менее и сами дроссели и/или конденсаторы могут оказать негативное влияние на решение этой проблемы, что связано с их собственным паразитным резонансом. Данную проблему можно устранить, добавив резистор параллельно катушке индуктивности. Такой резистор необходим для уменьшения способности поглощать энергию колебаний при резонансе, прежде чем эти колебания станут настолько большими, что вызовут проблемы. Другая

потенциальная проблема возникает в том случае, когда имеется индуктивность, либо включенная последовательно в виде дискретного компонента, либо это паразитная индуктивность линии подачи электропитания. Дело в том, что когда такая индуктивность нагружена на устройство с шунтирующим конденсатором, то полученный в этом случае  $LC$ -контур может легко возбуждаться на своей резонансной частоте. Опять же, подобный резонанс может быть демпфирован резистором, установленным параллельно с дросселем.

#### **10. Размытие спектра тактовой частоты позволяет уменьшить пиковые уровни излучения помех**

В таких составляющих частях оборудования в системе автомобиля, которые имеют шину данных и шину с тактовой частотой как, например, содержащие сочетание параллельно-последовательного и последовательно-параллельного преобразователей дисплеев, такие шины имеют возможность работы в режиме с расширенным спектром (*англ.* spread-spectrum clocking), который еще называют технологией размытия спектра. В этом режиме тактовый сигнал дополнительно модулируется. В результате энергия помехи, вырабатываемая фронтами тактовых импульсов и импульсов передачи сигналов по шине данных, распределяется (размывается) по более широкой полосе частот, чем это происходит без размытия спектра. Поскольку технические требования к электромагнитным помехам предусматривают ограничения по пиковым выбросам на любой частоте в пределах заданной полосы, размытие такого шума в более широком диапазоне помогает свести к минимуму пики помех (использование данного метода позволяет уменьшить уровень помех обычно на 6–10%). Однако следует заметить, что это может отрицательно отразиться на работе чувствительных к форме сигнала устройств, соответственно, прибегать к подобному методу следует с известной осторожностью.

Для иллюстрации практического воплощения такого подхода хорошим примером является использование микросхемы последовательно-параллельного преобразователя DS90UB914A-Q1 (десериализатор), часто применяемого в сочетании с микросхемой DS90UB913A-Q1, представляющей собой параллельно-последовательный преобразователь (сериализатор). Эти устройства предназначены для создания канала видеосвязи между камерой в современной системе помощи водителю — ADAS (*англ.* ADAS — Advanced Driver

Assist System) и процессором. Десериализатор восстанавливает сигнал тактовой частоты, предоставленный сериализатором от датчика изображения в видеокамере, и вместе с данными передает эти импульсы для обработки в процессор. Здесь для передачи информации используются 10 или 12 высокоскоростных линий передачи данных, которые одновременно с линией несущей сигнал тактовой частоты (ее значение также достаточно высоко) являются основными источниками электромагнитных помех. Чтобы уменьшить проблему, связанную с их излучением, микросхема десериализатора DS90UB914A одновременно использует тактовую частоту с размытием спектра, но это размытие лежит ниже уровня паразитной фазовой модуляции (джиттера), созданного самим сенсором изображения. Установка тактовой частоты с расширенным спектром осуществляется через соответствующие регистры в десериализаторе.

#### **Выводы**

В критических ситуациях, возникающих при эксплуатации транспортного средства, современные автомобили все больше полагаются на электронику. Таким образом, существует растущая потребность обеспечить ее функционирование без сбоев в присутствии помех и не создавать помех другим системам внутри транспортного средства. Следуя советам и методам, изложенным в этой статье, а также за счет правильного выбора соответствующих компонентов инженеры могут создавать передовые решения, надежно защищающие автомобильные системы от электромагнитных помех. ■

#### **Литература**

1. Vehicles, boats and internal combustion engines — Radio disturbance characteristics — Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers. CISPR 25, 2008.
2. Rodriguez V. Automotive Component EMC Testing: CISPR 25, ISO 11452-2 and equivalent Standards. Safety & EMC, 2011.
3. AM Broadcast Groundwave Field Strength Graphs. FCC Encyclopedia.
4. Wadell B. C. Transmission Line Design Handbook. Artech House, Jan 1, 1991.
5. Johnson H. W., Graham M. High Speed Signal Propagation: Advanced Black Magic. Prentice Hall Professional, 2003.