Гальваническая развязка питания и двусторонняя передача данных на одном компоненте в SMD-корпусе

Александр ФЕДОРОВ
linear@ptelectronics.ru

Гальванические развязки встречаются во многих электронных устройствах из самых разных областей техники. Их используют для защиты от статических напряжений, для подавления шумов связанных с протекающими по шинам земли возвратными токами, для согласования устройств с разными уровнями напряжения на шине земли. Гальванически развязанными могут быть и цепи питания, и линии данных. Любая гальваническая развязка состоит из изолирующего элемента, который может быть емкостным, индуктивным или оптическим, и схемы, обеспечивающей корректную работу изолирующего элемента. Каким бы ни был изолирующий элемент, он всегда имеет массу ограничений по быстродействию, мощности, диапазону входных и выходных напряжений и токов. Во многих случаях гальваническая развязка оказывается «узким местом» системы, и ее проектирование требует особого внимания.

Новое в области гальванических развязок

Когда речь идет о создании гальванически развязанного источника питания мощностью 10 или 100 Вт, становится ясно, что тут требуются специальные знания в узкой области, источник питания следует рассматривать как отдельную задачу, и ее решение нужно поручить сведущему в этой области специалисту. Если же требуется гальванически развязать 1 Вт электрической мощности или создать гальваническую развязку одной линии данных, то такую задачу хочется решить сходу, потратив минимум рабочего времени и заняв компонентами малую площадь печатной платы. На самом же деле уменьшение мощности ничуть не сокращает сложность гальванической развязки. Гальваническая развязка мощностью 1 Вт легко может стать головной болью для разработчика, который раньше никогда не решал такие задачи. Компания Linear Technology предлагает разработчикам первое в своем роде готовое решение гальванической развязки для передачи питания и данных на одной микросхеме без внешних элементов, в корпусе для поверхностного монтажа.

Микросборки LTM288x — это семейство гальванически развязанных источников питания мощностью до 1 Вт, со встроенным гальванически развязанным каналом передачи данных. Микросборки имеют корпус для поверхностного монтажа размером 15×11,25×2,8 мм. Диапазон напряжений питания — 3,3–5 В, выходное напряжение — 5 В при токе до 200 мА. В микросборке LTM2881 реализован полнофункциональный интерфейс RS-485/RS422, а в LTM2882 — сдвоенный интерфейс RS-232. Скорость передачи — до 20 Мбайт/с. В качестве изолирующего элемента используется трансформатор. Микросборки LTM2881 и LTM2882 доступны в корпусах LGA либо BGA и имеют модификации с диапазонами рабочих температур 0…+70, –40…+85 и –55…+105 °С.

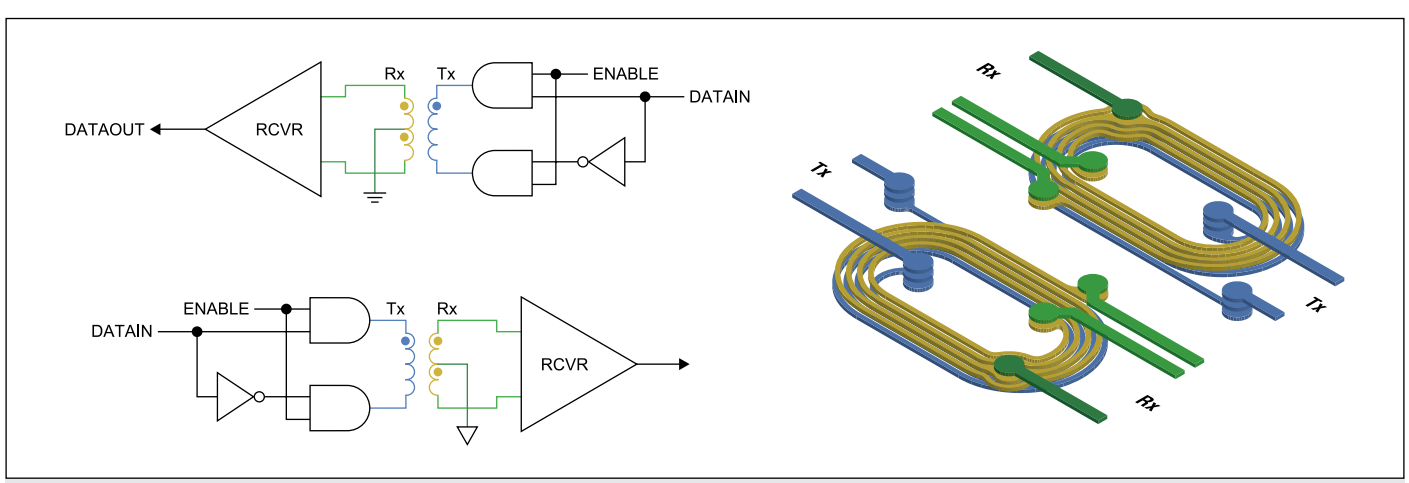

Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема

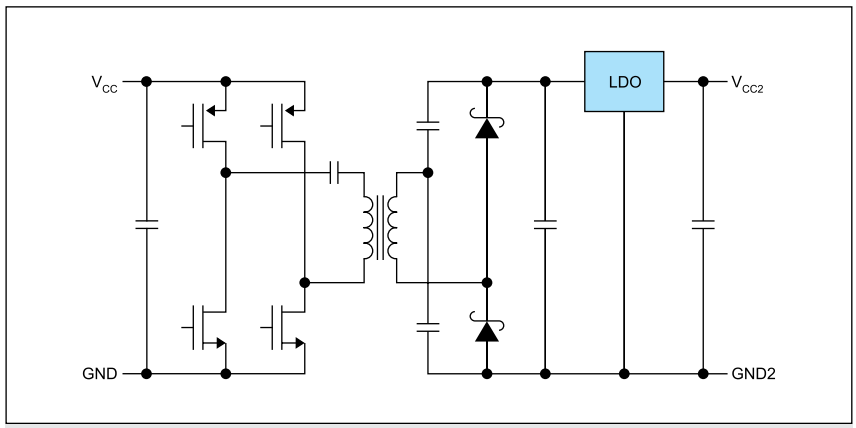

Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема изолированного DC/DC-преобразователя

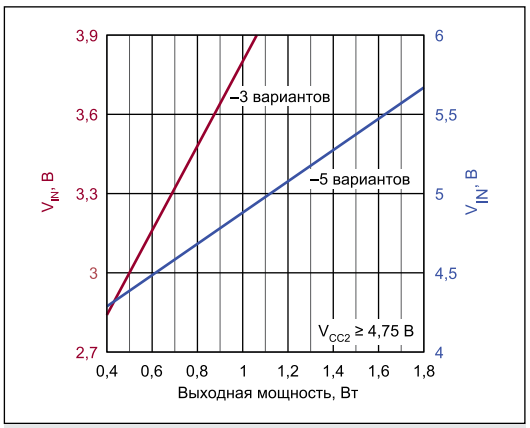

Рис. 3. Зависимость выходной мощности от напряжения питания

Передача данных

Внешне микросборки LTM288x выглядят как обычные цифровые оптопары с интегрированным внутрь корпуса гальванически развязанным DC/DC-преобразователем. На самом же деле, их устройство и принцип работы намного сложнее. Для передачи данных используются трансформаторы без сердечников, выполненные прямо на полупроводниковом кристалле. Физическая топология их обмоток и электрическая схема включения показаны на рис. 1.

Приемники-усилители, снимающие сигнал со вторичных обмоток, имеют дифференциальные входы, что делает их нечувствительными к синфазным помехам, которые могут возникать из-за паразитической емкости между обмотками. Поскольку данные передаются через два трансформатора в противоположных направлениях, передача в одну сторону происходит независимо от передачи в другую. Но физически канал для передачи в одну сторону только один, а микросборки имеют большее количество сигналов, передаваемых через гальванический барьер. В микросборке LTM2881 помимо сигналов DI (вход передатчика) и RO (выход приемника) на изолированную сторону передаются DE (разрешение передачи) и TE (включение терминального резистора). В микросборке LTM2882 реализован сдвоенный интерфейс RS-232, то есть по два канала в каждую сторону.

Уровни напряжения на всех входах обрабатывает внутренняя логика микросборки. При изменении уровня информация об этом событии кодируется, передается через гальванический барьер, декодируется на другой стороне микросборки, проверяется на наличие ошибок, и, если ошибок нет, уровень напряжения на соответствующем выходе изменяется. В каждый момент времени в одну сторону может передаваться информация лишь об одном изменении уровня на одном входе, поэтому все входы поделены на низко- и высокоприоритетные. Если изменение уровня входного сигнала происходит одновременно на двух входах с одной стороны микросборки, то с другой стороны уровень сначала изменяется на высокоприоритетном выходе и лишь после этого на низкоприоритетном. Если уровень сигнала на высокоприоритетном входе изменяется раньше, чем закончилась обработка изменения уровня на низкоприоритетном входе, кодирование и передача по низкоприоритетному каналу приостанавливается.

Таким образом, передача сигналов по высокоприоритетному каналу происходит без задержки. Задержка передачи по низкоприоритетному каналу может достигать 40 нс. В микросборке LTM2882 высокоприоритетными являются входы T1IN и R1IN, в микросборке LTM2881 — входы AB и YZ.

Передача питания

В отличие от передачи данных, передача питания в микросборках LTM288x происходит традиционным образом. Принципиальная схема изолированного DC/DC-преобразователя показана на рис. 2. Н-образный мост генерирует прямоугольные импульсы, которые через развязывающий защитный конденсатор поступают на первичную обмотку. Выпрямитель на вторичной обмотке выполнен из двух диодов и двух конденсаторов. Такая схема выпрямителя, по сравнению с более привычной схемой на четырех диодах, позволяет вдвое сократить потери, связанные с прямым падением напряжения на диодах. Ток выпрямителя заряжает сглаживающий конденсатор, от которого питается линейный стабилизатор с низким прямым падением. На выходе стабилизатора стоит еще один конденсатор.

Микросборки LTM288x выпускаются в двух версиях для двух диапазонов питающих напряжений: 3–3,6 и 4,5–5,5 В. Ограничение по напряжению питания связано со встроенным DC/DC-преобразователем. Поскольку выходное напряжение у обеих версий одинаковое и равно 5 В, для работы при разных входных напряжениях требуются разные коэффициенты трансформации.

Первичная обмотка трансформатора имеет защиту от перегрузки по току, при штатной работе преобразователя эта защита не активна. Порог срабатывания защиты — 550 мА для 3-В версии и 400 мА для 5-В версии микросборки.

Трансформатор выполнен на ферритовом тороидальном сердечнике. Обмотки покрыты тефлоновой изоляцией толщиной 76 мкм. Для придания конструкции механической прочности трансформатор залит жестким диэлектриком. Преобразователь имеет КПД 65%. А зависимость выходной мощности от напряжения питания показана на рис. 3.

Параметры гальванического барьера

Важнейший параметр гальванической развязки — это паразитическая емкость между изолированными сторонами. От величины этой емкости зависит, насколько хорошо гальваническая развязка препятствует прохождению синфазных помех. Когда напряжение между изолированными сторонами гальванической развязки меняется, ток заряда паразитической емкости протекает по электрическим цепям с обеих сторон гальванической развязки, вызывая падение напряжения на резисторах, которое и является помехой. Чем больше паразитическая емкость и скорость изменения напряжения, тем больше ток и напряжение помехи.

Для любой электрической схемы с гальванической развязкой можно определить максимально допустимую скорость изменения напряжения между изолированными частями, при которой уровень синфазной помехи не будет превышать допустимых пределов. Поскольку микросборки LTM288x содержат интегрированные схемы усиления и обработки прошедшего через гальванический барьер сигнала и представляют собой функционально законченные устройства, максимально допустимая скорость изменения напряжения является для них неизменным параметром и составляет 50 кВ/мкс.

Паразитическая емкость между гальванически развязанными сторонами микросбо-

Таблица 1. Параметрическая таблица гальванического барьера для LTM2881 и LTM2882

Параметр	Условия	min	Тип.	max
Номинальное напряжение диэлектрической изоляции, B_{RMS}	1 мин.	2500		
Максимальное рабочее номинальное напряжение	Продолжительное	400 B_{RMS} 560 $B_{пик.}$		
Частичный разряд, пКл	V_{pr} = 1050 $B_{пик.}$			5
Устойчивость к синфазным перепадам напряжения, кВ/мкс		30		
Сопротивление изоляции от входа к выходу, Ом	V_{IO} = 500 В	10^9	10^{11}	
Барьерная емкость от входа к выходу, пФ	f = 1 МГц		6	
Длина пути утечки по корпусу, мм	L/BGA		9,53	
Внешнее воздушное расстояние, мм	BGA		9,38	
Сравнительный показатель пробоя, В		175		
Максимально допустимое перенапряжение, $B_{п-п}$	t = 10 с			4000
Минимальное расстояние через изолятор, мм		0,06		
Изолирующий барьер ESD, HBM, кВ	(Vcc2, GND2) к GND		±10	
	Изолирующий I/O к GND		±8	

Таблица 2. Перечень стандартов по изоляции

Стандарт	Описание
UL1577	Тестирование изоляции по стандарту безопасности
IEC 60747-5-2 (VDE-0884-10)	Оптоэлектронные приборы. Предельные значения и основные характеристики
IEC 60664-1	Координация изоляции для оборудования низковольтных систем. Принципы, требования и испытания
IEC 60950-1	Оборудование информационных технологий. Требования безопасности
IEC 61010-1	Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования
IEC 60601-1	Требования безопасности к медицинским электрическим системам
IEC 61000-4-2	Устойчивость к электростатическим разрядам
IEC 61000-4-3	Испытания на устойчивость к излученному радиочастотному электромагнитному полю
IEC 61000-4-4	Испытания на устойчивость к электрическим быстрым переходным процессам/пачкам
IEC 61000-4-5	Испытание на невосприимчивость к выбросу напряжения
IEC 61000-4-8	Испытания на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты
IEC 61000-4-9	Испытание на помехоустойчивость к импульсному магнитному полю
CISPR 22	Оборудование информационных технологий. Характеристики радиопомех
IEC 60079-11	Взрывоопасные среды. Искробезопасная электрическая цепь «I»

рок LTM288x составляет 6 пФ. Из них 1,2 пФ приходятся на каждую из катушек передачи данных, а 3,6 пФ — на трансформатор DC/DC-преобразователя. Это очень хороший показатель для гальванической развязки: у обычных оптопар паразитическая емкость, как правило, составляет десятки пикофарад на один канал. Емкость порядка единиц пикофарад всегда существует между двумя параллельными дорожками на печатной плате, близко проложенными кабелями, проводниками внутри электронного устройства и его корпусом. Для большинства применений паразитическая емкость микросборок LTM288x пренебрежимо мала по сравнению с распределенными емкостями всех остальных частей электронного устройства.

Гальванический барьер микросборок LTM288x состоит из двух сигнальных трансформаторов, выполненных на полупроводниковом кристалле, и силового трансформатора, намотанного на ферритовое кольцо. Максимальное постоянное напряжение, которое может быть приложено к гальваническому барьеру продолжительное время — 400 В, для времени не более 10 с допускается напряжение до 4000 В.

Основные параметры гальванического барьера, в цифрах и единицах, приведенных к наиболее распространенным стандартам, указаны в таблице 1. Список стандартов, с которыми можно без труда сопоставить указанные значения, находится в таблице 2. Общие представления о том, как именно происходят испытания и стандартизация гальванических развязок, можно получить на примере стандартов UL1577 и IEC60747-5-2.

Стандарт UL1577 регламентирует электрическую прочность электронного компонента для напряжений свыше 2500 В при различных внешних условиях. В соответствии с критериями этого стандарта микросборки LTM288x выдерживают постоянное напряжение 2500 В при температуре окружающей среды +100 °С. Для того чтобы производитель мог гарантировать отсутствие отказов в таких условиях работы, каждая микросборка проходит испытание при напряжении 4400 В обеих полярностей продолжительностью 1 с.

Похожий по методике тестирования, принятый в Европе стандарт IEC60747-5-2 предписывает измерять заряд микропробоев, происходящих в гальваническом барьере, когда к нему приложено постоянное напряжение, соизмеримое по величине с максимальным рабочим напряжением. Явление микропробоев связано с неоднородностями в веществе диэлектрика. Если представить слой диэлектрика в виде цепочки последовательно соединенных конденсаторов и множества таких цепочек, соединенных параллельно, то микропробоем будет называться пробой одного из таких микроконденсаторов. Микропробой не вызывает нарушения электрической целостности слоя диэлектрика. Периодически происходящие микропробои внешне выглядят как шум, появляющийся, когда к гальваническому барьеру приложено высокое напряжение. Характерный заряд микропробоев в гальванических развязках LTM288x — 5 пКл при напряжении 1050 В.

С точки зрения практического применения основное условие, от которого зависит максимально допустимое рабочее напряжение, это время наработки на отказ. Поскольку при не самых тяжелых условиях эксплуатации время наработки на отказ оказывается очень

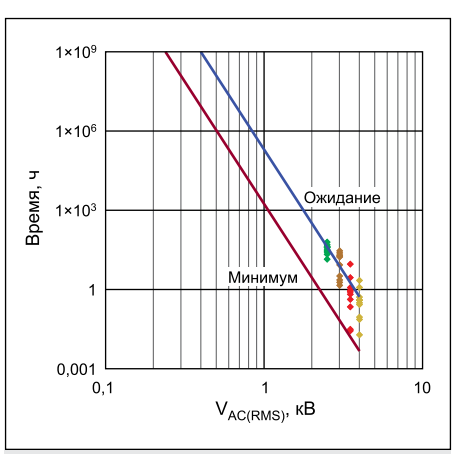

Рис. 4. Зависимость времени жизни микросборок LTM288x от постоянного рабочего напряжения

велико, оно не поддается прямому измерению. Время наработки на отказ измеряют в предельно допустимых режимах работы, затем полученные данные экстраполируют на штатные режимы работы. При этом используются различные математические инструменты, например распределение Вейбулла. Зависимость времени жизни микросборок LTM288x от постоянного рабочего напряжения показана на рис. 4. При напряжении 500 В время жизни микросборок LTM2881 LTM2882 — более 100 лет.

Излучение электромагнитных помех

Электронные устройства, в составе которых есть гальваническая развязка, выглядят с точки зрения их электромагнитного взаимодействия с окружающим миром весьма интересно. Наличие гальванической развязки в устройстве, как правило, означает наличие двух разделенных цепей «земли» и расположение всех проводников таким образом, что гальванически не связанные части устройства оказываются максимально удалены друг от друга. Такое устройство можно рассматривать как дипольную антенну. Внешние электромагнитные излучения приводят к появлению на гальванической развязке, соединяющей две части такой «антенны», синфазного быстро меняющегося напряжения. Микросборки LTM288x сами по себе не создают синфазного напряжения между гальванически развязанными сторонами, но если в электронном устройстве это напряжение появляется из-за каких-то других паразитических емкостей, «антенна» будет излучать электромагнитные помехи.

Эту проблему можно рассмотреть с другой точки зрения. Если через паразитическую емкость гальванической развязки протекает ток, то еще один ток, равный по величине, должен протекать в противоположном направлении. Очевидно, что возвратный ток протекает через другие паразитические емкости, образующиеся между двумя гальванически разделенными шинами «земли», между

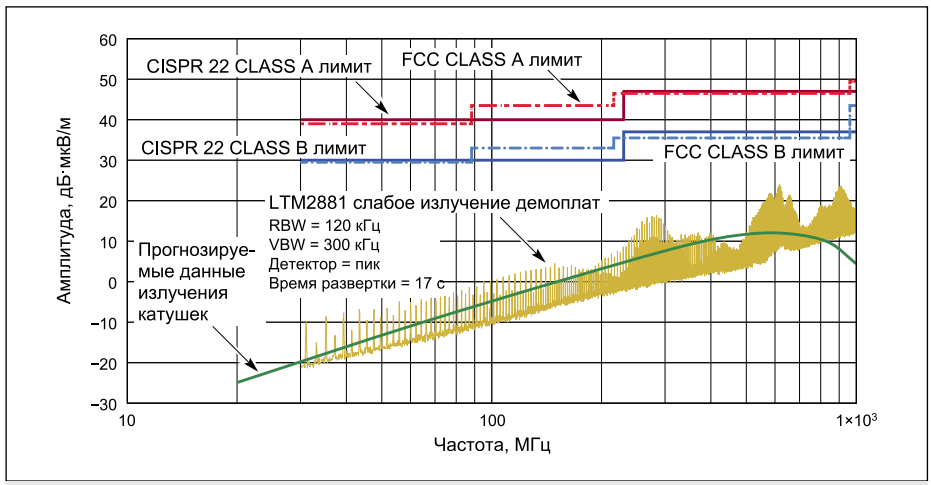

Рис. 5. Графики экспериментальной и теоретической зависимости излучаемой мощности от частоты для LTM288x

проводами и проводниками на печатной плате, между печатной платой и корпусом устройства. Самый простой способ сделать ситуацию с протекающими через паразитические емкости токами предсказуемой и избавиться от этих токов в тех местах схемы, где они мешают ее работе, это поставить между гальванически развязанными «землями» устройства конденсатор с емкостью, намного превышающей сумму всех паразитических емкостей. Такой конденсатор, если его емкость и место расположения выбраны верно, сокращает напряжение, приложенное к гальваническим развязкам на сигнальных линиях, на несколько порядков.

Электромагнитные катушки, которые используются в микросборках LTM288x для передачи данных, излучают электромагнитные помехи. Линейные размеры катушек и токи в них малы, и мощность излучения не превышает максимально допустимую согласно стандарту CISPR 22 (аналог — ГОСТ Р 51318.22-99 «Радиопомехи индустриальные от оборудования информационных технологий»). Излучаемую микросборками LTM288x мощность можно вычислить, исходя из того, что катушки для передачи данных являются петлевыми антеннами, и для них справедлива формула:

$$P_{RAD} = 160\pi^6 (I_f)^2 \sum_{n=1}^{N} \left(\frac{r_n}{\lambda}\right)^4, \qquad (1)$$

где I_f — ток в катушке; r_n — радиус одного витка; N — количество витков, λ — длина волны. Насколько хорошо теоретическая зависимость излучаемой мощности от частоты совпадает с экспериментальной, измеренной на демонстрационной плате LTM288x, показано на рис. 5. Там же отмечены максимально допустимые уровни излучения согласно стандарту CISPR 22.

Для сокращения уровня электромагнитных помех, излучаемых электронным устройством, в составе которого есть гальваническая развязка, есть ряд стандартных решений. Самое действенное из них — добавить в печатную плату слой сплошной металлизации, так, чтобы он покрывал всю площадь платы, образуя емкости между всеми гальванически развязанными частями. В дополнение к этому можно установить керамические конденсаторы между гальванически не связанными «землями», учитывая при этом, что конденсаторы будут эффективны на частоте ниже 300 МГц, а на более высокой частоте станет слишком существенна их паразитическая индуктивность. Подойдут конденсаторы с диэлектриком Y2, например Murata серии GF, для соответствия стандартам безопасности включенные последовательно по две штуки.

Помимо этого, рекомендуется:

- Сократить физические размеры гальванически развязанных частей.
- Убедиться в том, что все возвратные токи и токи помех образуют петли как можно меньшего размера. При разводке печатной платы следует избегать протекания одного возвратного тока между двумя слоями: такой путь будет иметь повышенную индуктивность и сопротивление.
- Поставить как можно больше сглаживающих конденсаторов на все линии питания. Все скачки напряжения и тока на силовых линиях внутри устройства вызывают электромагнитное излучение.
- Поставить фильтры синфазных помех на все подсоединенные к плате провода и кабели: синфазные трансформаторы либо ферритовые колечки для линий питания, ферритовые колечки для линий данных. Ферритовые колечки существуют как в виде специальных бандажей, одеваемых на кабель, так и в виде элементов для монтажа на плату.
- Сократить напряжение питания. Чем меньше напряжение сигналов в цифровых линиях, тем меньше излучаемая ими помеха. Напряжение 3,3 В предпочтительнее, чем 5 В.

Чувствительность к электромагнитным помехам

Все электромагнитные антенны обратимы: если антенна плохо излучает, то она одновременно плохо принимает сигнал, и наоборот. Поскольку интегрированные в микросборки LTM288x катушки излучают помехи с очень небольшой мощностью, они должны быть и малочувствительны к внешним помехам. Обе микросборки LTM2881 и LTM2882 независимо друг от друга прошли сертификацию и соответствуют стандартам электромагнитной совместимости, перечисленным в таблице 3.

Таблица 3. Стандарты электромагнитной совместимости

Тест	Частота	Интенсивность поля
IEC 61000-4-3, приложение D	От 80 МГц до 1 ГГц	10 В/м
	От 1,4 МГц до 2 ГГц	3 В/м
	2–2,4 ГГц	1 В/м
IEC 61000-4-8, уровень 4	50–60 Гц	30 А/м
IEC 61000-4-8, уровень 5	60 Гц	100 А/м
IEC 61000-4-9, уровень 5	Импульс	1000 А/м

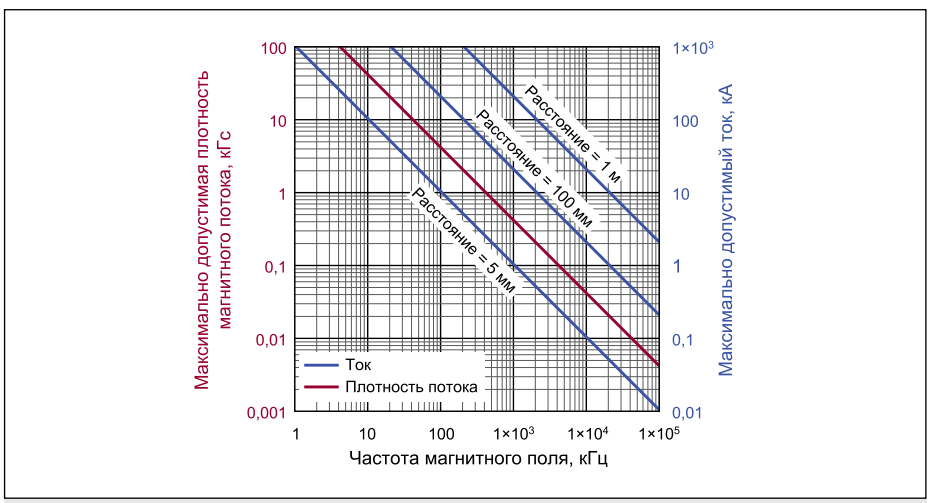

Рис. 6. Зависимость максимально допустимой индукции магнитного поля от частоты для микросборок LTM288x

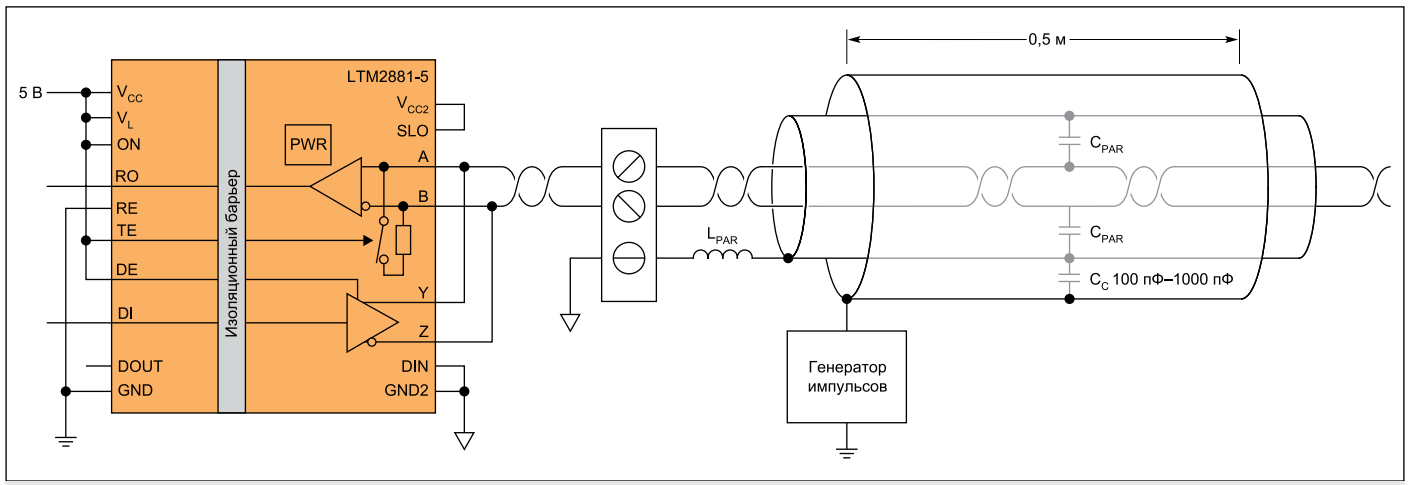

Рис. 7. Принципиальная схема для испытаний микросборки LTM2881 на устойчивость к скачкам напряжения, происходящим при разрыве проводника с током

Напряжение, возникающее в электромагнитной катушке при воздействии внешнего магнитного поля, определяется соотношением:

$$V = \left(-\frac{d\beta}{dt}\right)\sum_{n=1}^{N}(r_n)^2, \qquad (2)$$

где β — индукция магнитного поля, Гс; N — количество витков катушки; r_n — радиус n-ого витка. Эта формула справедлива и для катушек, интегрированных в микросборки LTM288x.

Если напряжение, вызванное внешней помехой, оказывается соизмеримо с напряжением полезного сигнала в катушке, передача данных происходит с ошибками. На рис. 6 показана зависимость максимально допустимой индукции магнитного поля от частоты для микросборок LTM288x. В области ниже красной линии внешнее магнитное поле не будет мешать работе LTM288x. Там же, для примера, синими линиями показана индукция магнитного поля прямого провода с током на различных расстояниях. Магнитное поле провода с синусоидальным током 1000 А при частоте 1 МГц, находящегося на расстоянии 100 мм, не окажет влияния на работу микросборок LTM288x.

Устойчивость к электростатическим разрядам

В системе стандартов IEC отдельно рассматривается несколько физических явлений и связанных с ними всплесков напряжения на электронном компоненте. Помимо электростатического разряда (Electro Static Discharge, ESD) электронные компоненты могут подвергаться скачкам напряжения, происходящим при разрыве проводника с током. Это явление носит название «быстрый переходный процесс» (Electrical Fast Transient, EFT), типичный пример условий его возникновения — разъединение электрического разъема.

Также в стандартах рассматривается воздействие на электронный компонент одиночной полуволны синусоидального напряжения. Последнее удобнее всего для использования в стандартах, так как условия проведения таких испытаний лучше всего поддаются описанию и воспроизводимы наиболее однозначно. Однако воздействие на электронный компонент синусоидальной полуволны не совсем соответствует тому, что происходит при его эксплуатации.

Принципиальная схема для испытаний микросборки LTM2881 на устойчивость к скачкам напряжения, происходящим при разрыве проводника с током, показана на рис. 7. Контакты LTM2881 подключены к жилам экранированного кабеля длиной 0,5 м, а экран кабеля соединен с генератором одиночных высоковольтных импульсов через конденсатор емкостью 100–1000 пФ. Экран кабеля через катушку индуктивности, моделирующую паразитическую индуктивность длинной линии, соединен с «землей» LTM2881 с той же стороны, что и жилы кабеля. «Земля» генератора соединена с «землей» LTM2881 с противоположной стороны. В этой схеме высокое напряжение прикладывается к гальваническому барьеру LTM2881, выводы LTM2881 с одной стороны барьера оказываются при одинаковом напряжении. В этом испытании LTM2881 выдерживает кратковременные скачки напряжения до 4 кВ.

Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам проводятся схожим образом: импульсы напряжения прикладываются между гальванически изолированными сторонами LTM2881. Импульсы имеют меньшую длительность, чем в испытаниях на устойчивость к скачкам напряжения, происходящим при разрыве проводника с током, и большую амплитуду. Микросборки LTM288x выдерживают электростатический разряд напряжением до 8 кВ.

Заключение

Гальванические развязки LTM288x — это первые приборы, сочетающие в себе высокие электрические параметры, надежность

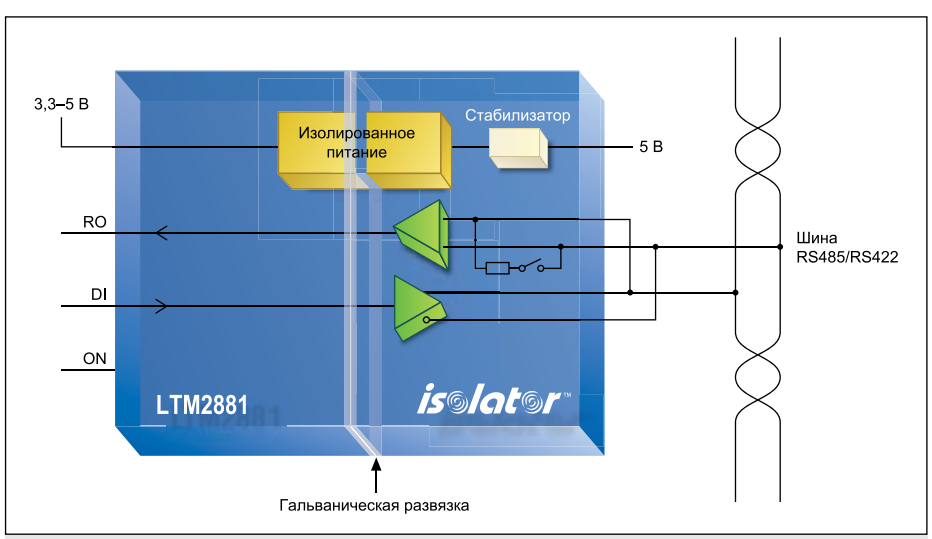

Рис. 8. LTM2881 гальванически развязанный приемопередатчик RS-485

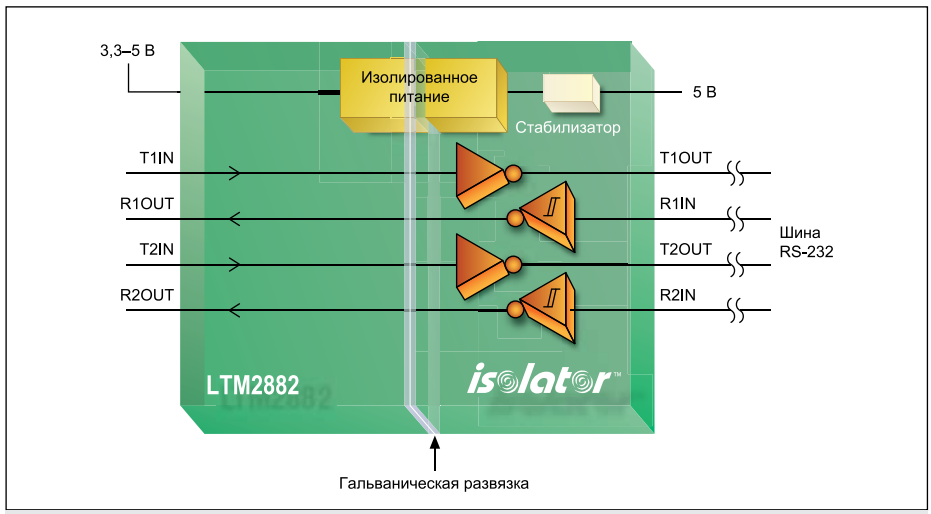

Рис. 9. LTM2882 сдвоенный гальванически развязанный приемопередатчик RS-232

и простоту использования. Насколько просто сделать на микросборке LTM2881 гальванически развязанный приемопередатчик RS-485, показано на рис. 8. Помимо самой микросборки LTM2881, в схеме нет никаких дополнительных элементов. Аналогично, микросборка LTM2882 (рис. 9) представляет собой функционально законченный двуканальный приемопередатчик RS-232.

Микросборки LTM288x имеют хорошую помехозащищенность, не требуют дополнительных внешних диодов для защиты от электростатических разрядов, вызванных зарядом, скопившимся на теле человека. Паразитическая емкость 6 пФ при четырех каналах передачи данных и канале питания делает микросборки LTM288x приборами, не имеющими аналогов.

Микросборки LTM288x прошли сертификацию по основным международным стандартам и готовы к использованию в новых и перспективных разработках.

Следует отметить, что микросхемы семейства LTM288x снижают общую стоимость решения, оставаясь при этом недосягаемыми для конкурентов по совокупности характеристик и преимуществ.