

К. т. н. А. Н. ТЫНЫНКА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: polalek562@gmail.com

КОНСТРУКТОРСКИЕ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ШУМОВ И ПОМЕХ В КАНАЛАХ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ

Рассмотрены методы и правила электронного конструирования радиоэлектронных средств, обеспечивающих высокую помехоустойчивость и электромагнитную совместимость в ближней зоне распространения электромагнитной энергии, а также причины возникновения помех из-за неудачных конструкторских решений при построении дискретно-аналоговых каналов преобразования информации. Даны практические рекомендации по выбору элементной базы, конструированию заземления и источников питания.

Ключевые слова: дискретно-аналоговый канал, электронное конструирование, помехи, ближняя зона распространения, помехоустойчивость, элементная база.

Технические характеристики любого радиоэлектронного средства (**РЭС**) определяют не только их пригодность к выполнению заданных функций, но и способность функционировать совместно с другими изделиями в некоторой системе. Качество радиоэлектронного средства оценивается по тому, насколько в совокупности удовлетворяются требования к функциональным характеристикам и электромагнитной совместимости.

Одним из главных аспектов, на который обращают внимание при обеспечении электромагнитной совместимости РЭС, являются возникающие непреднамеренно электромагнитные помехи. Меры по противодействию им включают выявление источников и нахождение энергетических, частотных и временных характеристик помех, изучение влияния среды на их распространение и влияния помех на работу различных приемников.

Основными причинами внутренних шумов и помех являются следующие: высокоскоростные переключения в каналах обработки сигналов (крутой фронт нарастания и спада импульсных сигналов); наведенные токи, обусловленные индуктивными и емкостными связями между проводниками; неэквипотенциальность точек заземления; включение и выключение различного рода активных и реактивных нагрузок в сети питания, быстрое изменение тока нагрузок, наличие нагрузок, способных возвращать в сеть запасенную энергию; наводки от внешних электромагнитных полей на внутренних проводниках; не лучший из имеющихся возможностей выбор электронных компонентов.

Интенсивность шумов и помех часто связана с качеством конструкторских решений при построении системы передачи данных в ближней зоне распространения электромагнитной энергии, где размеры излучателя помехи значительно меньше длины волны излучения и электромагнитное поле еще не оформилось в плоскую волну. Неудачные решения повышают средний уровень ошибок при приеме и обработке сообщений. В смешанных аналого-цифровых каналах, а каналы электросвязи и обработки данных обычно таковыми и являются, проблема достижения минимального уровня помех конструкторского происхождения значительно усугубляется.

Учебные пособия по конструированию радиоэлектронной аппаратуры и электронно-вычислительных средств (напр., [1, 2]) в разделах электромагнитной совместимости не охватывают все аспекты выбора рациональных в этом смысле конструкций, электрорадиоэлементов и материалов, а в многочисленных литературных источниках, посвященных помехозащищенности каналов связи (напр., [3, 4]), либо предлагаются и анализируются алгоритмы помехоустойчивого кодирования-декодирования, главным образом, с точки зрения безошибочности приема передаваемых данных и экономности кода, с чем связана скорость передачи информации, либо исследуется влияние помех на характеристики каналов [5], либо содержатся конструкторско-технологические указания общего характера [6]. Практическим вопросам конструирования быстройдействующей аппаратуры посвящены книги ряда авторов, например [7–12], но в них не

обсуждаются характеристики и возможности новой элементной базы.

Задача данной работы — проследить связь между отдельными конструкторскими решениями, выбором элементной базы и возникающими кондуктивными помехами и ошибками в электрически коротких каналах обработки сообщений в широком диапазоне частот: от 10 кГц до частот, для которых применима модель с сосредоточенными сопротивлением, емкостью и индуктивностью, чтобы таким образом направить внимание разработчиков на резервы улучшения технических характеристик каналов.

Заземление

Рекомендации в [13] заземлять все каскады конструктивно обособленного узла в одной точке оправдана для малоразмерных узлов аппаратуры. Их несоблюдение может привести к ситуации, когда в смешанных каналах цифровой ток возврата модулирует аналоговый ток, поскольку протекает по тому же проводнику с большим импедансом, что и аналоговый (рис. 1) [11]. Чтобы избежать ошибки, следует направить цифровой ток возврата к общей земляной точке по индивидуальной трассе (рис. 2).

В крупноразмерных узлах реализация таких рекомендаций затруднена из-за большой физической длины индивидуальных проводников, по которым течет ток возврата. На высоких частотах, эквивалентных частоте переключений логических сигналов, эти проводники могут иметь значительные сопротивление и индуктивность, а значит, излишне высокий частотозависимый им-

педанс, в то время как важнейшим условием обеспечения малых шумов, особенно в аналоговых схемах, является поддержание низкой величины импеданса земляных шин. К примеру, прямолинейный проводник печатной платы шириной 2 мм и толщиной 1 мм имеет погонную индуктивность $L = 5,6 \text{ нГн/см}$ [12]. Проходящий по такому проводнику ток, имеющий скорость нарастания при переключении логических схем 100 мА/нс , будет создавать импульс напряжения $u = L \cdot \Delta i / \Delta t = 560 \text{ мВ}$, приводящий к ошибке в аналоговой части и к заметному уменьшению помехоустойчивости в цифровой части канала. На сегодняшний день скорость нарастания тока, если ее специально не ограничивать, достигает 300 мА/нс [14] и сохраняет тенденцию к значительному росту. Поэтому в больших печатных узлах уменьшению помех будет способствовать применение земляной шины большой площади (с низким импедансом), на которую интегральные схемы заземляются по кратчайшему расстоянию. При этом нужно помнить, что чем дальше находится точка заземления от опорной, тем выше ее потенциал, и хотя простота реализации последовательной системы заземления привлекательна, нужно стараться избегать ее применения для цепей с большим разбросом потребляемой мощности. Это связано с тем, что мощные функциональные узлы создают большие возвратные токи заземления, которые могут влиять на малосигнальные функциональные узлы. При необходимости наиболее критичный функциональный узел следует подключать как можно ближе к точке опорного заземления.

В высокоскоростных устройствах следует также избегать использования для подключения интегральных схем панелек, удлиняющих путь до земляной шины. Кроме того, земляная шина большой площади обладает экранирующим свойством, вследствие чего уменьшается излучение радиочастотных помех вовне и влияние внешних помех на работу канала.

При подаче питания и сигналов на печатный узел рекомендуется обращать особое внимание на некоторые элементы и точки. Элементом, увеличивающим опасность паразитных связей, является разъем. Через него все сигнальные проводники проходят параллельно на небольшом расстоянии друг от друга, что благоприятствует образованию связей. Простой метод экранирования — разделить сигнальные контакты на разъеме контактами с потенциалом земли. Кроме того, несколько контактов, занятых под землю, уменьшают результирующее сопротивление подключения параллельно соединенных контактов к земляной шине, и контактное сопротивление остается низким даже по мере старения платы.

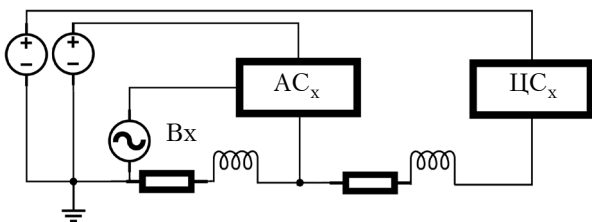


Рис. 1. Цифровой ток возврата создает напряжение ошибки в аналоговом тракте (AC_x — аналоговая схема; $ЦС_x$ — цифровая схема)

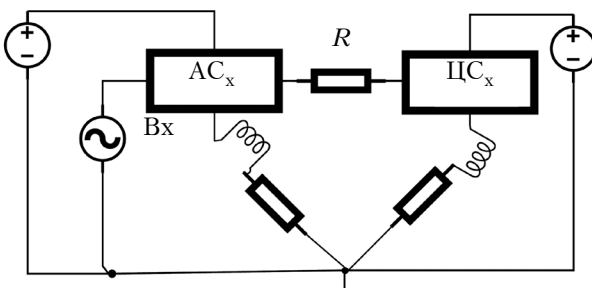


Рис. 2. Исключение модуляции аналогового тока цифровым в аналого-цифровых малоразмерных каскадах

Питание

С шумами было меньше проблем, когда прецизионные аналоговые схемы питались от малошумящих линейных источников. Сейчас стали популярными импульсные источники питания благодаря таким своим достоинствам, как высокий КПД, малые размеры, масса и рассеиваемая в виде теплоты мощность, но при этом для них характерен высокий выходной шум, охватывающий широкий диапазон частот. Помехи, связанные с переключением импульсного преобразователя на основной частоте, преобладают в суммарном спектре выходных шумов. Как правило, диапазон рабочих частот неизолированных DC/DC-преобразователей составляет примерно 0,5–3 МГц. Опасность представляют как наводимые, так и излучаемые помехи. Удачная топология печатных плат ослабляет излучения источника. С той же целью следует правильно выполнять заземление, использовать фильтрацию нежелательного излучаемого сигнала и уменьшать, насколько возможно, крутизну фронтов импульсов выбором менее быстродействующих микросхем либо включать в цепь сигнала резистор (R на рис. 2). Входная емкость типового КМОП-вентиля составляет несколько пикофарад. Вместе с ней включенный резистор образует фильтр и замедлит скорость переключения. Излучающие участки следует по возможности экранировать и отдалять от чувствительных приемников схемы. Приемник помех можно защитить от помехи фильтрацией на линиях питания и сигнала, контролем уровня импеданса, грамотным выбором типов конденсаторов и резисторов, использованием ферритов для фильтрации радиочастотных шумов.

Сравнение и выбор схем распределения электропитания производится по падению напряжения, нагрузочной способности по току, легкости монтажа, ремонтпригодности. С одной стороны, необходимо иметь в виду активные элементы, обеспечивающие обработку полезного сигнала. Аппаратура работает надежно в том случае, если падение напряжения на шинах питания не превышает критического уровня для выбранной серии микросхем. С другой стороны, нужно также думать о помехах. Чтобы минимизировать потери в цепях питания для обеспечения идентичных условий работы всех элементов, нагруженных на один источник питания, нужно задаться максимально допустимым уровнем помехи, возникающей при потреблении элементами энергии в статичном режиме. Тогда можно установить требования к допустимому сопротивлению шин питания, рассчитать максимально допустимое значение индуктивности отрезка

шины между активными элементами и на основе компоновочной схемы аппаратуры выбрать способ разводки и геометрию — длину, форму и площадь поперечного сечения шин.

Если разводка питания на печатной плате осуществляется последовательно, то в худшем с точки зрения помехозащищенности положении находится элемент схемы, наиболее удаленный от начала шины питания. Поэтому разводку следует проводить либо параллельно, либо в виде замкнутых контуров. Такая конструкция по своим электрическим параметрам приближается к сплошным плоскостям питания. Для защиты от влияния внешнего помехонесущего магнитного поля по периметру платы полезно предусмотреть замкнутый контур [12].

Если в устройстве аналоговая и цифровая земляные шины разделены, то АЦП, ЦАП и другие схемы со смешанными сигналами следует заземлять на аналоговую шину проводниками минимальной длины, чтобы исключить разность потенциалов между двумя земляными шинами, которая приводит к неприятным последствиям. Выводы цифрового и аналогового питания можно дополнительно изолировать друг от друга ферритовой бусиной, как показано на рис. 3.

В высококачественных импульсных схемах в качестве формирователей тактовых импульсов АЦП или ЦАП должны использоваться кварцевые генераторы с низким фазовым шумом, поскольку он приводит к модуляции аналогового входного и выходного сигналов, увеличивает общий шум и искажает форму сигнала. Генератор тактовых импульсов должен быть изолирован от помех цифровых схем и тоже развязан на аналоговую землю.

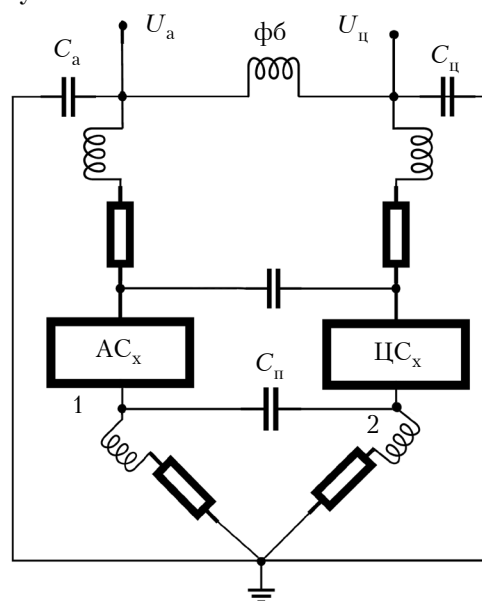


Рис. 3. Разделение цифрового и аналогового питания (фб — ферритовая бусина)

Для уменьшения помех в цепях питания традиционно применяют индивидуальные сглаживающие конденсаторы. Ими связывают между собой по высокой частоте шины питания и нулевого потенциала (C_a и C_{Π} на рис. 3), только подсоединять их следует как можно ближе к точкам подключения активных элементов (особенно C_{Π}), чтобы минимизировать паразитную индуктивность проводников. Конденсаторы тоже должны быть с низкой индуктивностью.

В связи с тем что конденсаторы заряжаются до уровня источника питания, создаются условия, при которых каждый подключенный к шинам элемент оказывается как бы нагружен на индивидуальный источник питания. Конденсаторы могут устанавливаться по одному на группу корпусов в пределах ячейки или даже непосредственно у каждого элемента. Емкость конденсатора выбирают исходя из условий равенства заряда, накапливаемого конденсатором за время переключения вентиля, заряду, переносимому выбросом тока за то же время [1]. Емкость C_{Π} обычно меньше 100 нФ. Напряжение на конденсаторе может колебаться в пределах, равных допустимой помехе в шинах питания.

На рис. 3 все индуктивности, конденсаторы и сопротивления паразитные, кроме C_a , C_{Π} и ферритовой бусины. Напряжение точки 2, возникшее из-за быстро изменяющихся цифровых токов, неизбежно будет передаваться через C_{Π} в точку 1 (аналоговую часть преобразователя). Приведенная на рис. 3 схема не является универсальной, но она показывает механизм влияния цифровой части преобразователя на аналоговую, понимание и учет которого необходимы для поиска лучшего решения проблем конкретных схем при проектировании.

Необходимо также правильно выбирать диоды выпрямителя, поскольку ток обратного восстановления полупроводникового диода приводит к дополнительным радиочастотным помехам. Обратное восстановление стандартных диодов является причиной появления в источниках питания гармоник промышленной частоты вплоть до 10 МГц, и даже выше. Чем резче восстановление, тем большие радиочастотные помехи возникают. Резкое восстановление диода возбуждает контур, состоящий из емкости $p-n$ -перехода и паразитных индуктивностей схемы. Для снижения влияния эффекта обратного восстановления в выпрямителях используют RC-демпферы. Здесь вместо стандартных диодов (производимых с использованием двойного диффузионного процесса) предпочтительнее применять эпитаксиальные, изготовленные по технологии FRED [15]. Такие диоды отличаются пониженным током и плавностью обратного восстановления,

низким прямым падением напряжения и низким током утечки, благодаря чему можно уменьшить динамические потери и электромагнитные наводки в мощных высокочастотных импульсных преобразователях и даже исключить потребность в демпферах, поскольку в этом случае энергия сигнала будет недостаточной для возбуждения резонансного контура.

Наиболее простой способ снижения напряжения шумов в стабилизаторах напряжения питания заключается в том, что на выходе устанавливается конденсатор, а в случае применения регулируемых стабилизаторов — еще и на выводе регулирования выходного напряжения. Установка дополнительного конденсатора на большинстве стабилизаторов напряжения может позволить снизить уровень шумов в очень широком диапазоне частот за исключением определенной узкой полосы вокруг резонансной частоты контура, образованного индуктивной составляющей выходного сопротивления стабилизатора и входной емкостью в цепи нагрузки. Частота, на которой может появиться такой пик, скорее всего, окажется в диапазоне 10–100 кГц. Амплитуда этого пика в спектре шумов будет изменяться в зависимости от добротности эквивалентного резонансного контура, на которую основное влияние оказывает эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС) выходного конденсатора.

Выходное полное сопротивление стабилизаторов может значительно изменяться в зависимости от силы тока нагрузки и установленного выходного напряжения, которые в свою очередь влияют на центральную частоту шумового пика. Увеличение тока нагрузки вызывает уменьшение выходной индуктивной составляющей, которое продолжается до тех пор, пока доминирующими составляющими выходного сопротивления не станут сопротивление ограничителя тока, сопротивление проводников, соединяющих кристалл транзистора с выводами, и сопротивление самих выводов.

В большинстве случаев наличие на выходе источника питания шумовой составляющей в несколько микровольт на указанных выше частотах не вызывает каких-либо проблем. Однако в тех случаях, когда схема разрабатываемого устройства особо чувствительна к уровню шумов в цепях питания на какой-то определенной частоте, разработчик может подобрать подходящий конденсатор для фильтрации выходного напряжения стабилизатора и спроектировать его выходную цепь так, чтобы пик в спектре шумов не попадал в интересующий диапазон. В малошумящих устройствах следует избегать применения конденсаторов с низким эквивалентным последовательным сопротивлением. Для эффективно-

го подавления шумов на выходе стабилизатора можно использовать электролитический конденсатор емкостью более 50 мкФ, а если стабилизатор регулируемый — еще один конденсатор емкостью хотя бы 1 мкФ на выводе «регулировка». Кроме того, поскольку изменение тока нагрузки или выходного напряжения могут изменить индуктивную составляющую выходного сопротивления и сдвинуть частоту пика шумов, работу схемы необходимо проверять во всем диапазоне эксплуатационных токов нагрузки и выходных напряжений.

Электронные компоненты

В число компонентов фильтров источников питания входят конденсаторы. Конденсатор характеризуется главным образом тем, что накапливает заряд под воздействием приложенного напряжения, а схема замещения реального конденсатора содержит сопротивление, емкость и индуктивность.

Чтобы сравнивать параметры конденсаторов, их можно условно разделить на три типа, существенно отличающиеся по конструкции и используемому диэлектрику: электролитические, пленочные и керамические.

Электролитические конденсаторы обладают большой емкостью, но также и большим ЭПС и низкой предельной рабочей частотой — например, у алюминиевых она ниже 100 кГц. В этом отношении танталовые конденсаторы несколько лучше: их импеданс с ростом частоты уменьшается вплоть до МГц-диапазона, что позволяет использовать эти конденсаторы в современных источниках питания на частотах в сотни кГц. Полярные электролитические конденсаторы «боятся» обратного напряжения. Относительно высокие токи утечки (до десятков мкА) связаны с конструктивными особенностями. Электролитические конденсаторы с такими параметрами хороши для низкочастотных фильтров, а для высоких частот лучше использовать керамические.

Первостепенное влияние на характеристики реального конденсатора, помимо емкости, оказывают его эквивалентная последовательная индуктивность (**ЭПИ**) и эквивалентное последовательное сопротивление. Какого бы типа ни был диэлектрик, основным элементом потенциальных потерь фильтра будет ЭПС, входящее в эквивалентную схему конденсатора как паразитное сопротивление. Оно разное для разных частот и зависит от температуры. ЭПИ также является источником высокочастотных потерь.

Пленочные конденсаторы характеризуются небольшой удельной емкостью, поэтому они не подходят для малогабаритной аппаратуры, а вы-

сокая добротность на практике может привести к появлению паразитных резонансов фильтра, т. е. источников дополнительных помех, и к его усложнению. Пленочные конденсаторы, имеющие форму цилиндра, обладают вполне конечной индуктивностью, ограничивающей их применимость в высокочастотных фильтрах. В таких случаях нужно использовать безындуктивные конденсаторы. К ним относятся пакетные пленочные конденсаторы, в которых обкладки не сворачиваются в цилиндр, а нарезаются в виде небольших листовых секций. Конденсаторы должны иметь короткие выводы, а еще лучше — быть безвыводными (для поверхностного монтажа).

Для частот выше нескольких МГц (вплоть до ГГц) больше всего подходят керамические конденсаторы благодаря их малым размерам, высокой диэлектрической проницаемости, низким потерям, малому температурному коэффициенту сопротивления. Самые высокочастотные — многослойные микрокерамические из-за своей сверхнизкой индуктивности. Верхняя пропускная частота фильтра ограничивается частотой собственного резонанса конденсатора, зависящей от паразитных параметров — она должна лежать выше полосы пропускаемых частот.

Множество включенных параллельно пластин (**рис. 4**) из хорошо проводящего материала обуславливают очень низкий ЭПС многослойных керамических конденсаторов, что наряду с широким набором значений емкости (вплоть до десятков мкФ) обеспечило их популярность. Однако существуют побочные эффекты, которые ограничивают применение таких конденсаторов. В керамических конденсаторах большой емкости используются диэлектрики X7R, X5R и Y5V, диэлектрическая проницаемость которых, а вместе с ней и емкость, сильно зависит от температуры и приложенного напряжения. При достаточно жестких требованиях к стабильности номинала, например, во времязадающих цепях, лучше подходит диэлектрик X7R как более стабильный или NPO (COG), у которого самая высокая температурная стабильность, а ем-

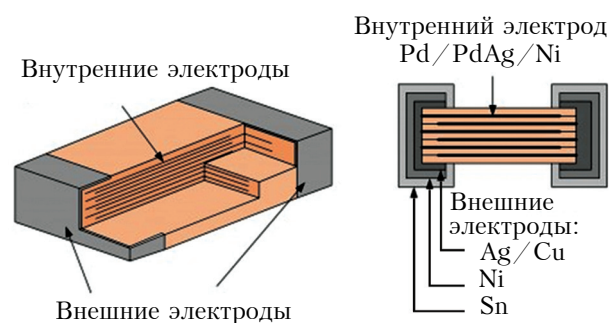


Рис. 4. Структура многослойного керамического конденсатора [16]

кость, хотя и небольшая, не зависит от частоты и приложенного напряжения. Для сглаживающего конденсатора стабильность номинала не является критичным параметром, поэтому можно использовать керамику Y5V, из которой получают детали меньших габаритов и более низкой стоимости с исключительно большими значениями емкости.

Когда влияние ЭПС мало, полное сопротивление на высоких частотах определяет ЭПИ. Поскольку индуктивность конденсатора зависит от размера пластин, контактные площадки конденсаторов для поверхностного монтажа стали выводить на длинные стороны корпуса. Небольшая величина эквивалентной последовательной индуктивности, которая для большинства корпусов под поверхностный монтаж колеблется в диапазоне от 500 пГн до 1 нГн, вместе с емкостью 10 мкФ приведет к возбуждению паразитного контура на частоте 5 МГц, которая может оказаться в полосе пропускания тракта обработки данных.

Важно, чтобы диэлектрик конденсатора не являлся пьезоэлектриком, не был подвержен микрофонному эффекту. Однако диэлектрик многослойных керамических конденсаторов чаще всего содержит титанат бария — классический материал для пьезодатчиков, поэтому при механических воздействиях появление паразитного сигнала в тракте гарантировано.

Еще одним следствием пьезоэлектрического эффекта является то, что конденсатор вибрирует от приложенного к нему переменного напряжения, что вызовет проблемы, если рабочая частота будет находиться в звуковом диапазоне.

Керамические проходные конденсаторы обеспечивают надежную защиту от внутренних помех, а благодаря своей компактности они удобны для использования в фильтрах электромагнитной совместимости. Основные свойства этих конденсаторов: низкие электрические потери; значительное подавление помех; работа на радиочастотах; компактность; широкий диапазон рабочих температур (от -40 до 125°C); низкая стоимость по сравнению со сложными помехоподавляющими фильтрами на основе фильтрующих цепей. В обычных керамических конденсаторах паразитные индуктивности соединены последовательно (рис. 5), а в проходных — параллельно (рис. 6), из-за чего суммарная паразитная индуктивность в четыре раза меньше, чем в обычных. Еще одно удобство для конструктора — возможность их использования на пересекающихся проводниках, если выходные контакты сформированы не только на торцах, но и на длинных сторонах корпуса (рис. 7).

Более выгодно и эффективно применять блоки проходных конденсаторов. Конечная величина эквивалентного последовательного сопротивления, присущая всем конденсаторам, относится к негативным паразитным параметрам. Полезно использовать параллельно соединенные конденсаторы: такое соединение уменьшает ЭПС и индуктивность конденсатора и увеличивает емкость. С другой стороны, это сопротивление может сыграть и положительную роль: будучи по сути демпфирующим элементом, ЭПС может помочь в подавлении резонансных пиков фильтров и заменить тем самым резистор, ко-

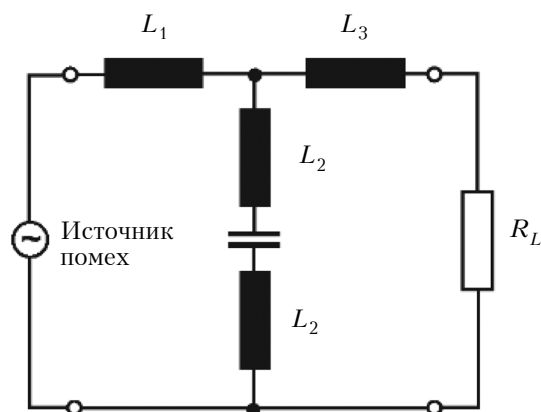


Рис. 5. Эквивалентная электрическая цепь стандартного керамического конденсатора (R_L — нагрузочное сопротивление)

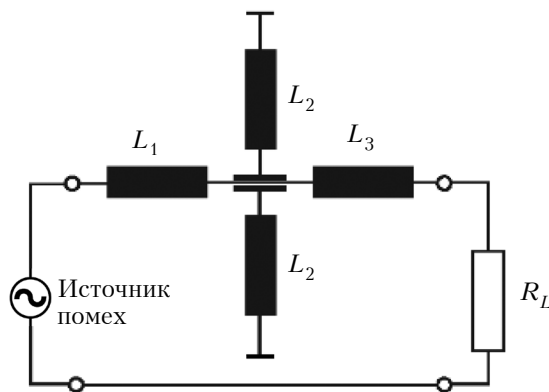


Рис. 6. Эквивалентная электрическая цепь проходного конденсатора.

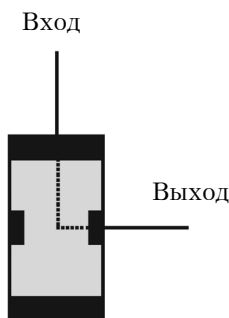


Рис. 7. Подключение проходного конденсатора к пересекающимся проводам

торый для этих целей иногда специально включают в схему последовательно с конденсатором.

У большинства электролитических конденсаторов наблюдается область низкодобротного последовательного резонанса длиной в несколько октав, не приносящего большого вреда. Таким образом, низкую добротность электролитических конденсаторов можно использовать для подавления резонансных пиков. Правда, такие конденсаторы, к сожалению, не применяются на высоких частотах, и здесь вместо электролитических лучше использовать многослойные керамические конденсаторы. Если на низких частотах их преимущества перед электролитическими заключаются, главным образом, в размерах и температурном диапазоне, то при приближении к 1 МГц они подавляют помехи в 10 раз сильнее танталовых и в 100 раз сильнее алюминиевых при одинаковой номинальной емкости. Несмотря на то, что многослойные керамические конденсаторы имеют меньшие размеры, они медленнее нагреваются, а также лучше выдерживают кратковременные скачки напряжения.

Следует отметить, что электролитические конденсаторы необходимо выбирать с большим запасом по напряжению, поскольку импульсные источники питания в момент включения и выключения могут генерировать импульсы амплитудой до нескольких значений выходного напряжения.

Резисторы устроены проще конденсаторов, но и их нельзя использовать только интуитивно. Собственный шум резистора — важная характеристика, представляющая собой помеху для полезного сигнала и накладывающая ограничения на чувствительность различных схем. Шумы представляют собой переменное напряжение, характеризующееся непрерывным широким спектром и одинаковой интенсивностью частотных составляющих.

Имеют место два вида шумов: тепловые и токовые. Тепловые шумы возникают во всех типах резисторов из-за изменения объемной концентрации электронов в проводнике за счет их теплового движения, и поэтому между любыми точками проводника возникает напряжение колебательного характера. Токовые шумы возникают в проводниках с зернистой структурой из-за изменения контактного сопротивления между зернами проводящего элемента (разрушение контакта, спекание частиц, электрохимические процессы, механические вибрации). Величина шума зависит от длины проводящего элемента, размера зерен и сопротивления: чем больше сопротивление, дисперснее структура и длиннее резистивный элемент, тем токовые шумы меньше.

Таким образом, на концах резистора проявляется переменная составляющая напряжения

различных частот. Действующее значение этой переменной составляющей напряжения E_m , отнесенное к постоянному напряжению U_r , приложенному к резистору, называется уровнем собственных шумов: $N = E_m/U_r$ [мкВ/В], который в значительной степени зависит от качества контакта между резистивным элементом и выводами.

Выбрать подходящий резистор разработчику аппаратуры легче, чем конденсатор, поскольку большинство типов имеют или включают варианты с низким уровнем собственных шумов. Почти все показатели высоки у металлопленочных резисторов, в которых в качестве резистивного элемента используется тонкая пленка специального сплава или металла, нанесенная на изоляционное основание методом вакуумного испарения или катодного напыления.

К пленочным можно отнести углеродистые и бороуглеродистые резисторы, поскольку их проводящий элемент представляет собой пленку пиролизического углерода, полученную путем разложения углеводородов в вакууме или среде инертного газа при высокой температуре (940—1000°C). Им присущ низкий уровень токовых шумов.

Незначителен собственный шум и у проволочных сопротивлений, но велика собственная емкость, а индуктивность нужно анализировать. Отношение величины индуктивности к сопротивлению пропорционально диаметру провода, поэтому их соотношение будет возрастать при использовании более толстого провода. Из-за этого индуктивность резисторов, в которых использован низкоомный провод, высока, а у резисторов со сколько-нибудь значительным сопротивлением (больше 10 кОм) индуктивность пренебрежимо мала.

Металлофольговые резисторы, в которых резистивный элемент выполняется из фольги (манганин, константан, никель с молибденом и чистый никель) толщиной 0,002—0,1 мм, прикрепленной к изоляционной подложке плоской или цилиндрической формы, обладают достоинствами проволочных (низкий уровень шумов, высокая точность (до $\pm 0,001\%$) и стабильность) и пленочных (технологичность, широкий частотный диапазон и диапазон номинальных значений — до десятков МОм) резисторов. Однако следует иметь в виду их высокую тензочувствительность, благодаря которой появилась еще одна область применения металлофольговых резисторов — в качестве тензодатчиков. Выпускаются тензорезисторы прямоугольного и розеточного типа, предназначаются они для измерения деформации деталей машин, металлоконструкций и т. д. при статических на-

грузках, а также в качестве чувствительных элементов силоизмерительных датчиков в условиях макроклиматических районов с умеренным и холодным климатом.

Для рассматриваемых целей следует исключить использование таких элементов, как композиционные резисторы и объемного, и пленочного типов, проводящий слой которых состоит из смеси проводящего элемента, например графита или сажи, с органическими или неорганическими связующими (фенольные и эфирные смолы) и наполнителем, пластификатором, отвердителем. Композиционные резисторы обладают немалыми достоинствами, однако использовать их в высокочастотной и точной аппаратуре не позволяет высокий уровень шумов, а также зависимость некоторых параметров от частоты, что является следствием зернистой структуры композиционных материалов.

Несколько особняком стоят толстопленочные резистивные структуры. Толстопленочная технология, используемая в течение десятилетий как в коммерческих, так и в специализированных изделиях электроники, снова вызывает повышенный интерес. Это можно объяснить увеличением использования керамических микроэлектромеханических систем (**C-MEMS**) и потребностью отрасли связи в электронных схемах с большими функциональными возможностями без увеличения массы, повышенной надежностью и соблюдением экологических требований. C-MEMS, собранные по толстопленочной технологии, содержат одновременно датчик, исполнительные элементы и электронные схемы для обработки сигналов. Кроме того, толстая пленка, основной структурный элемент толстопленочной технологии, используется и как чувствительный, и как резистивный элемент.

Это новое применение толстопленочных резистивных материалов приводит к уменьшению размеров резисторов, более высоким допускам и дополнительному использованию скрытых возможностей. С другой стороны, расширение использования толстопленочных устройств в системах связи требует лучшего знания источников шума в резистивных пленках и связанных с ними эффектов паразитной модуляции в этих устройствах. Измерения низкочастотных шумов могут быть использованы для оценки этих сложных структур.

Низкочастотный шум в толстопленочных резисторах зависит от их микроструктуры, потому его можно использовать для отслеживания структурных изменений, вызванных различными видами и величиной напряжений, влияющими на надежность пленки. Связь между низкочастотным шумом и структурой толстых резистивных пленок в основном исследовалась экспериментально [17]. Теоретический анализ проводился на основе модели низкочастотного шума

в толстопленочных структурах, предполагающей тесную взаимосвязь механизмов шума и проводимости. Такой анализ не позволяет сформулировать однозначные рекомендации из-за довольно сложной микроструктуры толстой пленки. Больше всего усложняет проблему разнообразие параметров, которые должны быть приняты во внимание, особенно в условиях одновременной механической и высоковольтной импульсной электрической нагрузки на резистивную пленку. Механическая деформация приводит к обратимому изменению сопротивления из-за того, что изменяются условия переноса заряда. Это влияет как на металлическую проводимость, так и на туннелирование через энергетические барьеры из-за изменения ширины барьера. Приложение электрического напряжения приводит к устойчивому изменению высоты барьера и сопротивления. Наличие различных видов напряжения в резистивных пленках (механических, электрических и совместных) и изменение их интенсивности влияют на параметры низкочастотного шума и могут привести к изменению структуры пленки вплоть до ее разрушения.

Заключение

Аспектам обеспечения электромагнитной совместимости в практике проектирования РЭС уделяется недостаточного внимания, что обусловлено как формальными причинами (отсутствие требований в техническом задании), так и по неясности причин возникновения электромагнитных помех и степени их влияния на функционирование РЭС. В любом случае это снижает качество РЭС, поскольку создаваемая продукция должна соответствовать определенному классу по помехоустойчивости и не являться источником радиопомех.

Проведенный анализ специальных характеристик элементной базы, а также опыт построения источников питания и заземления должны помочь разработчикам РЭС добиться уменьшения шумов в формируемых каналах высокоскоростной обработки данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Чернышев А. А. Основы конструирования и надежности электронных вычислительных средств. Учеб. для вузов. — Москва: Радио и связь, 1998.
2. Пудовкин А. П., Панасюк Ю. Н., Чернышова Т. И. Электромагнитная совместимость и помехозащищенность РЭС: Учебное пособие. — Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013.
3. Зяблов В. В., Коробков Д. Л., Портной С. Л. Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах. — Москва: Радио и связь, 1991.
4. Kumar A. A., Makur A. Improved coding-theoretic and subspace-based decoding algorithms for a wider class of DCT and DST codes // IEEE Transactions on Signal Processing. — 2010. — Vol. 58, iss. 2. — P. 695–708.
5. Сандульский А. А., Маковеев Д. О. Оценка пропускной способности одночастотной синхронной сети цифрового вещания в условиях собственных помех // Цифровые технологии. — 2016. — № 9. — С. 103–110.
6. Ромашенко М. А. Конструкторско-технологические аспекты обеспечения ЭМС при разработке РЭС // Вестник

Воронежского государственного технического университета. — 2010. — С. 149–152.

7. Хабигов Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. — Москва: Энергоатомиздат, 1995.

8. Шваб А. И. Электромагнитная совместимость. — Москва: Энергоатомиздат, 1998.

9. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. — Москва: Издательский Дом «Технологии», 2003.

10. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами. — Москва: Мир, 1990.

11. Ott H. Noise reduction techniques in electronics systems. — New York: John Wiley & Sons, 1988.

12. Кечиев Л. Н. Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. — Москва: Грифон, 2016.

13. Kester W., Bryant J. Grounding in high speed systems, high speed design techniques // Analog Devices. — 1996. — Chapter 7. — P. 7–27.

14. Cain J. Parasitic inductance of multilayer ceramic capacitors // AVX Corporation. — Technical Information. — S-PIMCC2.5M697-N. — 2002.

15. Burkel R., Schneider T. Fast recovery epitaxial diodes (FRED) characteristics-applications-examples // Application Notes and Technical Information. — 1999.

16. Гавриков В. Многослойные, керамические: MLCC-конденсаторы // Новости электроники. — 2017. — №11.

17. Stanimirovic' Iv. Thick-film resistor failure analysis based on low-frequency noise measurements. // Chapter 5 in book «Failure analysis and prevention» / Ed. by Aidy Ali. — 2017. <https://www.intechopen.com/books>.

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.03 2019 г.

О. М. ТИНИНИКА

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: polalek562@gmail.com

КОНСТРУКТОРСЬКІ МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ШУМІВ І ЗАВАД У КАНАЛАХ ІЗ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНІЙ ОБРОБЦІ ДАНИХ

Стаття присвячена аналізу методів і правил електронного конструювання радіоелектронних засобів, які забезпечують високу завадостійкість і електромагнітну сумісність. Розглянуто причини виникнення завад через невдалі конструкторські рішення при побудові дискретно-аналогових каналів перетворення інформації. Надано практичні рекомендації щодо вибору елементної бази, конструювання заземлення та джерел живлення. Актуальність цих завдань обумовлена вимогами до підвищення швидкодії напівпровідникових приладів і електронних схем в цілому та зменшення амплітуди робочих сигналів цифрових пристроїв, а також проблемами зростання впливу між'єднань і компонування вузлів на стійкість і швидкодію електронних пристроїв і систем, питаннями зниження трудомісткості та матеріальних і часових витрат на пошук і усунення причин низької завадостійкості електронних пристроїв.

Зі зростанням швидкодії і щільності компонування елементів забезпечення завадостійкості та електромагнітної сумісності між різними пристроями і системами стає найважливішим завданням конструювання радіоелектронних систем в цілому. Під час конструкторської реалізації будь-якої електронної схеми неминує враховуватися додаткові паразитні параметри резистивного, індуктивного і ємнісного характеру, які можуть погіршити швидкодію і завадостійкість реальної конструкції в неприпустимих межах чи навіть привести до повної втрати робоспроможності. Особливо сильно впливає конструкція та монтаж на роботу надшвидкісних (високошвидкісних) схем і пристроїв — тут забезпечення системної швидкодії, завадостійкості та електромагнітної сумісності стають основними критеріями якості електронної конструкції.

Проведений аналіз спеціальних характеристик елементної бази, а також досвіду побудови джерел живлення і заземлення має допомогти розробникам радіоелектронних засобів добитися зменшення шумів в формованих каналах високошвидкісної обробки даних.

Ключові слова: дискретно-аналоговий канал, електронне конструювання, завади, завадостійкість, вибір елементної бази.

DOI: 10.15222/TKEA2019.1-2.10

UDC 621396:004.3

A. N. TYNANYUKA

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: polalek562@gmail.com

DESIGN METHODS FOR REDUCING NOISE AND INTERFERENCES IN CHANNELS WITH LUMPED PARAMETERS IN HIGH-SPEED DATA PROCESSING

The article is devoted to the methods and rules of electronic design of radio electronic devices, which provide high stability and electromagnetic compatibility. The author considers how interferences may be caused by the unsuccessful design decisions when constructing discrete-analog channels of information conversion. The

paper gives practical recommendations for choosing appropriate element base, grounding and power sources. The urgency of these tasks is caused by the requirements for increasing the speed of semiconductor devices and electronic circuits in general and reducing the amplitude of the working signals of digital devices, as well as by the problems of increasing the impact of interconnections and the assembly of nodes on the stability and speed of electronic devices and systems, by the problems of reducing the production complexity, material and time consumption, and of finding and eliminating the causes of low noise immunity of electronic devices.

With the growth of the speed and layout density of the elements, ensuring the immunity of the electromagnetic interaction between different devices and systems becomes the most important task in construing the radio electronic systems in general. When designing any electronic circuit, one should inevitably allow for additional parasitic parameters of resistive, inductive and capacitive nature, which may unacceptably impair the performance and noise immunity of the actual design, or even lead to complete loss of functionality. Design and installation have a particular effect on the work of super-high-speed (high frequency) circuits and devices – here the provision of system speed, noise immunity and electromagnetic compatibility become the main criteria for the quality of electronic design.

The analysis of the special characteristics of the element base and of the experience of designing power sources and grounding, should help the developers of the electronic devices to reduce the noise in the shaped channels of high-speed data processing.

Keywords: discrete-analogue channel, electronic design, interference, noise immunity, choice of element base.

REFERENCES

1. Chernyshev A. A. *Osnovy konstruirovaniya i nadezhnosti elektronnykh vychislitelnykh sredstv. Ucheb. dlya vuzov* [Chernyshev A. A. Fundamentals of design and reliability of electronic computing facilities. Textbook for universities]. Moscow, Radio i svjaz, 1998, 448 p. (Rus)
2. Pudovkin A.P., Panasjuk Ju. N., Chernyshova T. I. *Elektromagnitnaja sovmestimost i pomehozashishennost RES. Uchebnoje posobie* [Electromagnetic compatibility and noise immunity of RED]. Tambov, FGBOU VPO "TG TU", 2013, 494 p. (Rus)
3. Zjablov V. V., Korobkov D. L., Portnoi S. L. *Vysokoskorostnaja peredacha soobshenii v realnykh kanalakh* [High-speed messaging in real channels]. Moscow, Radio i svjaz, 1991, 228 p. (Rus)
4. Kumar A.A., Makur A. Improved coding-theoretic and subspace-based decoding algorithms for a wider class of DCT and DST codes. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, vol. 58, iss. 2, pp. 695-708.
5. Sandulskii A. A., Makoveenko D. O. [Evaluation of the bandwidth of a single-frequency synchronous network of digital broadcasting in terms of its own interference]. *Tsifrovye tehnologii*, 2016, no. 9, pp. 103-110. (Rus)
6. Romaschenko M. A. [Design and technological aspects of providing EMC in the development of RED]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo mehnicheskogo universiteta*, 2010, pp. 149-152. (Rus)
7. Habiger E. *Elektromagnitnaja sovmestimost. Osnovy ee obespechenija v mehnike* [Electromagnetic compatibility. The basics of its provision in technology]. Moscow, Energoatomizdat, 1995, 304 p. (Rus)
8. Shvab A. J. *Elektromagnitnaja sovmestimost* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, Energoatomizdat, 1998, 468 p. (Rus)
9. Williams T. *EMS dlja razrabotchikov produktcii* [EMC for product developers]. Moscow, Izdatelskii Dom "Tehnologii", 2003, 504 p. (Rus)
10. Barnes J. *Elektronnoe konstruirivanie: Metody borby s pomехami* [Electronic Design: Methods of dealing with interference]. Moscow, Mir, 1990, 238 p. (Rus)
11. Ott H. *Noise Reduction Techniques in Electronics Systems*. New York, John Wiley & Sons, 1988.
12. Kechiev L. N. *Proektirovanie sistemy raspredelenija pitaniya pechatnykh uzlov elektronnoi apparatury* [Designing the power distribution system of printed-circuit assemblies of electronic equipment]. Moscow, Grifon, 2016, 400 p. (Rus)
13. Kester W., Bryant J. Grounding in High Speed Systems, High Speed Design Techniques. *Analog Devices*, 1996, Chapter 7, pp. 7-27.
14. Cain J. Parasitic inductance of multilayer ceramic capacitors. *AVX Corporation. Technical Information*. – S-PIMCC2.5M697-N. 2002. [http://www.avx.com/docs/techinfo/ceramic capacitors parasitic/pdf](http://www.avx.com/docs/techinfo/ceramic%20capacitors%20parasitic/pdf)
15. Burkel R., Schneider T. Fast Recovery Epitaxial Diodes (FRED) Characteristics-Applications-Examples. *Application Notes and Technical Information*, 1999.
16. Gavrikov V. [Multilayer, ceramic: MLCC-capacitors]. *Novosti Elektroniki*, 2017, no.11. (Rus)
17. Stanimirovic' Iv. Thick-film resistor failure analysis based on low-frequency noise measurements. *Chapter 5 in book «Failure analysis and prevention»*. Ed. by Aidy Ali. 2017. <https://www.intechopen.com/books>.

Описание статьи для цитирования:

Тыныныка А. Н. Конструкторские методы уменьшения шумов и помех в каналах с сосредоточенными параметрами при высокоскоростной обработке данных. А. Н. Тыныныка *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 1-2, с. 10–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.10>

Cite the article as:

Tynnyka A. N. Design methods for reducing noise and interferences in channels with lumped parameters in high-speed data processing. A. N. Tynnyka *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 1-2, pp. 10-19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.10>