ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2004–47
ОЭА

А.Н. Исаев, А.П. Леонов, А.В. Савельев, В.А. Сенько,
А.Н. Сытин, Н.А. Шаланда

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ В МАГИСТРАЛЬНО-МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМАХ (ММС)

Протвино 2004

УДК 681.3.06 М-24

Аннотация

Исаев А.Н. и др. Моделирование импульсных сигналов, передаваемых в магистрально-модульных системах (ММС): Препринт ИФВЭ 2004-47. – Протвино, 2004. - 8 с., 2 рис., библиогр.: 17.

Описывается системный подход к проектированию магистрально-модульных систем (ММС). Предлагаются эквивалентная схема ММС, учитывающая основные факторы, влияющие на качество передаваемых сигналов, и методика моделирования с использованием программы Signal Integrity.

Abstract

Isaev A.N. et al. Simulation of Passed in Data Bus Signals: IHEP Preprint 2004-47. – Protvino, 2004. – 8 p., figs. 2, refs.: 17.

System approach for data bus design is described. Data bus equivalent diagram taking into account basic factors which have an influence on passed signals quality and simulation method with software Signal Integrity using are offered.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2004

При создании магистрально-модульных систем (ММС) для физических установок [1-6] актуальной задачей является исследование статических и динамических характеристик передаваемых сигналов с целью определения технических решений, обеспечивающих надежную передачу информации от модуля передатчика к модулю приемника. Данная задача является задачей системного анализа [7], так как для ее решения необходимо моделирование процессов передачи сигналов с учетом ряда факторов, определяемых реальной конструкцией и конфигурацией ММС. До недавнего времени методики системного моделирования ММС не было из-за отсутствия инструмента моделирования, обеспечивающего получение приемлемых результатов. Поэтому проектирование, изготовление и внедрение ММС в эксплуатацию представляло собой сложный многоступенчатый итерационный процесс, требующий немалых материальных и временных ресурсов, используемых на многократное изготовление прототипов и их настройку.

Появление программных пакетов компаний Altium Limited [8] и Quantic EMC Inc. [9, 10] дало возможность реализации нового подхода к созданию ММС. Процедура системного моделирования [11] принципиально изменяет процесс создания ММС, так как позволяет устранить причины искажений сигналов на стадии моделирования и, таким образом, сократить количество прототипов и тестирований системы. Кроме того, при системном моделировании можно проанализировать практически неограниченное число возможных сочетаний неблагоприятных факторов, что, как правило, затруднительно или невозможно при тестировании. Таким образом, при проектировании ММС с использованием системного моделирования не только существенно снижаются материальные и временные затраты, но и повышается качество проектируемых систем.

1. Разработка эквивалентной схемы моделируемой ММС

Важнейшим этапом моделирования является разработка эквивалентной схемы исследуемой системы. Для получения приемлемых практических результатов в этой схеме должны быть учтены факторы, влияющие на статические и динамические характеристики передаваемых сигналов.

1.1. Эквивалентная схема объединительной панели

Неотъемлемым компонентом любой ММС является объединительная панель (ОП) или mother board [1-6, 12], представляющая собой часть физической среды для передачи сигналов в системе. ОП представляет собой многослойную печатную плату, на которой с регулярным шагом расположены разъемы для присоединения электронных модулей. В соответствии

с заданным протоколом [1-6] контакты разъемов соединены печатными проводниками, которые в дальнейшем будем называть шинами. Поскольку исследуемые сигналы передаются по шинам, то на их характеристики влияют:

- величина волнового сопротивления Z_0 шины;
- постоянство величины Z_0 по всей длине передачи сигнала;
- временная задержка сигнала T_0, имеющая место при передаче сигнала по шине от модуля передатчика к модулю приемника;
- наличие или отсутствие сигналов на соседних шинах.

Величина волнового сопротивления Z_0 шины определяется: размерами печатного проводника (шириной W и толщиной d), значением диэлектрической постоянной материала ε, конструкцией печатной платы ОП (толщиной t слоя стеклотекстолита между шиной и следующим внутренним слоем, наличием или отсутствием экранного слоя).

Важным фактором является постоянство величины Z_0 по всей длине передачи сигнала, так как в противном случае возникают отражения, которые при определенных соотношениях могут привести к сбоям. Например, при передаче сигнала между компонентами эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ) и разницей в 20% между 60-омным сопротивлением шины и 50-омным сопротивлением нагрузки может возникнуть отражение амплитудой в 72 мВ, что составляет около половины полосы помехоустойчивости по постоянному току [12]. *Особенностью ММС является то, что величина Z_0 не может быть постоянной по всей длине передачи сигнала*. Поэтому на эквивалентной схеме ММС (**рис. 1**) величиной Z_0 описаны участки шин ОП между двумя соседними разъемами (потенциально возможными точками возникновения неоднородностей).

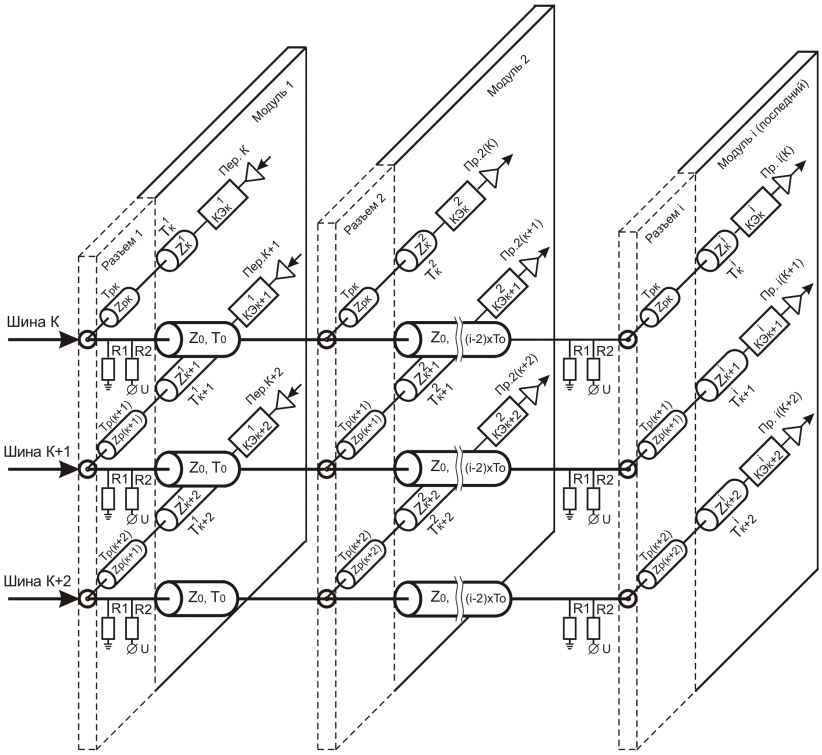


Рис. 1. Эквивалентная схема ММС для моделирования импульсных сигналов

Как следует из выражения $T_0 = \varepsilon^{1/2} \times 85$ (пс/дюйм) = $\varepsilon^{1/2} \times 3.35$ (пс/мм) [12], временная задержка сигнала определяется свойствами используемого материала (значением ε) и длиной участка шины, по которому передается сигнал. На эквивалентной схеме ММС (рис. 1) вводится временная задержка T_0, численно равная задержке сигнала на шине ОП при его передаче между соседними разъемами (от разъема i-1 к i-му). Тогда при передаче сигнала от разъема 2 к разъему i временная задержка составит $(i-2) \times T_0$.

Наличие или отсутствие сигналов на соседних шинах определяется режимом работы ММС. Так, в цикле передачи данных на всех шинах данных возможно одновременное переключение сигналов, что может привести к перекрестным помехам.

1.2. Эквивалентная схема разъема

Каждая пара контактов разъема i, подсоединенная к шине ОП, является частью физической среды передачи сигнала и характеризуется своей величиной волнового сопротивления Z_P и временной задержки T_P.

При подключении модуля в точке присоединения контакта разъема к шине возникает отражение сигнала (из-за неравенства величин Z_0 и Z_P).

В зависимости от конструкции разъема его контактные пары могут иметь различные значения волнового сопротивления и вносимой временной задержки. Например, для разъема типа DIN41612 [13] для контактов колонки A: Z_{PA}=71 Ом, T_{PA}=85 пс; для контактов колонки C: Z_{PC}=83 Ом, T_{PC}=124 пс.

Поэтому, в общем случае, на эквивалентной схеме ММС каждая пара контактов разъемов 1,2,…,i, подсоединенная к шине ОП, характеризуется своей величиной волнового сопротивления (Z_{PK}, $Z_{P(K+1)}$, $Z_{P(K+2)}$) и временной задержки (T_{PK}, $T_{P(K+1)}$, $T_{P(K+2)}$).

1.3. Эквивалентная схема выходной цепи модуля-передатчика

Выходная цепь модуля-передатчика представляет собой последовательную цепочку компонентов, которые осуществляют формирование и передачу сигнала к разъему ОП. К таким компонентам относятся:

- передатчик (формирователь) импульсного сигнала;
- печатный проводник, по которому осуществляется передача сигнала к разъему;
- корректирующий элемент, обеспечивающий заданное качество передаваемого сигнала.

Современные инструменты моделирования [8, 9] используют IBIS-модели [14, 15] передатчиков, описывающие параметры их контактных выводов и электрические характеристики выходных цепей. Поскольку для каждой шины могут использоваться передатчики сигналов различных типов, на эквивалентной схеме ММС (модуль 1 на рис. 1) для шин К, К+1 и К+2 введены IBIS-модели выходных цепей передатчиков Пер.К, Пер.К+1 и Пер.К+2 соответственно. При моделировании может использоваться любой из трех типов IBIS-модели выхода передатчика (с номинальными (typ), наименьшими (wk) или наибольшими (st) значениями параметров).

Печатные проводники, по которым осуществляется передача сигналов к шинам ОП внутри модуля, могут различаться длиной и шириной, расположением относительно экранного слоя. Поэтому, в общем случае, каждый печатный проводник выходной цепи модуля-передатчика характеризуется своими значениями волнового сопротивления Z^1_K, Z^1_{K+1} или Z^1_{K+2} и временной задержки сигнала T^1_K, T^1_{K+1} или T^1_{K+2}.

При передаче импульса в ММС его характеристики могут стать неудовлетворительными, что потребует введения корректирующих элементов, которые располагаются в “разрыве” печатного проводника между контактом разъема и выходом формирователя сигнала. Параметры

корректирующих элементов ($КЭ^1_К$, $КЭ^1_{К+1}$, $КЭ^1_{К+2}$ на рис. 1) определяются в результате процесса моделирования, что и является одной из его главных целей.

1.4. Эквивалентная схема входной цепи модуля-приемника

Входная цепь модуля-приемника представляет собой цепочку компонентов, через которые осуществляется передача импульса от контакта разъема до приемника сигнала включительно. К таким компонентам относятся:

- печатный проводник, по которому осуществляется передача сигнала от разъема к приемнику;
- приемник импульсных сигналов;
- корректирующий элемент, обеспечивающий заданное качество принимаемого сигнала.

Поскольку для каждой шины могут использоваться приемники сигналов различных типов, на эквивалентной схеме ММС для шин К, К+1 и К+2 введены IBIS-модели входных цепей приемников Пр.2(К),…,Пр.i(К), Пр.2(К+1),…,Пр.i(К+1) и Пр.2(К+2),…, Пр.i(К+2) соответственно. При моделировании может использоваться любой из трех типов IBIS-модели входа приемника (с номинальными (typ), наименьшими (wk) или наибольшими (st) значениями параметров). Если во входных цепях используются транзисторы или диоды, то для моделирования необходимо иметь SPICE-модели этих компонентов [8, 16].

Как и в модуле-передатчике, каждый печатный проводник входной цепи модуля-приемника характеризуется своими значениями волнового сопротивления $Z^2_К$,…, $Z^i_К$, $Z^2_{К+1}$,…, $Z^i_{К+1}$ или $Z^2_{К+2}$,…, $Z^i_{К+2}$ и временной задержки сигнала $T^1_К$,…, $T^i_К$, $T^1_{К+1}$,…,$T^i_{К+1}$ или $T^1_{К+2}$,…,$T^i_{К+2}$.

Параметры корректирующих элементов $КЭ^2_К$,…,$КЭ^i_{К+2}$ также определяются в результате процесса моделирования.

2. Разработка методики моделирования импульсных сигналов в ММС

При разработке эквивалентной схемы ММС учитывались описанные выше факторы, влияющие на статические и динамические характеристики импульсов. Исследование этих характеристик проводилось в двух режимах моделирования:

- *отражения (reflection),* когда исследуются формы сигналов в узлах каждого проводника с учетом отражений от нагрузок и временных задержек, определяются параметры корректирующих элементов для сигнальных цепей;
- *перекрестных искажений (crosstalk),* когда сигналы в цепях рассчитываются с учетом взаимной электромагнитной связи между прилегающими параллельными сегментами проводников, определяются параметры корректирующих элементов.

Целью моделирования является определение параметров корректирующих элементов, обеспечивающих приемлемые характеристики сигналов ММС при наихудшем сочетании параметров исследуемой цепи. Таким образом, для выполнения объявленной цели моделирования необходимо, во-первых, определить наихудшее сочетание параметров сигнальной цепи, во-вторых, определить параметры корректирующих элементов для этого сочетания, в-третьих, исследовать импульсный сигнал с корректирующими элементами в его цепи при разных конфигурациях ММС.

2.1. Моделирование импульсных сигналов в режиме отражения

Процесс моделирования импульсных сигналов в режиме отражения состоит из следующих частей:

- подготовки информации для программы моделирования;
- непосредственно процедуры моделирования;
- анализа результатов моделирования и поиска наихудшего сочетания параметров цепи;
- определения параметров корректирующих элементов;
- исследования сигнала при наличии корректирующих элементов.

2.1.1. Подготовка информации для программы моделирования

Для моделирования импульсных сигналов в ММС необходимо подготовить следующую информацию:

- файлы топологии ОП и печатных плат модулей передатчика и приемников (файлы с расширением .pcb при использовании P-CAD);
- библиотеку IBIS-моделей интегральных схем используемых приемопередатчиков;
- библиотеку SPICE-моделей транзисторов и диодов, используемых в исследуемых сигнальных цепях;
- библиотеку моделей (эквивалентных схем) контактных пар разъемов;
- библиотеку используемых пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов);
- библиотеку конструктивно-технологических параметров печатных плат и сигнальных проводников (значения диэлектрической проницаемости используемых материалов, толщины слоев печатной платы с указанием сигнальных и экранных слоев, ширины и толщины входящих в сигнальные цепи печатных проводников и т.д. [8]);
- общий файл топологии ref.pcb исследуемых сигнальных цепей с подключением к ОП через разъемы выходных цепей модуля-передатчика и входных цепей модулей-приемников; поскольку число модулей, подключаемых к ОП, и места их подключения могут быть различными, для системного анализа ММС необходимо иметь несколько общих файлов топологии;
- список цепей исследуемых сигналов и список цепей питания и земли.

2.1.2. Запуск и выполнение процедуры моделирования

После загрузки общего файла топологии ref.pcb выбирается инструмент моделирования (например, Signal Integrity в P-CAD 2002). Затем из списка цепей выбирается цепь исследуемого сигнала, из соответствующих библиотек уточняются: IBIS- и SPICE-модели, эквивалентные схемы разъемов, значения пассивных компонентов выбранной цепи, конструктивно-технологические параметры печатных плат и проводников. После задания длительности или периода исследуемого импульсного сигнала и выбора режима отражения начинается процедура моделирования. После ее окончания на экране монитора появляется набор графиков исследуемого сигнала во всех узлах цепи.

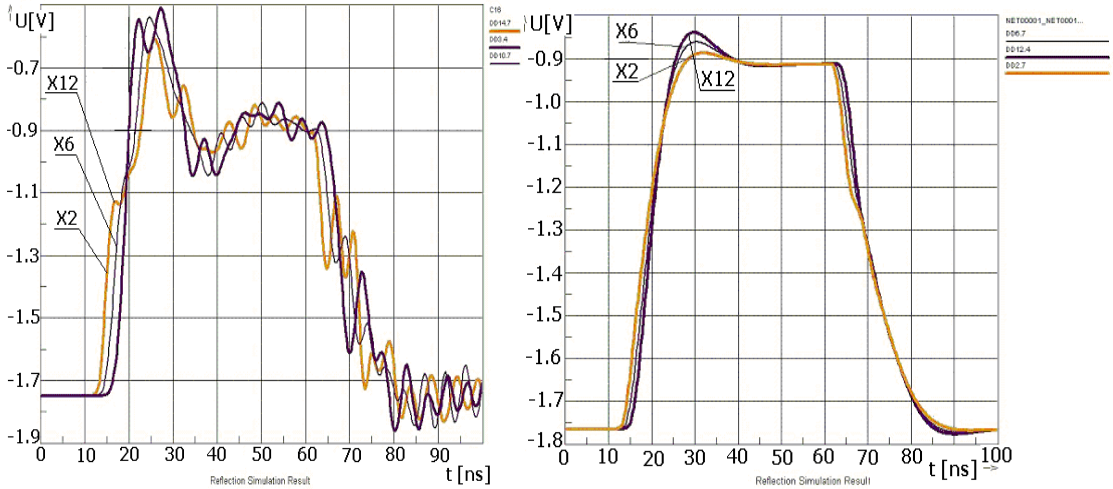
2.1.3. Анализ результатов моделирования и поиск наихудшего сочетания параметров цепи

Для исследования импульса в определенных узлах цепи из полученного набора выбираются графики, которые детально изучаются, определяются численные значения статических и динамических характеристик сигнала.

Поиски наихудшего сочетания параметров сигнальной цепи для действующей и вновь создаваемой ММС несколько отличаются. В действующей ММС конструкция печатных плат и параметры печатных проводников определены. В этом случае при поиске наихудшего сочетания параметров могут изменяться: число включенных в ОП модулей, места их подключения к ОП, параметры IBIS-моделей (typ, wk, st). Необходимо вернуться к разделу 2.1.2, загрузить

один из вариантов общего файла топологии ref.pcb или уже в загруженном файле изменить параметры IBIS-моделей. При разработке новых ММС, кроме указанных, необходимо провести исследования характеристик сигнала в зависимости от параметров печатных проводников модулей и конструкции их печатных плат. Для этого необходимо вернуться к разделу 2.1.2, загрузить один из вариантов общего файла топологии ref.pcb или уже в загруженном файле изменить параметры IBIS-моделей, печатных проводников, конструкцию печатных плат.

В качестве примера рассмотрим результаты моделирования в режиме отражения импульсного сигнала, передаваемого по шине данных многоканальной информационной скоростной системы (МИСС) [4]. Результаты получены для наихудшего случая, когда ко всем разъемам ОП присоединены модули. На **рис. 2а** приведены графики импульсных сигналов на входах приемников, расположенных в модулях, которые присоединены к разъемам 2, 6 и 12 объединительной панели (кривые X2, X6, X12 соответственно). Указанные импульсы искажаются столь сильно, что появляется необходимость включения элементов коррекции (демпфирования) в цепь передаваемого сигнала.



а) б)

Рис. 2. Графики изменения сигналов на входах приемников, подключенных к разъемам 2, 6, 12 ОП МИСС (кривые X2, X6, X12 соответственно): а) при отсутствии демпфирующих элементов; б) при наличии демпфирующих элементов.

2.1.4. Определение параметров корректирующих элементов

Схема коррекции выбирается в зависимости от типа используемых приемопередатчиков. Как правило, разработчик системы имеет набор рекомендаций по согласованию выбранной цепи с нагрузкой [8]. Оптимальные величины компонентов корректирующего элемента определяются в результате нескольких итераций, включающих в себя: моделирование сигнала в режиме отражения, анализ и сравнение результатов с предыдущей итерацией, изменение величины корректирующих компонентов, снова моделирование и т.д. Полученные величины компонентов корректирующего элемента запоминаются и вносятся в схемы модулей передатчика и приемника.

На **рис. 2б** представлены графики импульсов в тех же точках системы, что и на рис. 2а, но при наличии демпфирующих элементов, определенных с использованием Signal Integrity. Численные значения характеристик сигналов на рис. 2б соответствуют заданным [17], и по данной шине обеспечивается передача информации без искажения.

2.1.5. Исследование сигнала при наличии корректирующего элемента и при разных конфигурациях ММС

Данный этап является проверочным. Как правило, поскольку параметры корректирующего элемента подбирались для наихудшего случая, новое моделирование не выполняется. Однако окончательное решение о необходимости выполнения этого этапа принимается разработчиком в каждом конкретном случае.

2.2. Исследование импульсных сигналов в режиме перекрестных помех

Данное исследование осуществляется после процедуры моделирования импульсных сигналов в режиме отражения. Поэтому вся необходимая для моделирования информация, включая библиотеки, подготовлена. Корректирующие элементы определены и внесены в соответствующие модули. Процесс моделирования импульсных сигналов в режиме перекрестных помех состоит из следующих частей:

- непосредственно процедуры моделирования;
- анализа результатов моделирования для разных конфигураций ММС;
- определения параметров корректирующих элементов;
- моделирования сигнала в режиме отражения с уточненными параметрами корректирующих цепей, определения оптимальных для обоих режимов моделирования параметров корректирующих элементов.

При моделировании в данном режиме выбирается не одна, а несколько соседних параллельно расположенных цепей. Одной из выбранных цепей (как правило, не крайней) присваивается статус victim и полагается, что в этой цепи переключения сигнала не происходит. При моделировании во всех выбранных цепях, кроме цепи victim, происходит одновременное переключение сигналов, в цепи victim рассчитывается наведенная помеха и ее график выводится на экран монитора. По аналогии с предыдущим режимом моделирования определяются параметры корректирующих элементов, а затем выбираются оптимальные как с точки зрения минимизации отражений, так и с точки зрения подавления перекрестных помех.

Заключение

В работе изложен системный подход к проектированию магистрально-модульных систем, обеспечивающий повышение их качества и сокращение сроков внедрения в физические установки. Приведенная эквивалентная схема ММС позволяет разработчику учесть основные факторы, влияющие на качество передаваемого сигнала.

Авторы надеются, что данная работа будет полезна для широкого круга специалистов, занимающихся созданием электроники.

Список литературы

[1] Стандарт КАМАК. ГОСТ 26. 201-80.

[2] Алферова О.И., Бушнин Ю.Б., Денисенко А.А. и др. – Препринт ИФВЭ 74-122, Серпухов, 1974.

[3] VMEbus SPECIFICATION MANUAL conforms to: ANSI/IEEE STD 1014-1987 IEC 821 and 297. VMEbus International Trade Association 10229 N.Scottsdale Rd., Suite E, Scottsdale, AZ 85253 USA.

[4] Бушнин Ю.Б., Ваньев В.С., Гончаров П.И. и др. – Препринт ИФВЭ 88-47, Серпухов, 1988.

[5] IEEE Standard FASTBUS Modular High-Speed Data Acquisition and Control System. ANSI/IEEE Std 960-1986, ISBN 0-471-84472-1.
[6] Roger Edwards. Futurebus – the independent standard for 32-bit systems. // Microprocessors and microsystems. 1986, v. 10, № 2, p. 65-68.
[7] Дунайцев А.Ф., Леонов А.П., Лукьянцев А.Ф. и др. Об организации интегрированной системы автоматизированного проектирования и производства аппаратуры для проведения исследований в области физики высоких энергий. // Инженерная физика, 2000, №1.
[8] P-CAD Signal Integrity™. User's Guide. – Copyright © 2002 Altium Limited.
[9] Mentor – Quantic Interface. User's Manual. Version 2.30. – Quantic EMC Inc., February 1998/9510.
[10] Omega PLUS. – Quantic EMC Inc., 2000.
[11] Reduction of Electromagnetic Radiation by Detection and Optimization of Critical Ne tworks on a PCB during the Layout-process. EMC by Simulation. – Siemens AG ATD TD 5 AM//Peter.Kaiser@erlm.siemens.de
[12] Heard C., Gailus M., Zanella F. Propel High-Density Backplane Designs With Up-Front Engineering. – Electronic Design, July, 1990.
[13] AMP Single line model datasheet. Eurocard, Enhanced Type C, 0.100 CL, 3 Row. – http://www.amp.com/products/simulation/scripts/models.asp
[14] Ross B. Practical Issues with IBIS Models. – http://www.eigroup.org/IBIS/pcbeas97.htm
[15] Исаев А.Н., Леонов А.П., Савельев А.В. – Препринт ИФВЭ 2003-25, Протвино, 2003.
[16] Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. /Под ред. Веденеева Г.М. – М.: Радио и связь, 1992.
[17] Цифровые интегральные схемы. Справочник. Глава 4. Микросхемы на основе ЭСЛ. – М.: Радио и связь.

Рукопись поступила 30 ноября 2004 г

А.Н. Исаев и др.
Моделирование импульсных сигналов, передаваемых в магистрально-модульных системах (ММС).

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.
Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 14.12.2004. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 1. Уч.- изд.л. 0,8. Тираж 130. Заказ 344. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2004-47, ИФВЭ, 2004