

# Электромагнитная совместимость разъемов

Сергей ВЕРЕТЕННИКОВ,  
инженер

Как известно, размеры современных устройств постоянно уменьшаются, а их стоимость снижается. Одна из причин этой тенденции заключается в успешном освоении интернета вещей или внедрении концепции Industry 4.0 в реализации межсетевое взаимодействие физических устройств и необходимости соблюдения соответствующие требования. Согласно им, следует обеспечить высокую степень интеграции на этапах НИОКР. Однако такая интеграция не достигается только благодаря использованию усовершенствованных микросхем.

Разработку оборудования можно ускорить, а расходы на нее сократить, если воспользоваться модульными решениями. Более того, разные модули можно проектировать и изготавливать на разных производственных площадках. При интеграции этих модулей с помощью разъемов образуется единая система с множественными сопряжениями.

У интерфейсов модулей – разные параметры и топологии. Как правило, при проектировании топологии разъемов не уделяется должное внимание характеристикам ЭМС модуля, а, следовательно, системе в целом. В настоящее время разъемы выбираются фактически на основе нескольких обязательных электрических и механических характеристик, например чтобы обеспечить беспрепятственную передачу LVDS-сигналов или отвести токи большой величины. К числу критериев, по которым, как правило, выбираются современные разъемы, относятся количество циклов, допустимая нагрузка по току, устойчивость к перекрестным помехам, размеры и т. д.

Все устройства должны пройти испытания на ЭМС, которые гарантируют работоспособность в требуемых условиях эксплуатации. Эти испытания выполняются по завершении разработки. Сборка из всех одиночных модулей происходит до испытаний, что повышает риск возникновения проблем, обнаруживаемых после разработки. Для исправления возможных несоответствий могут потребоваться немалые усилия, временные и финансовые затраты.

Модульное исполнение устройства позволяет выполнить испытания на ЭМС отдельных submodule с их интерфейсами. Для этого требуется, чтобы отдельные модули (или компоненты) имели заданные граничные характеристики и параметры ЭМС. Необходимо также знать аналогичные характеристики всех используемых разъемов.

В настоящее время нет параметров, характеризующих ЭМС разъемов. В спецификации по разъемам следует добавить также характеристики помех и помехозащищенности раз-

ъемов. Поскольку при современном уровне развития технологий размеры этих устройств превышают те расстояния, которые проходят сигналы по электронным платам, сигнальные линии защищены от помех намного эффективнее, чем разъемы. По этой причине они являются уязвимыми местами модульных систем. Чтобы повысить ЭМС приложений, требуется описать характеристики разъемов.

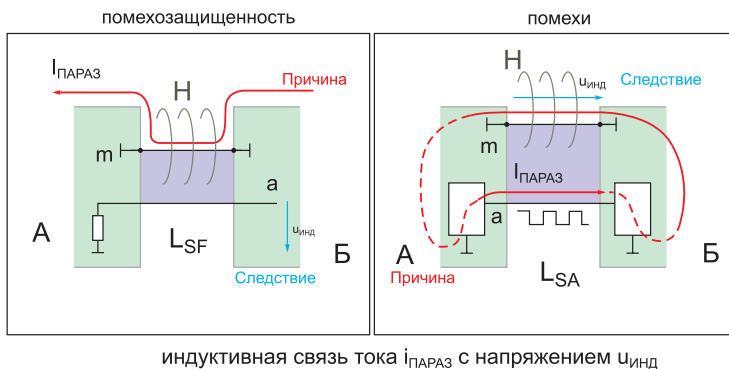
## Параметры ЭМС разъемов

Модель разъема, в которой обобщены их физические параметры, описывает механизмы связи между проводниками внутри разъема.

Эта модель состоит из двух узлов, соединенных одним разъемом. Все элементы сведены к базовым. На рис. 1 представлена абстрактная модель разъема, которая описывает в схематичном виде связь между двумя узлами А и Б с помощью упрощенного разъема. Все экранирующие и заземляющие выводы или поверхности представлены одним выводом. Анализируется работа только этого вывода, с которого сигнал с узла А поступает в приемный узел Б. Паразитный ток от узла Б в узел А проходит через экран или заземление этого разъема. Результирующее магнитное поле наводит напряжение на сигнальном выводе, проходя по контуру, образованному сигнальными и заземляющими выводами. Это напряжение падает на приемнике с большим сопротивлением, в результате чего могут возникнуть помехи в его электронной схеме.

Связь между проводниками внутри разъема тоже вносит свой вклад в помехи. На рис. 1а иллюстрируются условия помехозащищенности, а на рис. 1б – условия возникновения помех. Из-за обратного тока в замкнутой системе происходит изменение опорного напряжения между узлами А и Б. Результирующая разность потенциалов является фактором, который определяет помехи в системе. Уравнения (1)–(2) описывают эффекты, основу которых составляет закон индукции:

### Расчет основного параметра ЭМС:



$$U_{\text{Инд}} = d\Phi/dt = L \cdot di_{\text{ПАРАЗ}}/dt \quad (1)$$

$$U_{\text{Инд}} = j\omega L_{\text{ПАРАЗ}} \quad (2)$$

Эти модели не учитывают омическую составляющую в нижнем частотном диапазоне и уменьшение передаточной функции из-за короткого замыкания в верхнем частотном диапазоне.

Рис. 1. Абстрактная модель разъема

$$u_{\text{ИНД}} = \frac{d\Phi_{\text{ПАРАЗ}}}{dt} = L \frac{di_{\text{ПАРАЗ}}}{dt}, \quad (1)$$

$$U_{\text{ИНД}} = j\omega LI_{\text{ПАРАЗ}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ИНД}}$  — индуцированное напряжение;  $I_{\text{ПАРАЗ}}$  — паразитный ток;  $L$  — индуктивность связи;  $\omega$  — угловая частота.

Из этих уравнений видно, что для описания связи требуется только один показатель —  $L$ . Поскольку параметр  $L$  жестко обусловлен особенностями механической конструкции разъема, он является ключевым в описании этого компонента и его топологии. Это значит, что разъемы и расположение сигнальных выводов следует выбирать на основе конкретных требований приложения.

## Определение индуктивности связи

В силу особенностей механической конструкции разъема индуктивность связи не является величиной постоянной и действительной для всего разъема. Величина индуктивности зависит от сигналов. На нее оказывают влияние такие внешние факторы как близко расположенные металлические стенки или другие компоненты.

Возможность на этапе проектирования быстро установить значения параметров с учетом внешних факторов является весьма необходимой. Это делается с помощью специализированных измерительных средств, позволяющих уменьшить чувствительность к перекрестным помехам. Поскольку индуктивность связи зависит только от формы и размеров разъема, ее величина определяется на разных частотах. Необязательно определять этот параметр на очень высоких частотах в несколько ГГц. Чтобы быстро получить требуемые результаты, выбирается соответствующая измерительная установка, после чего реализуется и практически в реальном времени анализируется множество конфигураций разъема, позволяющих, например, установить влияние металлических объектов вблизи этого компонента на распределение в нем магнитного поля и, следовательно, определить, как все эти конфигурации влияют на индуктивность связи.

Разъем устанавливается отдельно на специальную плату для испытаний, которая используется с целью уменьшить перекрестные помехи и обеспечить сравнимость результатов. В состав установки входит измерительный прибор, зонд и анализатор спектра.

Анализатор спектра генерирует сигнал постоянной частоты, который инжектируется в экранирующую систему разъема с помощью зонда. На исследуемом выводе измеряется сигнал напряжения, который выво-

дится на дисплей с помощью программного обеспечения. Определение индуктивности связи осуществляется с помощью программного средства для расчета данных измерения. Имеется возможность анализировать частотный диапазон этого средства (1 МГц...1 ГГц), зависящий от размера соединителя. Влияние изменений и воздействий на устройство или его режим работы отслеживается в реальном времени по измеренному сигналу на протяжении. К числу возможных воздействий относятся приложенное извне механическое давление или уменьшение расстояния до токопроводящих частей. После нескольких измерений можно по соответствующим кривым установить, какие изменения были внесены успешно. Разъем с наиболее подходящей схемой выводов выбирается на основе данных о величине связи между разными сигнальными выводами.

## Пример измерения параметров ЭМС

В следующем примере рассматривается простой передатчик сигнала в качестве иллюстрации изложенного выше (рис. 2). На нижней плате генерируется сигнал прямоугольной формы, который передается на верхнюю плату по разъему. Разъем установлен так, что его устройство можно менять, добавляя новые контактные выводы. Вторая плата состоит из приемника для анализа передаваемых сигналов. Верхняя плата подключена к электронной эталонной системе только через этот разъем. Паразитный ток, возникающий от генератора последовательностей импульсов, поступает в систему через однополюсный штеккер, который также находится на этой печатной плате. Определяется влияние штеккера на передачу сигнала. Эта измерительная установка модели-

рует соединительные модули с подключенными к ним периферийными устройствами.

Короткие импульсы от стандартного генератора поступали через лабораторные разъемы. При изменении конфигурации разъема изменяется и индуктивность связи. Таким образом, согласно уравнению (1), короткие импульсы передаются при разных уровнях напряжения. На рис. 3 показано влияние помехи на прямоугольный сигнал. Синим цветом помечен сигнал на входе приемника. Нарастающий фронт короткого импульса приводит к появлению положительного пика на низком уровне тактируемого сигнала. Как видно по поведению красной кривой на рис. 3, помеха на входе приемника нарушает обработку сигнала (непродолжительное изменение коммутационного состояния). В результате увеличения интенсивности помехи увеличиваются результирующие токи и напряжения других сигналов. Для лучшего сравнения этих результатов импульсное напряжение было ограничено величиной 500 В. В рассматриваемой системе измерялись и сравнивались четыре разных конфигурации разъема.

Для расчета значений индуктивности связи использовалось уравнение (2). Эти значения сравнивались с результатами измерения рассматриваемого параметра при том же разьеме. Сравнившиеся конфигурации показаны на рис. 4.

Сравнение результатов показало, что измеренные значения достаточно близки к расчетным. Значения, измеренные непосредственно у разъема, более точные по сравнению с полученными для всей системы, поскольку она в большей мере подвержена воздействию паразитных эффектов. Как бы то ни было, все помехи в системе можно описать только с помощью индуктивности связи.

Уровни генерируемых сигналов можно рассчитать путем измерения индуктивности

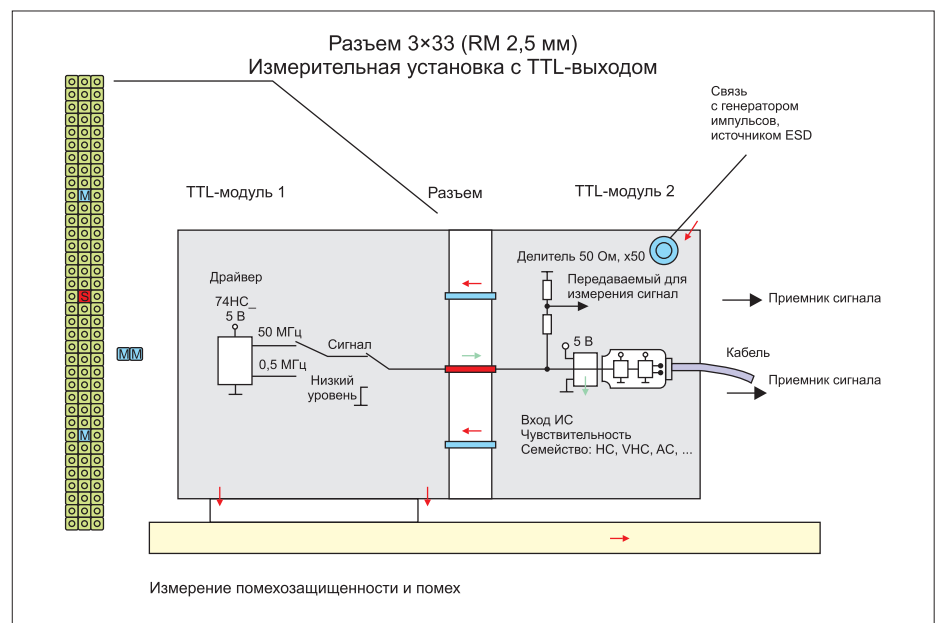


Рис. 2. Система передачи с TTL-интерфейсом и разъемом

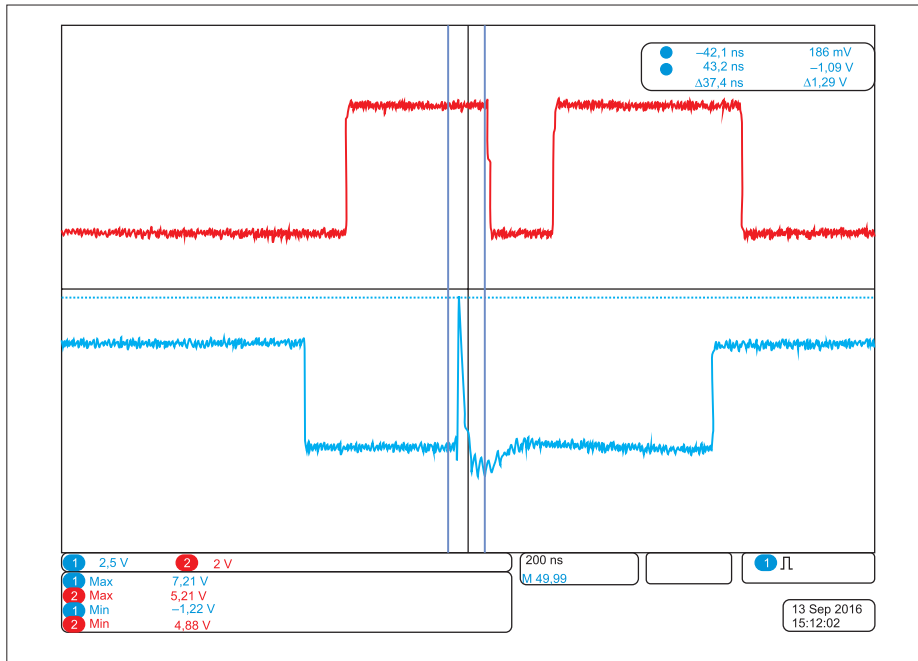


Рис. 3. Влияние коротких импульсов с  $U_{gen} = 500$  В при индуктивности связи 8 нГн

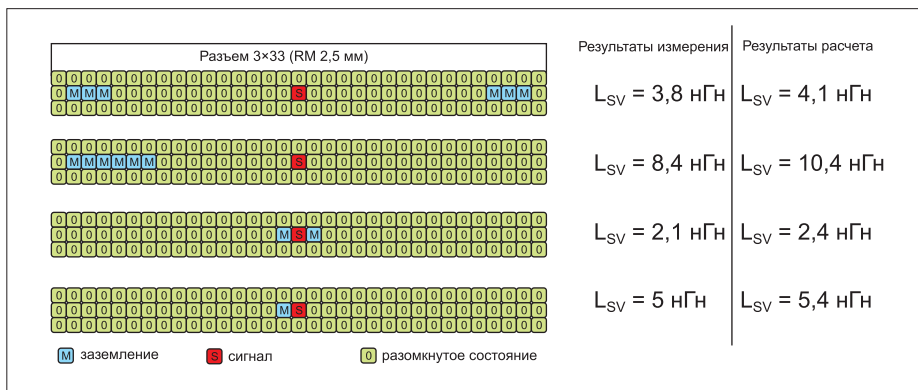


Рис. 4. Сравнение расчетных и измеренных значения индуктивности связи в четырех конфигурациях

связи, а затем оценить максимальную величину помехи, влияющей на устройство. Эти результаты должны отвечать трем требова-

ниям к параметрам электромагнитной совместимости разъема: легко рассчитываться, измеряться и применяться для обеспечения

помехоустойчивости и определения излучаемых помех.

Для расчета предельной величины применимости разъема можно воспользоваться уравнением (1). С его помощью в отдельных случаях рассчитываются кривые предельных значений для разъемов (рис. 5).

В первом приближении по этим кривым видно, какая индуктивность связи должна быть у разъема, чтобы исключить ошибки при разных порогах переключения.

### Особый случай – системы дифференциальной передачи

То обстоятельство, что индуктивность связи в большой мере определяется схемой разъема, верно и в отношении систем дифференциальной передачи. Однако при их рассмотрении необходимо учитывать два разных режима связи (рис. 6).

Влияние синфазного режима на дифференциальные системы соответствует выше описанной связи в односигнальных системах. Индуктивность связи в равной мере влияет на проводники дифференциальной пары. Оба потенциала сигнальных проводников равномерно изменяются в направлении к плате, относительно которой проводится измерение через индуктивность связи.

Магнитное поле, которое проходит через проводники с дифференциальными сигналами, вызывает изменение их потенциалов относительно друг друга. Описание этого эффекта аналогично описанию того, как влияет индуктивность связи на коэффициент ослабления синфазного сигнала. У стандартной дифференциальной линии передачи значения индуктивности связи в дифференциальном режиме меньше, чем в синфазном.

На обоих графиках рис. 7 видно, как влияет электростатический разряд (150 пФ; 330 Ом) на LVDS-систему. В двух этих из-

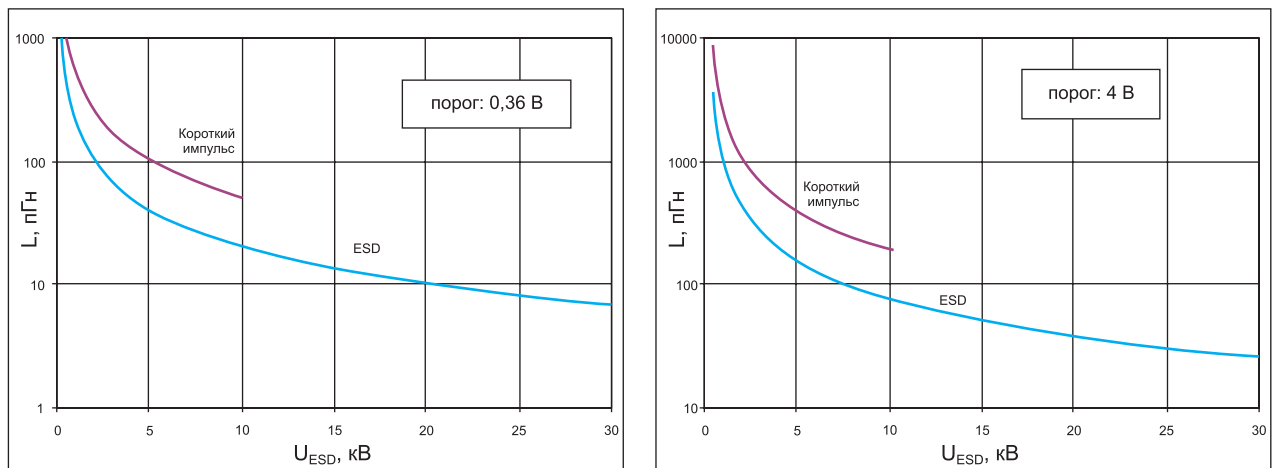


Рис. 5. Кривые предельных значений индуктивности связи для разных порогов переключения

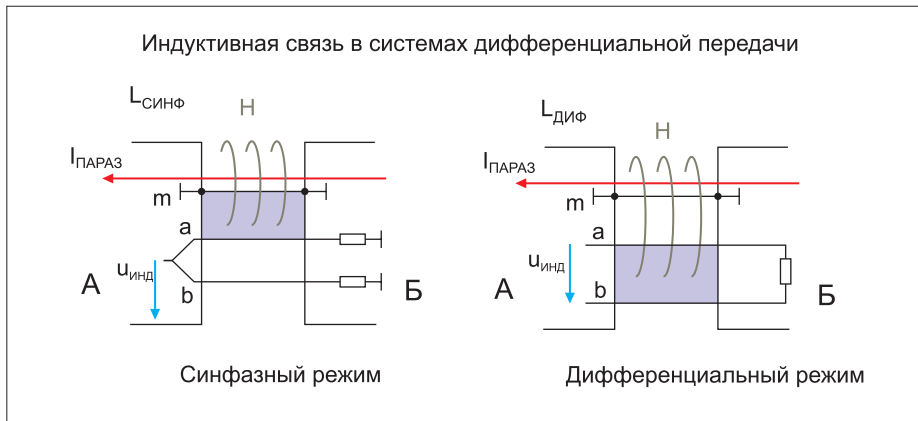


Рис. 6. Разные типы связи в дифференциальных системах

мерениях использовалась связь двух типов с помощью специальных адаптеров, каждый из которых генерировал синфазный или дифференциальный режим. Измерения осуществлялись двумя адаптерами, чтобы установить влияние обоих режимов, поскольку на практике многие эффекты, по сути, определяются обоими типами связи. Обратные сигналы (красного и синего цвета) представляют две дифференциальные линии данных LVDS-системы.

Сигнал зеленого цвета описывает результат измерения выходного сигнала приемни-

ка. На рис. 7а видно, как равномерно увеличиваются оба дифференциальных сигнала. Форма кривой импульса отличается от формы тока помехи, созданной источником ESD-разряда, что обусловлено влиянием передаточной характеристики индуктивности связи. На выходной сигнал приемника тоже воздействует помеха в течение всего периода. Из рис. 7б видно, как меняется потенциал дифференциальной пары сигналов, что объясняется общей связью тока электростатического разряда с сигнальными линиями через адаптер в диффе-

ренциальном режиме. Оба сигнальных провода отклоняются в разных направлениях. Такое воздействие испытывает система при превышении предельных значений наводки, что приводит к воздействию помехи на выходной сигнал.

**Выводы**

Разъем с неудовлетворительной характеристикой ЭМС может стать «узким местом» между хорошо работающими устройствами и вызывать их отказы. Измерение индуктивности связи помогает предупредить негативное влияние разъема на сигналы. Измерение характеристик реальной системы позволяет проверить точность полученной модели и параметры интерфейсов (разъемов) всех узлов, чтобы улучшить электромагнитную совместимость. Такой подход позволяет быстрее и проще тестировать в дальнейшем только ЭМС всей системы, исключив необходимость в испытаниях отдельных узлов.

Зная предельно допустимые условия эксплуатации модуля, его ЭМС можно измерять независимо, что позволяет обнаружить соответствующие проблемы на ранних этапах проектирования и решить их, не дожидаясь создания опытного образца.

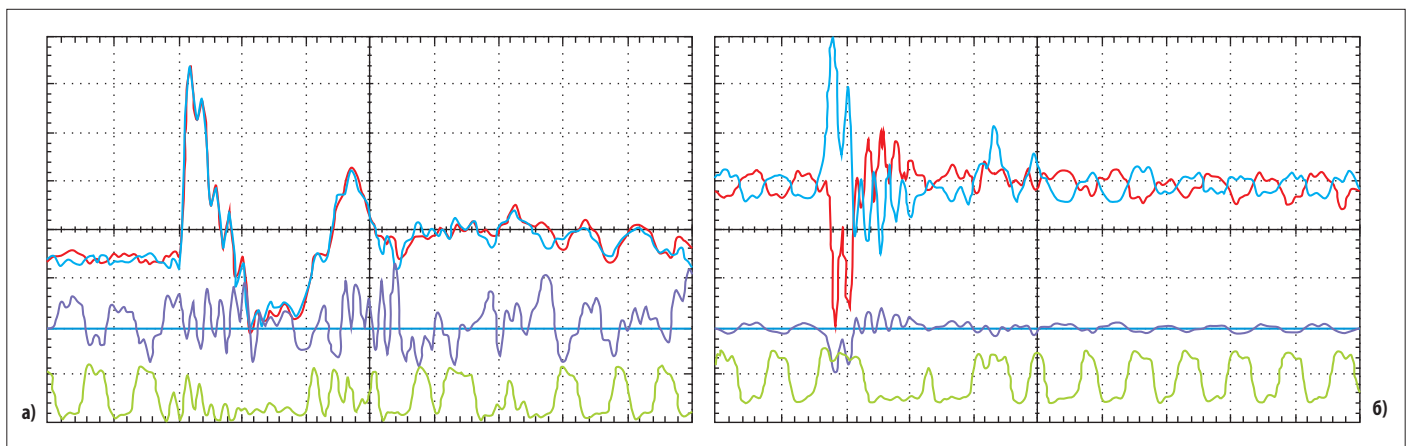


Рис. 7. Влияние индуктивности связи на: а) синфазный сигнал; б) дифференциальный сигнал

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 6'2018