

УДК 681.3 : 621.3.013

И.В. Прасол, А.В. Кобылинский

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

УЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ СХЕМ БИМЕДИЦИНСКИХ УСТРОЙСТВ

Рассматриваются задачи оптимального проектирования аналого-цифровых схем. Статья посвящена решению частной задачи – обеспечению электромагнитной совместимости разрабатываемых устройств. Предложена методика повышения ЭМС аналого-цифровых схем, основанная на учете рекомендаций по электромагнитной совместимости и осуществлении анализа межсоединений печатных плат.

схема аналого-цифровая, совместимость электромагнитная, проектирование оптимальное, помехи электромагнитные

Введение

Для большинства современных биомедицинских устройств характерно наличие разнородных частей: аналоговых датчиков, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, различных блоков цифровой обработки сигналов и пр. Для решения задач оптимального проектирования таких устройств в [1, 2] предложена методика, учитывающая взаимное влияние между различными частями (аналоговыми и цифровыми) проектируемых схем. Одним из основных этапов данной методики является оптимизация разрабатываемой аналого-цифровой схемы в целом.

На данном этапе предлагается осуществлять оценку и оптимизацию электромагнитной совместимости (ЭМС) проектируемой схемы.

Высокий уровень электромагнитных излучений в электронных системах приводит к росту помех и к тому, что изделие может не удовлетворить требованиям стандартов по ЭМС. Особенно это относится к устройствам биомедицинского назначения, так как для многих из них характерно наличие силовых выходных цепей, которые могут вносить помехи в работу слаботочных входных цепей и различных цифровых блоков. Этим обусловлена актуальность исследований в данной области.

Таким образом, целью данной работы является разработка методики проектирования аналого-цифровых схем биомедицинских устройств с учетом электромагнитной совместимости.

1. О проблеме электромагнитной совместимости электронных средств

Электромагнитная совместимость – способность в процессе функционирования не вносить чрезмерно большой вклад в окружающую обстановку электромагнитным излучением. Когда это условие выполняется, все электронные составляющие совместно работают корректно.

Разводка проводников на печатных платах (ПП) в значительной степени влияет на электромагнитную совместимость (ЭМС) схем, как в отношении электромагнитного излучения, так и восприимчивости к электромагнитным полям. Кроме этого на ЭМС также будут влиять внешние кабели, которые подключают ПП к другим частям разрабатываемого устройства, таким как другие ПП, источники сигналов, источники питания постоянного или переменного токов и пр.

Трассировка проводников, размещение компонентов, развязка, используемая в определенных интегральных схем (ИС), должны быть оптимизированы в целях получения правильно функционирующей ПП. Чтобы достичь экономически выгодного и функционально работоспособного варианта ПП необходимо обратить внимание на следующее:

- правильный выбор формата ПП (одно-, двух-, многослойная);
- позаботиться, чтобы каждый сигнальный проводник имел вблизи проводник для возврата сигнала;
- правильная развязка для каждой ИС или группы ИС;
- допустимые длины проводника и петли;
- размещение разъемов;
- правильный выбор кабелей и разъемов;
- корректное размещение фильтров и фильтрующих частей.

Кроме того, значительное влияние на ЭМС оказывает структура межсоединений проектируемой схемы. При этом необходимо учитывать такие источники помех [3]:

- задержки сигналов при распространении по межсоединениям, искажения формы этих сигналов;
- перекрестные помехи между сигнальными соединениями;
- отражения сигналов в межсоединениях от несогласованных нагрузок и неоднородностей;
- помехи по цепям питания и заземления.

В данной работе предлагается методика обеспечения электромагнитной совместимости проектируемых аналого-цифровых схем, которая предусматривает два этапа. Изначально, проектирование данных устройств осуществляется с учетом имеющихся рекомендаций (рассмотрены ниже). Далее осуществляется оценка полученного решения, для чего предложено осуществлять анализ межсоединений разработанной схемы.

2. Рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости проектируемых схем

В настоящее время существует множество рекомендаций для обеспечения ЭМС разрабатываемых схем. Как правило, выполнить все их не представляется возможным. Во многих случаях дизайнеры печатных плат преднамеренно нарушают какое-либо из правил в попытках выполнить более важные.

Формат ПП необходимо выбирать исходя из стандартных или функциональных требований ЭМС для проектируемого устройства, плотности проводников, ограничений на производство и сборку, ограничений на систему конструкторского проектирования, стоимость электромагнитных экранов. Для разработки аналого-цифровых схем устройств биомедицинского назначения рекомендуется использовать многослойные ПП (рис. 1). Это позволит использовать один из слоев для подвода напряжения питания. Также в данном случае возможно иметь отдельную экранирующую проводящую поверхность. Кроме того, при достаточно большом числе слоев система опорного потенциала и обратный провод могут выполняться как отдельные слои. К тому же, для смешанных схем системы опорных потенциалов аналоговой и цифровой частей должны выполняться в виде отдельных слоев.

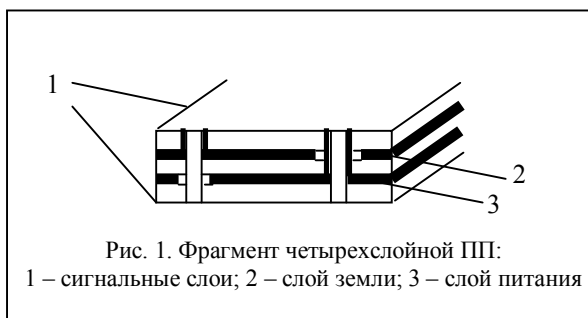


Рис. 1. Фрагмент четырехслойной ПП: 1 – сигнальные слои; 2 – слой земли; 3 – слой питания

Любой проводник, обеспечивающий передачу сигнала, требует наличия возвратного пути настолько близко, насколько это возможно, чтобы избежать излучения петель, образуемой этими проводниками и уменьшить наводимое напряжение, которое может быть индуцировано в эту петлю. В общем случае, когда расстояние между двумя проводниками равно ширине проводников, коэффициент связи между ними находится в пределах 0,5 – 0,6, т.е. 40 – 50%

возвратного сигнального тока может свободно уйти на другие проводники ПП. Поэтому, необходимо использовать минимально узкие проводники, расположенные как можно ближе друг к другу, а также создавать ПП, в которых каждый сигнальный проводник имеет возвратный путь на минимально возможном расстоянии (применимо как к сигнальным шинам, так и к шинам питания) (рис. 2).

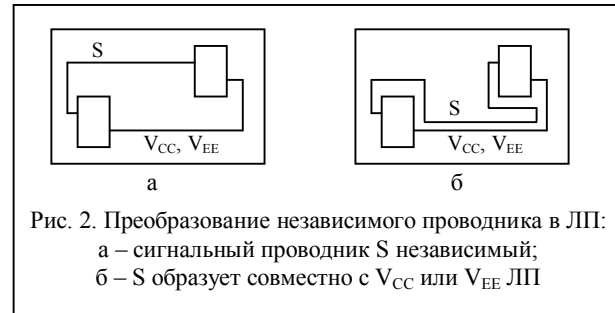


Рис. 2. Преобразование независимого проводника в ЛПП: а – сигнальный проводник S независимый; б – S образует совместно с V_{CC} или V_{EE} ЛПП

В случае же многослойных ПП несколько слоев могут использоваться в качестве системы опорного потенциала, которая в свою очередь служит на плате общим обратным проводом для различных контуров тока (рис. 3). По данным специалистов фирмы Philips в табл. 1 приведены коэффициенты связи для различных линий передач (ЛПП).



Рис. 3. Реализация возвратного проводника в виде отдельного слоя ПП: 1 – сигнальный слой; 2 – слой опорного потенциала

Таблица 1
Коэффициент связи между проводниками линии передач

Тип ЛПП	Коэффициент связи
Параллельные проводники	0,5 – 0,7
Двухслойная ПП	0,6 – 0,9
Многослойная ПП	0,9 – 0,97
Коаксиальный кабель	0,9 – 1
RG-58	0,996

Чтобы улучшить защиту от наводок и уменьшить нежелательное излучение использование ЛПП необходимо как в быстрых аналоговых, так и во всех цифровых цепях.

При проектировании аналого-цифровых схем не рекомендуется допускать перекрытий аналоговых и цифровых полигонов (рис. 4). Если в каком-либо месте существует их перекрытие, то распреде-

ленная емкость между перекрывающимися участками будет создавать связь по переменному току, и наводки от работы цифровых компонентов попадут в аналоговую схему.

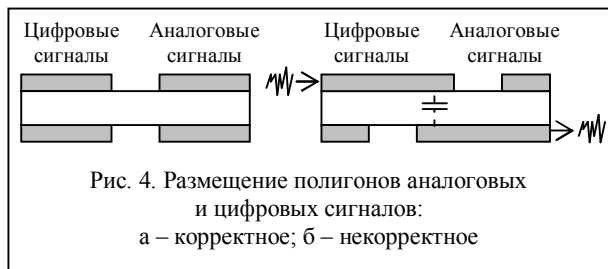


Рис. 4. Размещение полигонов аналоговых и цифровых сигналов: а – корректное; б – некорректное

Учитывая вышеизложенное, на рис. 5 показан возможный вариант размещения всех компонентов на плате, включая источник питания. Здесь используются три отделенных друг от друга и изолированных полигона земли/питания: один для источника, один для цифровой схемы и один для аналоговой.

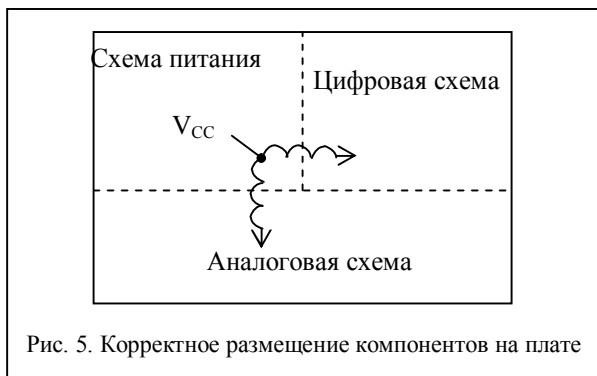


Рис. 5. Корректное размещение компонентов на плате

Имеется лишь один случай, когда необходимо объединение аналоговых и цифровых сигналов над областью полигона аналоговой земли. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи размещаются в корпусах с выводами аналоговой и цифровой земли. В схеме эти выводы должны быть подключены к шине аналоговой земли [4].

Если два или более сигнальных проводника проводятся параллельно и близко друг к другу на протяженных участках, то между ними образуется емкостная и индуктивная связь (рис. 6), и из-за их взаимного влияния на входах пассивных цепей могут возникать ложные сигнальные напряжения [4, 5].



Рис. 6. Взаимосвязь между сигнальными проводниками

На форму и амплитуду импульсов помехи, вызванных взаимным влиянием, оказывают влияние

геометрические (длина, ширина проводников, расстояния между ними и до слоев земли и питания), электрические (выходное сопротивление передатчиков, входное сопротивление приемников) параметры, а также относительная диэлектрическая проницаемость платы. На рис. 7 показана ситуация, когда полезный сигнал в активной линии наводит в соседней пассивной линии сигнал помехи, который при повышении допустимых пороговых значений приводит к ложному срабатыванию логического элемента.

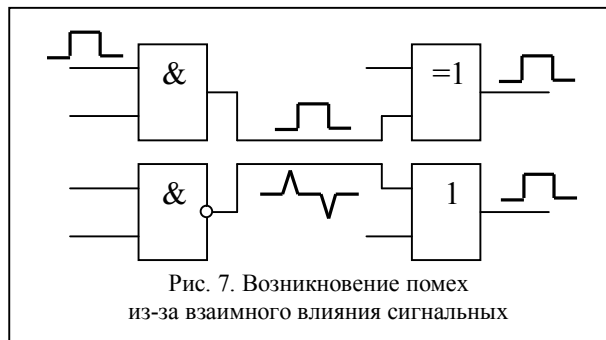


Рис. 7. Возникновение помех из-за взаимного влияния сигнальных

Для того, чтобы напряжения помехи были малыми, необходимо стремиться к возможно более коротким связанным участкам проводников. Также напряжения помехи могут быть существенно уменьшены путем введения экранирующего проводника, соединенного на обоих концах с системой опорного потенциала схемы. Благодаря этому образуется контур (короткозамкнутый), собственное магнитное поле которого частично компенсирует магнитное поле возбуждающего контура.

Все разъемы, обеспечивающие соединения с другими панелями или модулями должны быть размещены как можно ближе друг к другу. В этом случае дифференциальные токи, которые индуцируются в этих кабелях, не будут протекать по проводникам других цепей ПП. Чтобы избежать такого рода дифференциального эффекта может быть необходимо создание изоляции между проводником близким к разъему и слоем земли на ПП.

Кроме этого, существует множество рекомендаций непосредственно по разводке проводников ПП [6]. При этом, выполнить все их не представляется возможным. Поэтому необходимо существующие рекомендации расположить по приоритетам. Так, в [2] предложено выполнять такие рекомендации (в порядке уменьшения степени важности):

1. Минимизировать путь сигнального тока.
2. Не расчленять полигон возвратного сигнала.
3. Не располагать высокоскоростные схемы между разъемами.
4. Учитывать переходное время управляющего сигнала.

Таким образом, рассмотренные выше рекомендации, безусловно, полезны. Однако они не описывают все возможные варианты защиты от электро-

магнитных помех (ЭМП) и требуют проведения больших экспериментальных исследований. Рекомендации также не гарантируют отсутствия опасных уровней ЭМП, не позволяют оценить величины возможных помех, и, следовательно, осуществить прогноз работоспособности проектируемой схемы.

Поэтому целесообразно осуществлять анализ межсоединений в каждом конкретном случае.

3. Анализ межсоединений электронных схем

Задача анализа электрических параметров межсоединений проектируемых схем является составной частью проблемы ЭМС. Используемые при этом методы должны удовлетворять требованию эффективности при реализации в САПР. Анализ ЭМС схем электронных средств осуществляется после выполнения этапа трассировки межсоединений, и по результатам анализа возможна коррекция топологии или перепроектирование печатной платы.

Для анализа ЭМС схем изначально необходимо определить значения электрических параметров межсоединений. Активное сопротивление межсоединения определяют по формуле:

$$R = \frac{R_0 \cdot l}{t \cdot w},$$

где R_0 – удельное сопротивление материала; t, l, w – толщина, длина и ширина межсоединения соответственно.

Для анализа емкостей межсоединений (рис. 4) необходимо применять специальные численные методы. Их можно разделить на непосредственные (метод площадок, метод средних потенциалов, метод эквивалентных зарядов) и методы, требующие расчета электростатических полей (метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод граничных элементов). Собственную частичную емкость проводника определяют как скалярную величину, равную отношению заряда этого проводника к его потенциалу, при условии, что все проводники системы имеют одинаковый потенциал [3]. Взаимной частичной емкостью между двумя проводниками является скалярная величина, равная отношению заряда одного из рассматриваемых проводников к потенциалу другого, при условии, что все проводники, кроме последнего, имеют потенциал, равный нулю. Тогда, связь между зарядами и потенциалами в системе N проводников выражается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{11} \cdot U_1 + C_{12} \cdot (U_1 - U_2) + \dots + C_{1N} \cdot (U_1 - U_N); \\ Q_2 &= C_{21} \cdot (U_2 - U_1) + C_{22} \cdot U_2 + \dots + C_{2N} \cdot (U_2 - U_N); \\ &\dots \\ Q_N &= C_{N1} \cdot (U_N - U_1) + C_{N2} \cdot (U_N - U_2) + \dots + C_{NN} \cdot U_N, \end{aligned}$$

где Q_i и U_i – заряд и потенциал i -го проводника ($i = 1, 2, \dots, N$); C_{ii} – собственная частичная емкость i -го проводника; C_{ik} – взаимная частичная емкость

между i -м и k -м проводниками ($i, k = 1, 2, \dots, N; i \neq k$), при этом $C_{ik} = C_{ki}$.

Взаимная связь между двумя проводниками (они разбиваются на бесконечно тонкие продольные нити) может быть определена через двойной интеграл:

$$\overline{M} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{dl_1 \cdot dl_2}{d} \cos \theta,$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; dl_1, dl_2 – элементы длины нитей проводников l_1 и l_2 ; d – расстояние между этими элементами; θ – угол между ними.

Для многослойных ПП собственная индуктивность контура и взаимная индуктивность контуров межсоединений определяется по формулам:

$$L = \frac{1}{i_1^2} \int_{i_1} di' \int_{i_1} \overline{M} \cdot di''; \quad M = \frac{1}{i_1 \cdot i_2} \int_{i_1} di' \int_{i_2} \overline{M} \cdot di'',$$

где di', di'' – токи нитей; i_1, i_2 – значение токов в контурах 1 и 2.

Далее, по известным матрицам погонных индуктивностей $[L]$, погонных сопротивлений $[R]$, погонных коэффициентов электростатической индукции $[B]$ и погонных проводимостей $[G]$ находятся решения телеграфных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_k(x, t)}{\partial x} &= - \sum_{l=1}^N R_{kl} \cdot i_l(x, t) - \sum_{l=1}^N L_{kl} \frac{\partial i_l(x, t)}{\partial t}; \\ \frac{\partial i_k(x, t)}{\partial x} &= - \sum_{l=1}^N G_{kl} V_l(x, t) - \sum_{l=1}^N B_{kl} \frac{\partial V_l(x, t)}{\partial t}, \\ k &= 1, \dots, N, \quad 0 < x < D, \end{aligned}$$

где $V_k(x, t)$ – напряжение между k -м сигнальным проводником и землей на расстоянии x от источника сигнала в некоторый момент времени t , $x = 0$ соответствует положению источника, $x = D$ – положению приемника; $i_k(x, t)$ – ток, протекающий по k -му проводнику на расстоянии x от источника сигнала в некоторый момент времени t ; $R_{kl}, L_{kl}, G_{kl}, B_{kl}$ – элементы матриц погонных сопротивлений, погонных индуктивностей, погонных проводимостей и погонных коэффициентов электростатической индукции соответственно; N – число проводников анализируемой системы.

Элементы матрицы $[B]$ часто называют емкостными коэффициентами, но они не равны собственным и взаимным емкостям. Их можно найти исходя из следующих формул:

$$C_{ii} = \sum_{k=1}^N B_{ik}; \quad C_{ik} = -B_{ik}, \quad k \neq i.$$

Решения телеграфных уравнений находятся одним из методов (метод нормальных волн, метод функций Грина, метод продвижения во времени и др.) и позволяют оценить величину помех, возни-

кающих в межсоединениях из-за их взаимного влияния. При этом для нахождения характеристики линии, нагруженной определенными цепями, необходимо рассматривать систему уравнений, объединяющую телеграфные уравнения с уравнениями, описывающими нагруженные цепи, которые выражают граничные условия для телеграфных уравнений при $x = 0$ и $x = D$. Кроме граничных необходимо задать начальные условия. Обычно полагают, что в момент времени $t = 0$ напряжения и токи в линии отсутствуют.

Необходимо отметить, что задачи анализа ЭМС имеют большую размерность и существуют некоторые подходы к ее снижению:

- построение топологических зон влияния для проводников;
- ранжирование цепей по конструктивному назначению и отбраковка «второстепенных» межсоединений;
- факторное моделирование взаимной электромагнитной связи;
- временное ранжирование элементов схем по уровням срабатывания.

Однако, такие подходы эффективны для электронных средств, имеющих несколько десятков межсоединений, и плохо пригодны для более сложных устройств.

Выводы

Предложена методика проектирования аналого-цифровых устройств, которая позволяет учесть электромагнитную совместимость разрабатываемых аналого-цифровых схем на начальных этапах процесса проектирования. В частности исследованы и учтены существующие рекомендации по обеспече-

нию ЭМС. Кроме того, предложено непосредственно осуществлять анализ уровня помех, возникающих в межсоединениях электронных схем. Это позволит эффективно бороться с проблемами ЭМС при проектировании аналого-цифровых схем.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что использование разработанной методики позволит значительно повысить эффективность процесса проектирования схем аналого-цифровых устройств, в частности устройств биомедицинского назначения.

Список литературы

1. Прасол И.В., Кобылинский А.В. Алгоритм оптимизации аналого-цифровых схем с использованием обобщенного критерия // МРФ-2005. Сборник трудов. Том I. – X.: АН ПРЭ, ХНУРЭ. – 2005. – С. 63-66.
2. Прасол И.В., Кобылинский А.В. Методика оптимального проектирования аналого-цифровых схем биомедицинских устройств с учетом электромагнитной совместимости // Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – № 3. – С. 50-53.
3. Чермошенцев С.Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств: Учебное пособие. – Казань: КГТУ, 2000. – 152 с.
4. Картер Б. Техника разводки печатных плат // ChipNews. – 2004. – № 7. – С. 63-70.
5. Вебб С. Основы проектирования высокоскоростных печатных плат // ChipNews. – 2006. – № 10. – С. 81-83.
6. Dr. Todd Hubing, Dr. Tom Van Doren. Designing for EMC: The Top 4 Guidelines. Printed Circuit Design & Manufacture. – June 2003. – P. 27-32.

Поступила в редколлегию 27.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук., проф. В.В. Семенец, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.