

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Корниенко В.Т. Шеверева А.В.* Использование виртуальных приборов LabVIEW для анализа работы цифровых скремблеров. Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы // *Материалы четырнадцатого международного научно-практического семинара*. г. Донецк, 15-18 апреля 2013 г. В 3-х томах. Т. 2. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 89-93.
2. *Шевкопляс Б.* Скремблирование передаваемых данных // *Схемотехника*. – 2004. – № 12. – С. 24-27.
3. *Шевкопляс Б.* Скремблирование передаваемых данных // *Схемотехника*. – 2005. – № 2. – С. 32-35.
4. *Boucqueau J.M, Verians X.* "Next Generation Conditional Access Systems for Satellite Broadcasting," ESA Contract 16996/02/NL/US Octalis 2003.
5. *Афанасьев А.В.* Гибридная защита от несанкционированного доступа мультимедийного вещания в сетях передачи данных: Сборник трудов МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2004.
6. Support for use of the DVB Scrambling Algorithm version 3 within digital broadcasting systems. DVB Document A125. July 2008.
7. DVB CSA2 Descrambler Core. CLP-42 Product Brief Elliptic Technologies Inc.62 Steacie Drive, Suite 201. Ottawa, ON, Canada.
8. *Самрин А.* Стандарты цифровых видеointерфейсов // *Компоненты и технологии*. – 2006. – № 2.
9. *Ralf-Philipp Weinmann, Kai Wirt.* Analysis of the DVB Common Scrambling Algorithm. Technical University of Darmstadt. Department of Computer Science. Darmstadt, Germany. October 12, 2004.
10. *Yue Wu, Sos Agaian, Joseph P. Noonan.* Sudoku Associated Two Dimensional Bijections for Image Scrambling. A paper draft submitted to iee transactions on multimedia.
11. *Бутырин П.А., Васьковская Т.А., Каратаев В.В., Материкин С.В.* Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW7. – М.: ДМК-пресс, 2005.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Корниенко Владимир Тимофеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vlad_korn65@mail.ru; г. Таганрог, ул. Дзержинского, 170, кв. 53; тел.: +79515271225; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; к.т.н.; доцент.

Kornienko Vladimir Timofeevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: vlad_korn65@mail.ru; 170, Dzerginsky street, fl. 53, Taganrog, Russia; phone; +79515271225; the department of radio engineering and telecommunication systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.6

Т.А. Суанов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Представлен этап предтопологического моделирования в маршруте проектирования высокоскоростных многослойных печатных плат с помощью системы автоматизированного проектирования Mentor Graphics Expedition-PCB.

Приведены результаты моделирования печатных линий передачи с целью выявления проблем обеспечения целостности сигналов и электромагнитной совместимости. Рассмотрены длинные линии передачи, требующие согласования, представлены временные диаграммы сигналов в несогласованных и согласованных линиях передачи при разных способах согласования. Исследованы линии передачи с взаимной электромагнитной связью на

внешних и внутренних слоях печатной платы, представлены временные диаграммы наведённых помех. Рассмотрены методы устранения перечисленных проблем, исследована их эффективность, даны рекомендации к проектированию печатных линий передачи в высокоскоростных системах на печатных платах.

Также представлен инструмент анализа электромагнитной совместимости. Выполнено моделирование одиночной линии передачи на внешнем слое печатной платы, приведены спектральные диаграммы.

Проанализировано место и целесообразность этапа предтопологического моделирования в маршруте проектирования печатных плат.

Многослойная печатная плата; печатные линии передачи; целостность сигналов; электромагнитная совместимость; согласование печатных линий передачи; перекрёстные помехи.

T.A. Suanov

HIGH SPEED PRINTED-CIRCUIT WIRING SIMULATIONS

Pre-layout signal integrity simulations have been presented using computer-aided design of high-speed multilayer printed circuit board (Mentor Graphics Expedition-PCB). Printed-circuit wiring simulations have been accomplished to find out signal integrity and electromagnetic compatibility problems.

Long transmission lines requiring matching have been investigated, as a result timing diagrams of the signals in matched and mismatched lines are presented upon different matching techniques. Coupling transmission lines have been analyzed in cases of tracing in outer and inner layers; timing diagrams of cross talks are performed. Methods for handling such problems were reviewed, and its effectiveness have been examined. Recommendations for designing printed-circuit wiring in high-speed systems based on printed-circuit boards are provided.

Also module for electromagnetic compatibility analyzing was presented. Simulation of single transmission line printed on outer layer of printed-circuit board have been carried out, spectrum diagrams are derived.

Place of pre-layout signal integrity simulations and its reasonability in the printed-circuit board design have been discussed.

Multilayer printed circuit board; printed line; signal integrity; electromagnetic compatibility; printed line matching; cross coupling.

Введение. Моделирование топологии многослойных печатных плат (МПП) в целом или особенно уязвимых (в смысле целостности сигналов) участков топологии позволяет достоверно прогнозировать возможные проблемы и искать пути их решения до изготовления и тестирования макета. Рассмотрим решение задач данного этапа проектирования на примере инструмента *HyperLynx 8.0* (интегрированного в маршрут проектирования *DxDesigner – ExpeditionPCB* от компании *Mentor Graphics*). *HyperLynx 8.0* имеет два отдельных инструмента моделирования (с применением *IBIS*-моделей): *LineSim* и *BoardSim* (первый предназначен для предтопологического моделирования, а второй – для посттопологического) и ещё инструмент *IDS (IBIS Development System)* для создания и редактирования *IBIS*-моделей.

Основная цель моделирования топологии МПП – выявить проблемы, нарушающие целостность сигналов и электромагнитную совместимость (ЭМС) устройства. Под обеспечением целостности сигналов понимается создание такой топологии, что вносимые ею искажения в форму сигналов не нарушают функционирование устройства. Основные причины нарушения целостности сигналов – это временные задержки, вносимые линиями передачи; несинхронность фронтов импульсов; отсутствие согласования линий передачи и их нагрузок; перекрёстные помехи (наводки); переходные процессы при переключении напряжения между логическими уровнями.

Место *HyperLynx LineSim* в маршруте проектирования МПП – перед этапом разработки топологии, а цель применения – определить ограничения, которые далее будут использованы при разработке топологии. Конечно, большинство соединений могут быть трассированы без проведения какого-либо анализа, но внимательное исследование и разработка разумных ограничений и правил трассировки критических соединений (высокоскоростных и чувствительных к искажениям формы сигнала) обернётся существенной экономией времени и средств на этапе тестирования и отладки макета.

Моделирование длинных линий передачи и электромагнитной совместимости. Рабочее поле *HyperLynx LineSim* состоит из ячеек, в каждой из которых есть буфер ввода/вывода (приёмник/передатчик сигнала) (рис. 1,а), две линии передачи (рис. 1,б), параллельно включенные резисторы и конденсатор (рис. 1,в), последовательно включенный резистор (рис. 1,г). Пассивные компоненты используются для моделирования согласования линии передачи с буфером входа/выхода микросхемы или другого компонента МПП. Таким образом, каждая ячейка *LineSim* – это прототип линии передачи в МПП, которая может быть согласована или не согласована.

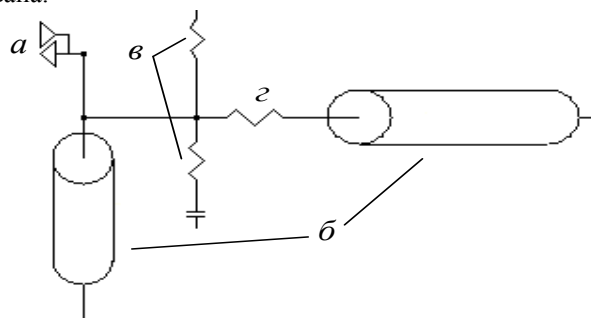


Рис. 1. Ячейка *LineSim*

Для примера рассмотрим модель линии передачи со следующими параметрами:

1) буферы ввода/вывода выполнены по технологии *CMOS, 3.3V, FAST* (быстродействующая комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник (КМОП) с питанием 3,3 В);

2) линия передачи одиночная (не имеющая электромагнитной связи с соседними линиями), расположена на внутреннем сигнальном слое между двумя потенциальными; длина линии – 10 см, а ширина 125 мкм, волновое сопротивление – 71,3 Ом, время задержки сигнала 595 нс.

Воздействие зададим в виде заднего фронта прямоугольного импульса длительностью 1нс.

На рис. 2,а показан результат моделирования. Хорошо видно, что из-за отсутствия согласования линии передачи с нагрузкой, напряжение приёмника (кривая 2) не устанавливается даже в течение 9 нс, хотя длительность фронта передатчика равна 1нс (кривая 1).

Выполним моделирование при согласовании линии передачи с помощью последовательного резистора (рис. 1,г). Требуемое сопротивление можно рассчитать автоматически, с помощью модуля *Termination Wizard*. Кроме величины сопротивления предлагается ещё и оптимальное расстояние от нагрузки (приёмника или буфера ввода), на котором нужно разместить согласующий резистор. Результат согласования показан на рис. 2,б.

Установления сигнала в приемное время всё ещё не происходит, хотя амплитуда понижающего выброса незначительно сократилась, а временная задержка увеличилась. Причина в том, что выходное сопротивление передатчика сигнала, как правило, составляет от 2 до 20 Ом (в зависимости от технологии), а волновое сопротивление линии передачи около 70 Ом (см. рисунок 1), поэтому последовательный резистор будет хорошо работать в качестве согласующего элемента, если расположить его на входе линии передачи со стороны источника сигнала.

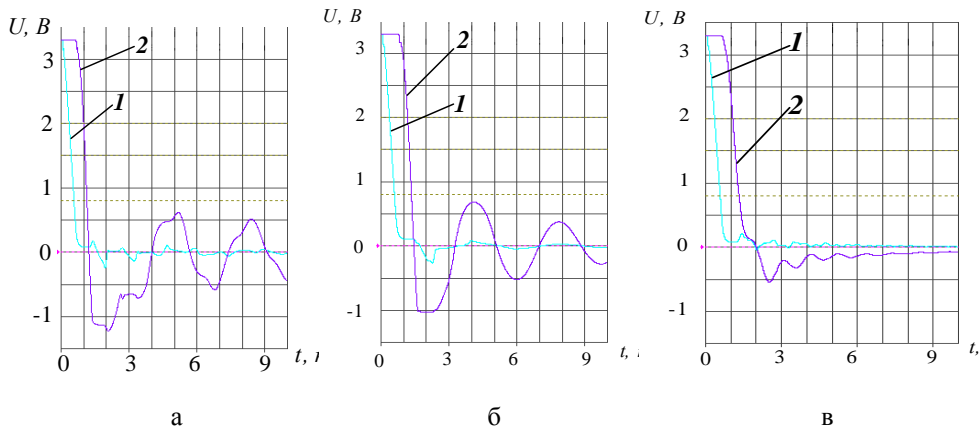


Рис. 2. Временные диаграммы заднего фронта импульса: кривая 1 – напряжение на передатчике; кривая 2 – напряжение на приёмнике

На рис. 2,в показан результат согласования с помощью параллельной RC-цепочки, такой способ согласования применяется на стороне приёмника. Понижающий выброс сократился почти до 500 мВ, и имеет место установление сигнала.

Выполним моделирование линии передачи (длина – 10 см, ширина – 125 мкм, расположена на верхнем слое МПП, согласована с помощью RC-цепочки) с помощью модуля анализа электромагнитной совместимости (ЭМС) (*EMC for LineSim*). Расстояние до точки наблюдения поля – 3 м; длительность фронтов импульсов – 1 нс; воздействие в виде меандра с частотой следования импульсов 100 МГц.

Спектральная диаграмма показана на рис. 3,а, как видно, некоторые спектральные составляющие (на частоте около 900 МГц) превышают максимально допустимый уровень излучения стандарта FCC.

Результат моделирования для линии передачи при прежних условиях, но без согласования, и длина линии – 5 см показан на рис. 3,б. Видно, что сокращение длины линии передачи оказывается очень действенным инструментом в борьбе с проблемой ЭМС.

Если линия передачи находится на одном из внутренних сигнальных слоёв между потенциальными (земли или питания), следует ожидать существенного снижения уровня излучения, поскольку сплошные металлические (потенциальные) слои служат экранами электромагнитного поля.

Можно сделать ряд выводов общего характера. Во-первых, длина линии передачи наиболее существенно влияет на целостность сигнала и возникновение проблем ЭМС. Если есть возможность, всегда надо стремиться минимизировать длины соединений, при этом полезно пользоваться следующим правилом: критическая длина линии передачи $l_{кр}$ (т.е. максимальная длина, при которой линия передачи может не рассматриваться как длинная линия) определяется соотношением

$$l_{кр} = v_{л} \frac{t_{\phi}}{6}; \quad v_{л} = \frac{l}{t_3},$$

где $v_{л}$ – скорость распространения сигнала по линии передачи, t_{ϕ} – длительность фронта импульса (в случае, когда длительности переднего и заднего фронтов отличаются, следует использовать меньшее из двух значений), l – геометрическая длина линии, t_3 – задержка вносимая линией передачи (например, при длительности фронта импульса 1 нс линия передачи на верхнем слое МПП имеет критическую длину меньше 2 см). Во-вторых, во всех случаях, когда не удаётся сократить длину линий передачи необходимо использовать согласующие элементы; в зависимости от ситуации, более эффективным может оказаться применение последовательного резистора или параллельной RC -цепочки. В-третьих, для сокращения временной задержки, вносимой линией передачи, можно переносить трассы на слои с большей скоростью распространения сигнала, как правило, это верхний или нижний слой МПП (разумеется, если нет возможности сократить длину линии передачи). Если важно обеспечить для нескольких трасс равенство вносимых временных задержек, то этого можно добиться, выравняв длины трасс, в случае, когда условия распространения сигнала для всех трасс одинаковы. Когда же скорости распространения сигналов по линиям передачи различны – необходимо обеспечить постоянство отношения $l/v_{л}$ для всех трасс.

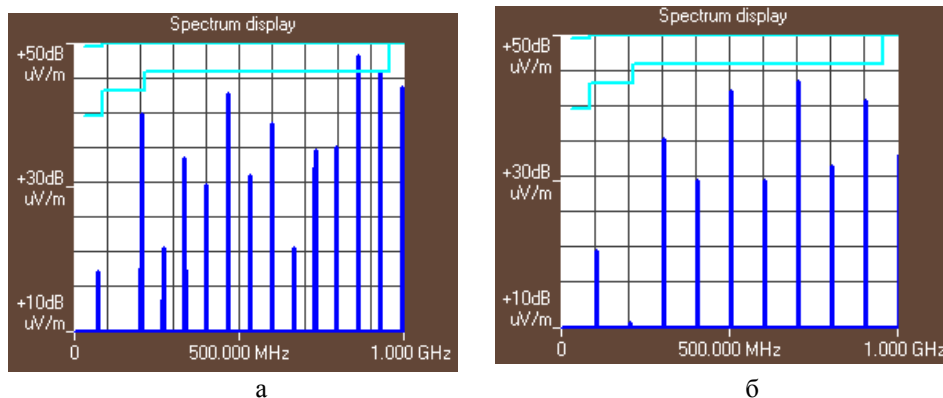


Рис. 3. Спектральные диаграммы излучаемого электромагнитного поля: а – линия передачи на внешнем слое МПП; б – тактовая частота 100 МГц; длительность фронтов импульсов – 1нс

При решении проблем ЭМС длина трассы опять же является важным влияющим фактором, однако очень действенной мерой оказывается перемещение линии передачи на внутренние слои МПП, отсюда можно вывести простое правило: трассы для всех высокоскоростных сигналов (следовательно, эффективно излучаемых) должны быть разведены на внутренних сигнальных слоях, желательно расположенных между потенциальными слоями.

Не стоит забывать и про используемую элементную базу. Применение микросхем с меньшей скоростью переключения между логическими уровнями напряжения всегда предпочтительнее, если это не сказывается на быстродействии устройства. Чем меньше быстродействие буферов ввода/вывода, тем надёжнее все ранее перечисленные меры по обеспечению целостности сигналов и ЭМС. В ряде случаев потребность в этих мерах и вовсе отпадёт, скажем, если увеличить в два

раза время переключения (длительность фронтов импульсов), то и критическая длина трасс увеличится в два раза, а значит, для многих линий передачи не потребуется согласование.

Моделирование перекрёстных помех. Рассмотрим две линии передачи со следующими параметрами:

1) буферы ввода/вывода (приёмник и передатчик сигнала) выполнены по технологии *CMOS, 3.3V, FAST* (быстродействующая комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник (КМОП) с питанием 3,3 В);

2) длина – 10 см, а ширина 125 мкм, волновое сопротивление – 71,3 Ом, время задержки сигнала 595 нс;

3) линии передачи параллельны, расположены на верхнем слое МПП, расстояние между ними – 200 мкм.

Одну из линий передачи будем рассматривать как линию, излучающую электромагнитное поле (ЭМП) («цепь-агрессор»), а вторую – как линию, принимающую ЭМП («цепь-жертва»), для этого передатчик сигнала последней установим на уровне логического нуля и не переключающимся.

На рис. 4 показана схема для моделирования. Светлой пунктирной линией обозначены взаимосвязанные линии передачи.

В качестве воздействия задано переключение между уровнями логической единицы и нуля (задний фронт импульса), время переключения – 1 нс.

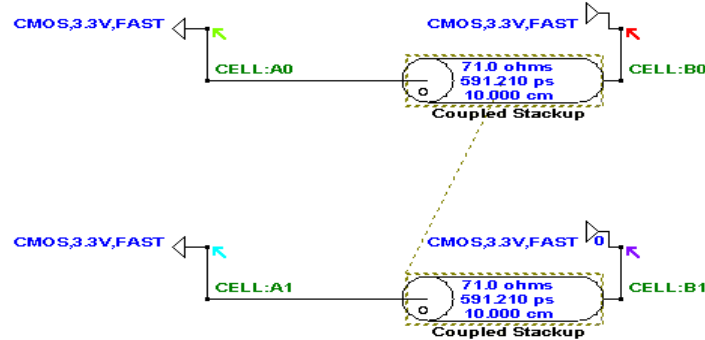


Рис. 4. Взаимосвязанные линии передачи

На рис. 5,а показан результат моделирования. Как видно, амплитуда наводки на приёмнике «цепи-жертвы» (кривая 1) составляет почти 0,6 В, при синфазном сложении с выбросом напряжения, обусловленным рассогласованием линии передачи и нагрузкой, напряжение на приёмном буфере *A1* достигнет достаточного значения, чтобы буфер переключился в другое логическое состояние, что приведёт к ошибкам функционирования схемы. Кривая 2 – напряжение на передающем буфере «цепи-жертвы».

Столь высокая амплитуда напряжения наводки обусловлена тем, что расстояние между высокоскоростными параллельными линиями передачи всего 200 мкм. При расстоянии между трассами 375 мкм (втрое больше ширины трасс), результат моделирования показывает, что амплитуда наводки при этом сокращается почти вдвое.

Результат моделирования перекрёстных наводок при прежних условиях, за тем исключением, что обе линии передачи расположены на внутреннем слое между двумя потенциальными, показан на рис. 5,б.

Имеет место существенное снижение уровня взаимовлияния (амплитуда наводки меньше 150 мВ, что почти в 4 раза меньше, чем в случае с трассами на внешнем слое МПП). Причина в том, что силовые линии электрического поля «опираются» на потенциальные слои, тем самым снижается связь трасс между собой.

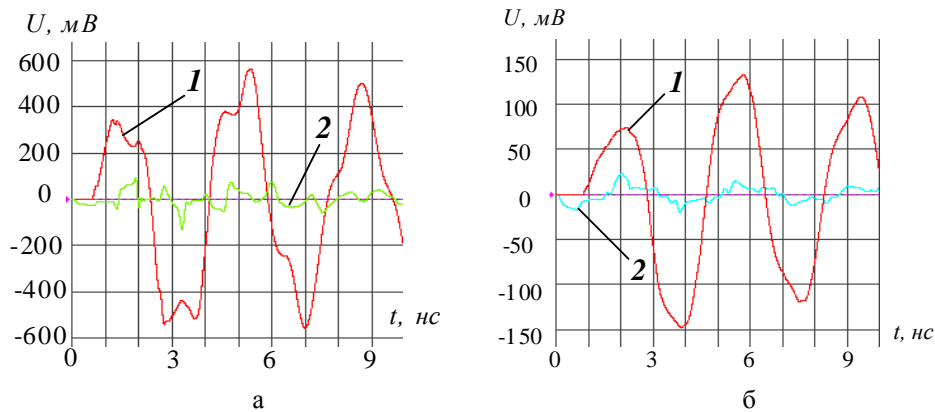


Рис. 5. Перекрёстные помехи в «линии-жертве»: кривая 1 – напряжение на приёмнике; кривая 2 – напряжение на передатчике

Добавим в схему для моделирования третью заземлённую линию передачи (длиной 10 см и шириной 125 мкм) – защитную трассу [1], паразитные параметры заземления индуктивность – 2 нГн, сопротивление – 20 мОм и ёмкость – 0,3 пФ. Паразитные параметры учитывают заземление линии передачи с помощью переходного отверстия на одном из концов линии. На рис. 6 показана схема для моделирования.

В качестве воздействия зададим последовательность импульсов с частотой 100 МГц, время переключения между логическими уровнями – 1 нс. На рис. 7,а показаны результаты моделирования при заземлении защитной трассы с одной стороны, а на рис. 7,б, показаны результаты моделирования при тех же условиях, но при том, что защитная трасса заземлена с обеих сторон. Как видно, амплитуда наведённого напряжения на приёмнике «цепи-жертвы» составляет приблизительно 350 мВ при заземлении с одной стороны, и менее 200 мВ при заземлении с обеих сторон.

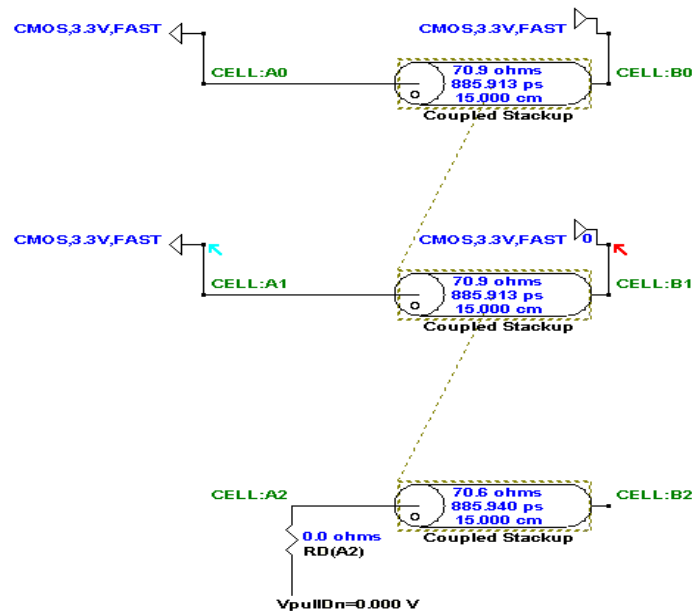


Рис. 6. Взаимосвязанные линии передачи с защитной трассой

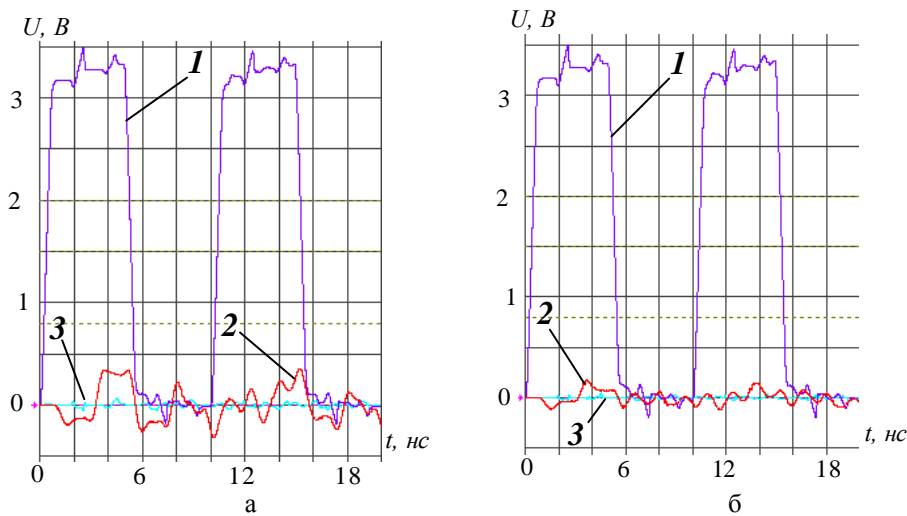


Рис. 7. Перекрёстные помехи в линиях передачи, разделённых защитной трассой: кривая 1 – сигнал в «цепи-агрессоре»; кривая 2 – наводка на приёмнике «цепи-жертвы»; кривая 3 – наводка на передатчике «цепи-жертвы»

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы. Две параллельные линии передачи с высокоскоростными сигналами оказывают друг на друга существенное влияние. Амплитуду наведённого напряжения можно снизить одним из следующих способов:

1. Увеличивая зазор между линиями передачи; при увеличении зазора до $3w$, где w – ширина трассы, уровень перекрёстных помех снижается на 65 % по сравнению со случаем, когда зазор равен ширине трассы [1].
2. Сокращая участки, на которых трассы идут параллельно друг другу, с малым зазором (меньшим $3w$).
3. Используя для трассировки внутренние слои, расположенные между двумя потенциальными слоями (экранами).
4. Используя заземлённые защитные трассы, если защитная трасса является длинной линией передачи, то распространение в ней наведённых помех в свою очередь может стать причиной наводки на соседние трассы. Чтобы препятствовать таким явлениям, переходные отверстия, соединяющие защитную трассу с потенциальным слоем земли, нужно размещать не только на концах трассы, но и по всей её длине так, чтобы на участке защитной трассы длиной $v_{д}t_{ф}$ оказалось три отверстия [1].
5. Если трассы проходят в смежных сигнальных слоях (не разделённых потенциальным), необходимо чтобы вблизи точки пересечения они были ортогональными.
6. Нужно внимательно относиться к выбору элементной базы (высокая скорость переключения между логическими уровнями напряжения приводит к значительным наводкам).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: ООО «Группа ИТД», 2007. – 616 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Костоготов.

Суанов Тимур Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: temr.suanty@gmail.com; 347900, г. Таганрог, пер. 1-й Новый, 14/3, кв. 24; тел.: +79281571294, +79094228347; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; к.т.н.; доцент.

Suanov Timur Alexandrovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: temr.suanty@gmail.com; lane 1-noviy 14/3, apt. 24, Taganrog, 347900, Russia; phones: +79281571294, +79094228347; the department of radio engineering and telecommunication systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.3.062

С.И. Клевцов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В МИКРОКОНТРОЛЕРЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА

Рассматривается возможность использования временных рядов для прогнозирования изменений технического параметра. Для выполнения прогнозной оценки используются простые модели. В качестве базовых типов выбраны: модель на основе линейного адаптивного фильтра и модель на основе многократного экспоненциального сглаживания. Модели были модифицированы для адаптации к особенностям процесса вычислений в микроконтроллере. На их основе формируются простые алгоритмы, которые могут выполняться в микроконтроллерной системе в фоновом режиме. Они характеризуются небольшими вычислительными затратами на реализацию. В качестве исходных данных были взяты значения ускорений, снимаемых с трехосевого акселерометра, установленного на автомобиле. Данные не подвергались предварительной обработке. Прогноз осуществлялся на один шаг съема информации с датчика. Оценка моделей проводилась на одной и той же экспериментальной выборке данных. Сравнение результатов прогнозирования показало, что в целом обе модели эквивалентны, с точки зрения приведенной погрешности. Однако модель на основе многократного экспоненциального сглаживания можно использовать для оценки изменения параметра на произвольное число интервалов прогнозирования.

Временной ряд; модель; прогнозирование; технический параметр; микропроцессор; реальное время.

S.I. Klevtsov

USE OF TIME NUMBERS FOR SHORT-TERM FORECASTING IN THE MICROCONTROLLER OF CHANGES IN VALUE OF PARAMETRE

In article possibility of use of time numbers for forecasting of changes of technical parametre is considered. For performance of a look-ahead estimation simple models are used. As base types are chosen: model on the basis of the linear adaptive filter and model on the basis of repeated smoothing after an exhibitor. Models have been modified for adaptation to features of process of calculations in the microprocessor. On their basis simple algorithms which can be carried out in microprocessor system in a background mode are formed. They are characterised by small computing expenses for realisation. As the initial data were values of the accelerations removed with three-axial акселерометра, established on the car are taken. The data was not exposed to preliminary processing. The forecast was carried out on one step съема information from the gauge. The estimation of models was spent on the same experimental sample of the data. Comparison of results of forecasting has shown that as a whole both models are equivalent from the point of view of the resulted error. However, the model on the basis of repeated smoothing after an exhibitor can be used for an estimation of change of parametre on any number of intervals of forecasting.

A time number; model; forecasting; technical parameter; the microprocessor; real time.