

Волков Валерий Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖСХЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Специальности:

05.13.05 – элементы устройства вычислительной техники и систем
управления,

05.13.12 – системы автоматизации проектирования
(приборостроение)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2011 г.

Работа выполнена в ОАО "НИИВК им. М.А. Карцева "

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки РФ

Доктор технических наук, профессор

Чудинов Станислав Михайлович

Научный консультант:

Кандидат технических наук,

старший научный сотрудник

Колесников Михаил Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук профессор

Шалумов Александр Славович

доктор технических наук, старший научный

сотрудник Гольдин Виктор Вольфович

Ведущая организация:

Белгородский Государственный

Национальный Исследовательский

Университет (НИУ «БелГУ»)

Защита состоится "__" февраля 2012г. в 12.00 часов на заседании диссертационного Совета Д 217.047.01 в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» (ФГУП НИИАЭ) по адресу: 105187, г. Москва, ул. Кирпичная, д. 39-41 .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП НИИАЭ по адресу 105187, г. Москва, Кирпичная, д. 39-41.

Автореферат диссертации разослан «12» января 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 217.047.01

Доктор технических наук, с.н.с.

Варламов О.О.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Государственную задачу обеспечения информационной безопасности в системах государственного назначения можно решить путем разработки ряда вычислительных устройств на отечественных микропроцессорах, обеспечивающие высокую надежность, информационную безопасность, технологическую независимость и требуемый жизненный цикл их функционирования в составе систем управления. В настоящее время сформировалось научное направление по разработке и проектированию вычислительных устройств для специальных систем. Разработка этих высокопроизводительных устройств в условиях перехода на сигналы субнаносекундного диапазона показала актуальность создания комплексных методов обеспечения целостности сигналов (ЦС) в структурах компьютерных устройств недостаточно охваченные средствами САПР. Кроме того разработка вычислительных устройств показало что обеспечение целостности сигналов на должном уровне является необходимым условием устойчивого функционирования логически верно спроектированных устройств.

Целевое назначение высокопроизводительных устройств определяет, требования к конструктивно-технологическим решениям электронного проектирования, составляющих их модулей и блоков, таких как:

- Максимальное скорость обмена между элементами и модулями;
- Предельная плотность монтажа;
- Значительная удаленность периферийных устройств с большим объемом внешних связей;
- Максимальное энергосбережение;
- Эффективный теплоотвод.

С развитием элементной базы в сторону субнаносекундного диапазона и повышением интеграции логики (многовыводные БИС) эти противоречия резко обострились, что привело к перераспределению удельного веса потерь времени на передачу информации в сторону линий передачи. Т.е. в настоящее время производительность и надежность конечного изделия – ЭВМ определяют именно конструкция и технология **межсхемных соединений**.

Радикальный способ уменьшения влияния коммутирующих цепей на задержку передачи, состоящий в сокращении длины проводников и минимизации искажений формы логических сигналов, зависит от возможности совместной реализации комплекса противоречивых электронных, конструктивных и технологических требований к элементам монтажа:

- Максимальная плотность печатного монтажа;
- Согласование линий связи;
- Однородность всего тракта передачи;
- Высокая степень экранирования сигнальных линий;
- Эффективность фильтрации цепей вторичного электропитания;
- Надежность передачи информации.

Необходимость максимального использования скоростных свойств логических элементов субнаносекундного диапазона вынуждает разработчиков постоянно совершенствовать методы реализации указанных требований с т. з. **сохранения целостности сигналов (ЦС)**. Резервы в этом направлении, заложены в разработке и постоянной модернизации пакета программ математического моделирования переходных процессов при прохождении сигналов в межсхемных соединениях с учетом

конструктивно-технологических характеристик реальных линий связи на всех конструктивных уровнях проектируемого устройства.

Создать глобальную модель системы межсхемных соединений невозможно по трем причинам:

В-первых, высокая степень интеграции не позволяет учесть все неоднородности монтажа, влияющие на степень искажения логических сигналов из-за высокого порядка дифференциальных уравнений эквивалентной схемы;

Во-вторых, невозможно перебрать все комбинации кодов определяющих максимальную помеху монтажа и приводящую к сбою машины;

В-третьих, в одной модели невозможно учесть все физические процессы, искажающие целостность логических сигналов на различных конструктивных уровнях проектируемого устройства, такие как, отражения, интерференция, резонанс, скин-эффект, диэлектрические потери и др.

С другой стороны, методы проектирования линий передачи должны быть основаны на достаточно простых конструктивно-технологических приемах для оперативного принятия проектных решений, т.к. сроки разработки аппаратуры, иногда, оказывают решающее влияние на целесообразность ее использования.

Можно констатировать что информационно-логическое моделирование межсхемных соединений в структурах вычислительных устройств модулей недостаточно охвачено средствами САПР, становится особенно актуальным для современных вычислительных систем.

Таким образом, логично предположить, что решением вышеизложенной проблемы может стать разработка упрощенных, но достаточно точных, инженерных моделей межсхемных соединений на различных уровнях разрабатываемого устройства при дальнейшем синтезе максимальной помехи монтажа на входах логических элементов что определяет тему диссертационного исследования.

Подпрограммы математического моделирования межсхемных соединений должны являться составной частью системы сквозного проектирования цифровых устройств (САПР).

Исключительно важное значение приобрела проблема обеспечения высокой надежности и готовности вычислительных систем, работающих в составе различных систем, особенно при работе, в режиме реального времени. Эта проблема решается на основе использования **принципа избыточности**, который ориентирует также на построение многомашинных или многопроцессорных вычислительных комплексов (МПВК). Появление дешевых и небольших по размерам микропроцессоров и микро-ЭВМ облегчило построение и расширило область применения многопроцессорных и многомашинных вычислительных средств (ВС) разного назначения.

МПВК на основе коммутационной матрицы представляют собой классическое построение кластерной структуры. Исследования надежности кластеров получили широкое распространение в последнее время. Однако, использование методов расчета надежности кластеров для исследования надежности МПВК необходимо наличие методики прогнозирования надежности узлов кластера.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является анализ, разработка и контроль эффективности методов математического моделирования переходных процессов протекающих в межсхемных соединениях при проектировании современных высокопроизводительных вычислительных устройств.

В соответствии с этим были определена необходимость решения научных задач:

1. Математическое моделирование конструкции и технологии сверхплотного печатного монтажа с целью формирования ограничений на конструктивные и электрические параметры линий связи, а также прогнозирования временных потерь передачи.

2. Моделирование переходных процессов в шинах электропитания ЭВМ с целью оптимизации конструкции и параметров элементов «развязки» индуктивности общих шин.

3. Исследование искажений формы импульсных сигналов в «длинных» линиях передачи с потерями с целью формирования требований к конструктивным и электрическим параметрам интерфейсных каналов включая рекомендации по использованию типа согласования, в том числе схем последовательного параллельного согласования, параллельного согласования по переменному току, дифференциального согласования и др.;

4. Разработка метода экспериментальной диагностики запаса помехоустойчивости логических цепей и прогнозирования наработки на сбой устройств и блоков цифровой техники.

Объектом исследования являются высокопроизводительные вычислительные устройства и технология автоматизации проектирования в межсхемных соединениях для обеспечения функциональной надежности устройств вычислительной техники.

Методы исследования базируются на аналитических расчетах с использованием физических законов электродинамики, компьютерном моделировании электромагнитных процессов в цепях вычислительных устройств, экспериментальном анализе распространения сигналов в образцах разработанных модулей.

В диссертации получены следующие основные результаты характеризующиеся научной новизной

- Научно обоснована разработанная автором система электронного проектирования межсхемных соединений для обеспечения целостности сигналов на всех конструктивных уровнях при проектировании высокопроизводительных вычислительных устройств.

- Предложен метод анализа конструкции и технологии печатного монтажа на целостность сигналов субнаносекундного диапазона и скорость передачи.

- Разработана методика разбиения эквивалентной схемы системы электропитания на простейшие контура второго порядка с целью моделирования переходных процессов по цепям питания логических элементов.

- Предложена модель длинной линии передачи с потерями с целью анализа искажений импульсных сигналов любой формы.

- Научно обоснованный подход инженерных испытаний опытных образцов высокопроизводительных устройств, направленный на прогнозирование вероятности сбоя в заданное время с целью повышения функциональной надежности серийной техники.

Практическая значимость исследования. Результаты исследований выполненных по теме диссертации, использованы при проведении ОКР «Разработка базовых технологий моделирования, проектирования, диагностики и вычислительных комплексов высокой производительности, радиоэлектронных систем различного назначения», шифр «Аппарат-С».

В процессе диссертационной работы была создана техническая библиотека, содержащая технические указания и руководства для разработчиков вычислительных систем в области проектирования межсхемных соединений цифровых схем.

Предложенные методы электронного проектирования межсхемных соединений позволяют прогнозировать вероятную помеху монтажа, а следовательно повысить надежность вновь разрабатываемых вычислительных средств путем наложения ограничений на конструкцию и технологию линий связи.

Достоверность и обоснованность подтверждена проведенными в работе расчетами, аналитическими и эмпирическими данными, разработкой алгоритмов и программ моделирования для электронного проектирования межсхемных соединений вычислительных устройств.

Разработанная методология, комплекс моделей и технологий базируется на фундаментальных положениях ряда научных дисциплин.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы изложены в ряде печатных публикаций, докладывались на всероссийских и вузовских научных конференциях, в частности на Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двенадцатого научно-практического семинара.-МИЭМ. М., 2009, Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям. Россия, Черноморское побережье, Геленджик-Дивноморское, 2-9 сентября 2011 года, Второй Международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и технологии», Белгород 3-5 октября 2011г., Научные конференции молодых специалистов ОАО «НИИВК им. Карцева М.А.» г. Москва 23-24 ноября 2011г.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 11 публикациях автора, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях. Общим объемом публикаций - 3,0 п.л., из которых 2,09 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Список литературы составляет 112 наименований. Объем диссертации составляет 140 страниц, включая рисунки и таблицы.

На защиту выносятся:

1. Комплексная система информационного, логического моделирования переходных процессов в межсхемных соединениях при проектировании устройств на базе современных высокопроизводительных микропроцессоров.

2. Метод комплексной оценки влияния конструктивно-технологических неоднородностей МПП на скорость и помехозащищенность при передаче сигналов субнаносекундного диапазона. Использование итерационного метода подгонки волнового импеданса печатных линий позволяет ограничить конструктивные параметры МПП на оптимальном уровне, максимально сохраняя однородность тракта передачи.

3. Методика разбиения полной эквивалентной схемы системы разводки электропитания ЭВМ на простейшие контура второго порядка, с целью моделирования помехи по питанию при массовом переключении логики. Применение методики микромоделей позволяет учесть максимальное количество паразитных индуктивностей при расчете максимальной помехи монтажа

4. Методика инженерного экспресс-анализа искажений импульсов в длинных линиях передачи с потерями. Разработанные на базе данной методики модели однофазной и дифференциальной передачи позволяют количественно оценить качество связи, в том числе предельную скорость передачи при выбранном типе кабельной линии или допустимую длину линии при фиксированной скорости передачи, а также допустимый «Процент дрожания» (Jitter) информационных импульсов, детектируемых схемой-приемником. Простой алгоритм количественной оценки предельной скорости дифференциальной передачи учитывает, как параметры передаваемых сигналов, так и конструктивные и электрические параметры самого канала передачи.

5. Методика экспериментальной диагностики уровня внутренних помех в межсхемных соединениях, позволяющая прогнозировать вероятность наработки на сбой при испытании опытных образцов вычислительной техники.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность проблемы, проводится анализ современного состояния и тенденций развития в конструировании межсхемных соединений с т. з. целостности информационных сигналов. Сформулированы основные требования к элементам конструкции и технологии межсхемных соединений, определяющим скоростные свойства проектируемых ЭВМ. Обоснованы основные направления развития методов информационного, логического моделирования печатных и кабельных линий связи.

В первой главе предпринята попытка исследовать влияние конструкции и технологии многослойного печатного монтажа с прецизионными сигнальными проводниками и контролируемым волновым импедансом на потери времени при передаче импульсных сигналов с целью обоснования конструктивных и технологических ограничений на печатные линии связи.

Качество передачи импульсных сигналов между логическими элементами субнаносекундного диапазона можно полностью описать с помощью четырех вторичных параметров нагруженной линии:

- Собственный волновой импеданс сигнальной линии (Z_0);
- Погонная задержка сигнала в линии связи (T_0);
- Коэффициент связи соседних линий ($K_{с\bar{с}}$);
- Коэффициент затухания гармонического сигнала в линии с потерями (α_0).

Условиями неискаженной передачи импульсных сигналов являются:

- Равенство волнового и согласующего импедансов линии связи ($Z_0 = R_{с\bar{с}}$);
- Отсутствие связи соседних линий ($K_{с\bar{с}} = 0$);
- Отсутствие потерь в меди проводников и диэлектрике ($\alpha_0 = 0$);

На практике эти условия не выполняются по объективным причинам.

Волновое сопротивление каждой линии воспроизводится с конечным разбросом, как с конструктивным, так и с технологическим.

Электромагнитная связь соседних линий зависит только от расстояния и импеданса, чем ближе линии и больше импеданс, тем больше коэффициент связи.

Потери электромагнитной энергии в меди проводников из-за скин-эффекта носят частотно-зависимый характер, следовательно, частотные составляющие спектра импульса затухают с разной интенсивностью, что приводит к завалу фронтов логических сигналов.

В настоящее время наиболее технологичным видом монтажа ячеек ЭВМ является многослойный печатный монтаж с прецизионными сигнальными проводниками и контролируемым волновым импедансом.

В многослойной печатной плате (МПП) линии связи реализуются с помощью симметричной полосковой структуры. Данная структура образует логическую пару, содержащую два ортогональных, сигнальных слоя (X, Y) между экранами или электрически хорошо связанными с «землей» низкоиндуктивными слоями питания.

Количество логических пар ограничено возможностями технологии МПП при металлизации сквозных отверстий и регламентируется отношением толщины МПП к диаметру металлизированных отверстий.

Вторичные высокочастотные характеристики идеальной, симметричной полосковой структуры определяются конструктивными и электрическими параметрами МПП:

- Толщина полосковой линии (H);
- Ширина сигнальной линии (W);
- Толщина полоски (T);
- Диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита (ϵ_r);

Любое нарушение однородности полосковой линии приводит к изменению волнового сопротивления и удельной задержки распространения сигнала.

Реальные печатные проводники имеют ряд конструктивно неизбежных неоднородностей, к основным из которых можно отнести:

- Асимметрия центральной полоски относительно экранов ($h_1/H \neq 0,5$);
- Ширина экранирующей сетки ($W_{\text{Э}}$);
- Смещение слоев относительно координатной сетки (S);
- Шаг сигнальных проводников (d);
- Емкость перекрестий соседнего слоя;
- Емкость и индуктивность сквозных отверстий;
- Емкость контактных площадок и входные емкости элементов.

Дополнительная емкостная нагрузка на линию, обусловленная такими конструктивно неизбежными неоднородностями, как ортогональный слой, переходные отверстия, контактные площадки, входные емкости элементов снижает эффективное волновое сопротивление идеальной линии, увеличивает задержку и затухание сигналов. Причем, это влияние на каждую линию не регулярно, а следовательно, приводит не только к изменению среднего значения отдельного параметра, но и к увеличению его **конструктивного разброса**.

Кроме того, каждый из перечисленных, конструктивных параметров в серийном производстве воспроизводится с конечной точностью, следовательно, и результирующие высокочастотные параметры печатных линий будут воспроизводиться с конечной точностью (**технологический разброс**).

По указанным причинам вторичные электрические характеристики печатных линий связи носят случайный характер. Допустимая величина суммарного разброса каждого из электрических параметров зависит от требуемого быстродействия проектируемого устройства и типа элементной базы.

На этапе проектирования МПП конструктивно-технологический анализ печатного монтажа по критериям качества передачи импульсных сигналов включает решение следующих задач:

- Обоснование номинального значения и допустимого разброса волнового импеданса сигнальных линий;

$U_{\text{пг}}$

0,5

- Расчет предельных значений геометрии печатных проводников (толщина логической пары, минимальный зазор соседних линий и др.);
- Оценка конструктивного разброса волнового сопротивления сигнальных линий;
- Оценка приращения задержки передачи импульсов из-за конструктивно-технологического разброса волнового сопротивления линий связи;

Допустимый разброс волнового импеданса линий.

Максимальное влияние разброс волнового сопротивления на искажение импульсных сигналов оказывает в случае применения электрически длинных линий, когда двойной пробег сигнала превышает фронт импульса ($2T_0 l > t_{\phi}$).

Показано, что при переходе с ячейки на ячейку (Рис.1) наличие разброса волнового сопротивления линий может привести к потере времени передачи равному двойному пробегу сигнала между элементами, что в критических связях недопустимо.

Рис.2 Переходной процесс на входе первой схемы-приемника (U1).

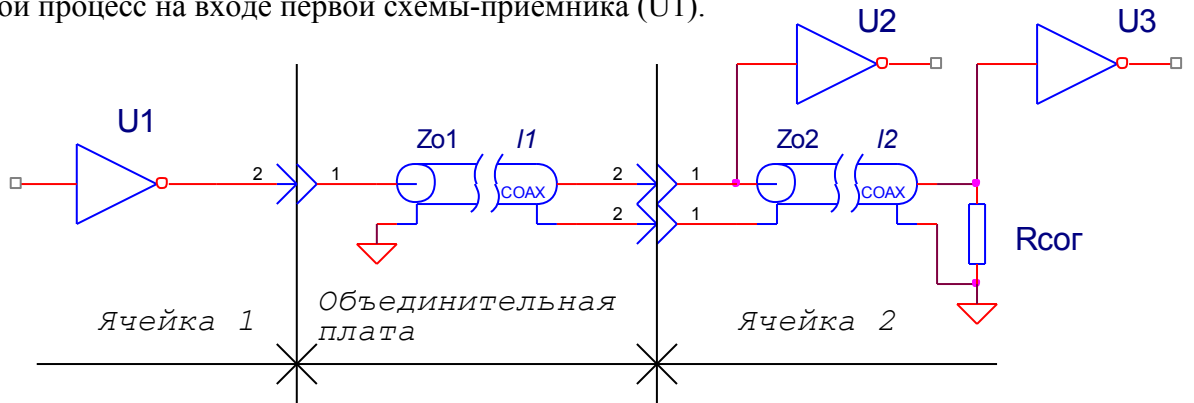
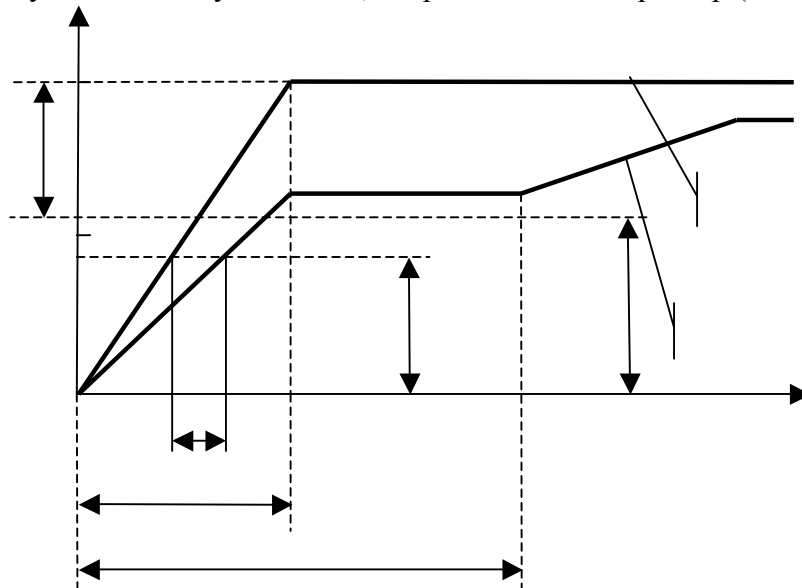


Рис. 1. Неоптимальный тип связи двух ячеек.

Предположим, $Z_{01} = Z_0 + \Delta Z_0$, $Z_{02} = Z_0 - \Delta Z_0$, где: Z_0 – номинальное значение волнового сопротивления полосковых линий, ΔZ_0 – половина поля допуска на волновое сопротивление линий, причем, $2T_0 l_{1,2} > t_{\phi}$.

При этих условиях, переходной процесс от воздействия перепада на входе первой схемы-приемника будет иметь ступенчатый, аperiodический характер (Рис. 2).



Относительная амплитуда первого отраженного импульса, равная коэффициенту отражения ($K_{отр}$) сигнала от участка линии с волновым сопротивлением Z_{02} , определяет крутизну первой ступеньки, а следовательно и приращение задержки сигнала (Δt_3), а также временную потерю помехозащищенности.

Если коэффициент отражения больше относительной помехозащищенности (NM^B), то дополнительные потери времени на передачу сигналов составят величину двойного пробега сигнала в линии ($2T_0 l_1$). Для максимального использования скоростных свойств элементной базы такие потери недопустимы т.к. они могут достигать 40 нс и более.

Отсюда следует основное ограничение на разброс волнового сопротивления печатных линий:

$$U_{ном.мах}/U_{лог} + K_{отр} < U_{пу}/U_{лог}$$

где: $U_{ном.мах}/U_{лог}$ – суммарная помеха монтажа;

$$K_{отр} = (Z_{02} - Z_{01}) / (Z_{02} + Z_{01}) = \delta Z_0.$$

В соответствии со спецификацией, помехозащищенность элементной базы составляет (20-25)% от логического перепада, поэтому целесообразно ограничить допустимый разброс волнового сопротивления печатных линий величиной не более 15%.

При таком ограничении на точность воспроизводимости волнового сопротивления серийном производстве МПП приращение задержки передачи составит часть фронта импульса:

$$\Delta t_3 = \frac{U_n^x}{U_{лог}} \cdot \frac{t_{\phi} \delta Z_0}{(1 - \delta Z_0)}$$

что вполне удовлетворяет требованиям межсхемных соединений.

Конструктивный «уход» волнового импеданса линий

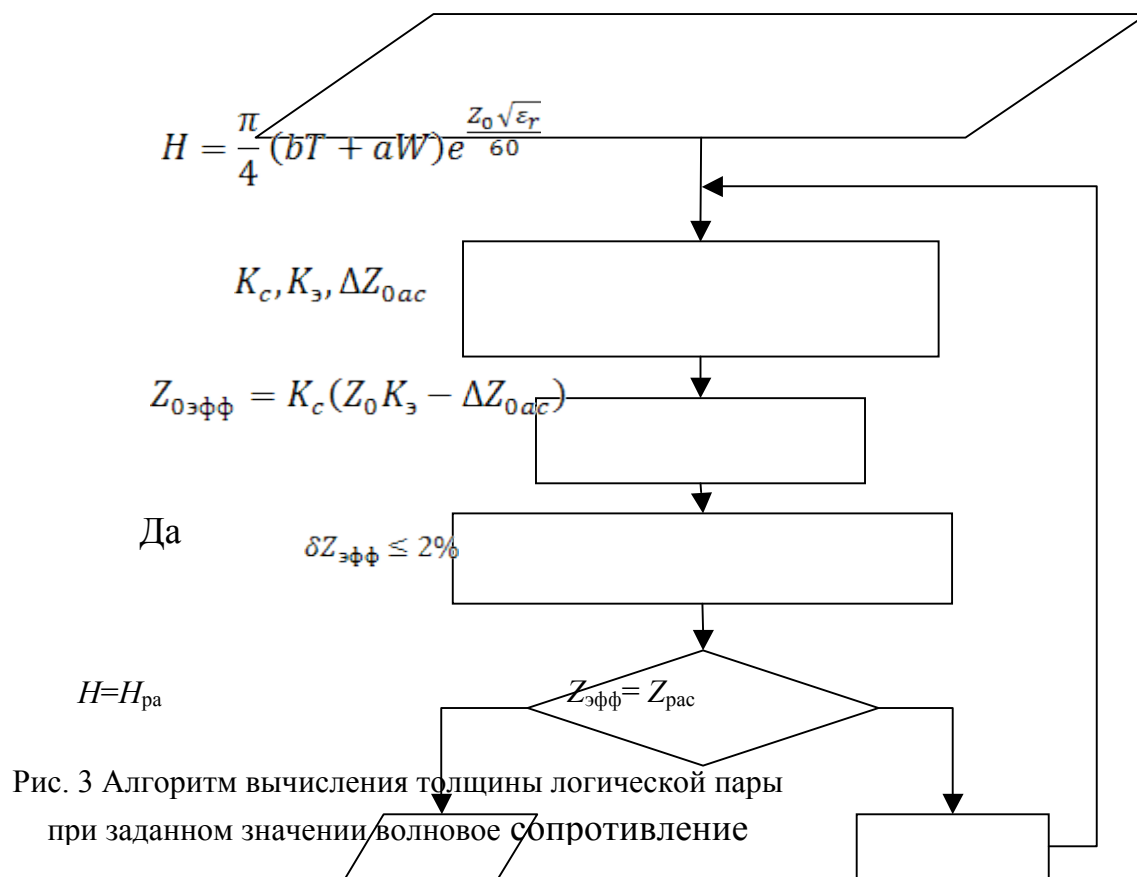
В работе получено выражение для расчета волнового сопротивления полосковой структуры в условиях неоднородностей, который имеет вид:

$$Z_{0\phi\phi} = K_c (Z_0 K_3 - \Delta Z_{0ac}).$$

Итерационный алгоритм расчета толщины полосковой структуры представлен на Рис. 3. Рассчитанная таким образом полосковая структура будет иметь эффективное волновое сопротивление, равное заданному, номинальному значению.

Ввод данных ($W, W \approx h1, h2, T, d, \epsilon_r, Z_0$)

$$Z_{рас} = Z_0$$



Конструктивно-технологический разброс волнового импеданса линий

Качественной характеристикой качества технологического процесса МПП является вид закона распределения волнового сопротивления сигнальных линий, а величина его разброса, соответственно, **количественной характеристикой**.

Прогнозирование параметров законов распределения высокочастотных характеристик сигнальных линий является конечной задачей допускового анализа при производстве печатных плат.

На рис. 4. представлены экспериментальная гистограмма распределения волнового сопротивления линий в партии тест-плат и описывающий ее нормальный закон распределения. Здесь же показана расчетная кривая закона распределения, полученная Методом Моментов.

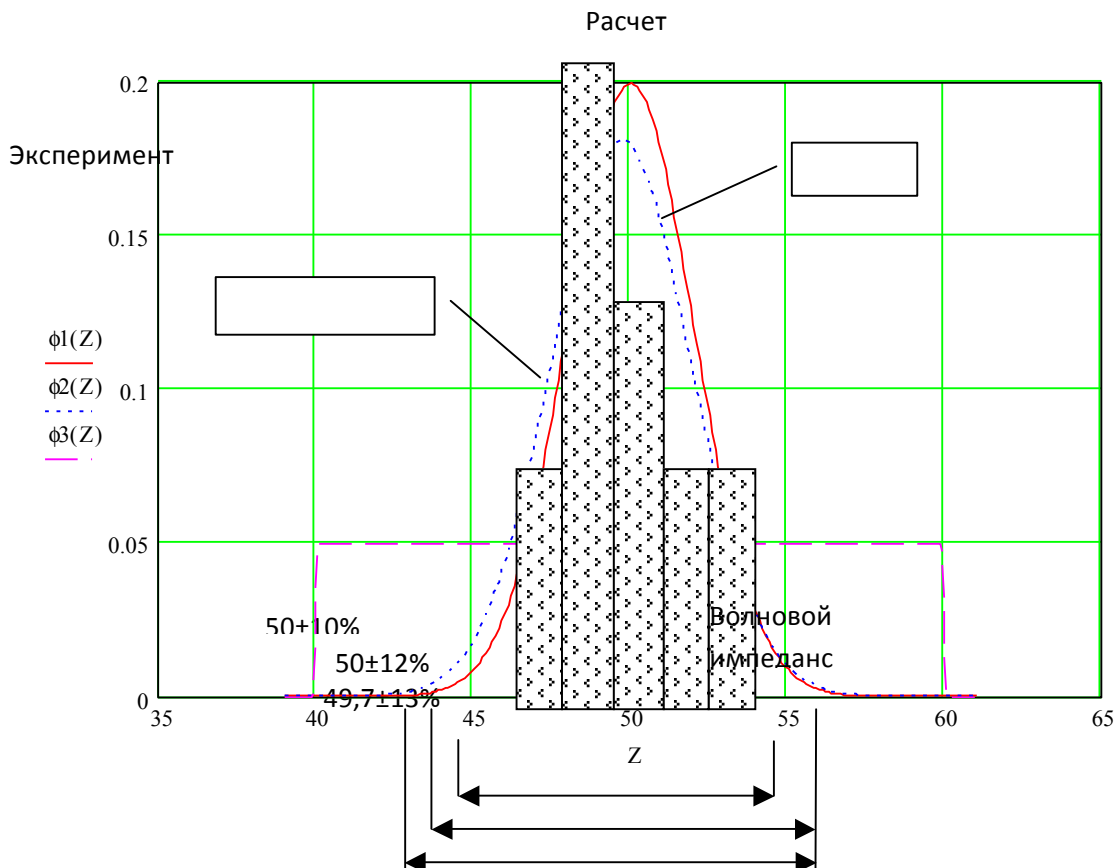


Рис. 4. Сравнение экспериментального и теоретического распределений.

Таким образом, в пределах доверительного интервала среднее значение и дисперсия совпадают, что подтверждает высокую достоверность прогноза.

Вторая глава посвящена электронному проектированию шины разводки электропитания узлов и блоков вычислительных средств при групповом срабатывании логических элементов высокопроизводительных цифровых устройств на базе математических моделей простейших контуров второго порядка.

Моделирование переходных процессов в шинах электропитания можно проводить различными способами, например:

- Электронное макетирование;
- Машинное моделирование полной эквивалентной схемы системы;
- Машинное моделирование отдельных уровней «развязки» по упрощенной эквивалентной схеме;
- Оценочный расчет параметров помехи по питанию по приближенным формулам;

Приведенные методы перечислены в порядке убывания стоимости и увеличения доступности.

Машинное моделирование полной эквивалентной схемы позволяет избежать значительных материальных затрат на физическое макетирование реальных цифровых систем. Недостатком этого метода являются значительные временные затраты на описание полной эквивалентной схемы при анализе различных вариантов построения шин

Аналогично можно разбить на контура моноплатный (модульный) конструктив, в котором, ячейкам будут соответствовать планарные модули процессоров (БИС, ПЛИС), объединенные многослойной печатной платой (МПП).

Наиболее высокочастотные контура расположены вдали от источников питания, в непосредственной близости от схем-потребителей, представляющих для контуров генераторы перепадов тока с конечными фронтами.

При импульсном воздействии тока в контуре возбуждаются колебания напряжения с частотой примерно равной резонансной частоте контура $\omega_0 = 1/\sqrt{(L_{e\ddot{a}d}/N_{e\ddot{a}d}) \times \tilde{N}_{r\ddot{e}}}$ и амплитудой пропорциональной волновому сопротивлению контура $Z_0 = \sqrt{(L_{e\ddot{a}d}/N_{e\ddot{a}d})/\tilde{N}_{r\ddot{e}}}$. Данную цепь можно рассматривать независимо от остальной схемы, если модуль емкостного сопротивления керамических конденсаторов на резонансной частоте контура много меньше волнового сопротивления, т.е. если выполняется неравенство: $|X_{C_{кер}}| = 1/|j\omega_0 C_{кер} N_{кер}| \ll Z_{0вч}$. После подстановки и преобразования неравенство упрощается: $C_{кер} \gg C_{пл}$, что всегда выполняется, если подводка питания до логики осуществляется с помощью пары сплошных, соседних слоев МПП. В этом случае, анализ ВЧ контура можно проводить по упрощенной схеме (Рис. 5).

Суммарная емкость керамических конденсаторов представляет собой емкостную реактивность в более низкочастотном контуре, который относится к следующей ступени «развязки» и включает в себя индуктивность питающих контактов соединителя ячейки (модуля) (СЧ – контур).

Для того, чтобы рассматривать эту цепь, как независимую, необходимо выполнение следующих условий:

Во-первых, резонансная частота СЧ контура должна быть достаточно низкой, для того, чтобы индуктивное сопротивление выводов конденсаторов не оказывало влияния на параметры переходного процесса, что соответствует:

$$|X_{L_{кер}}| = |j\omega_0 L_{кер}/N_{кер}| \ll Z_{0сч} = \sqrt{L_{соед}/(C_{кер} \cdot N_{кер})}. \text{ В практических схемах}$$

это неравенство всегда выполнимо, т.к. индуктивность соединителя на один – два порядка больше эквивалентной индуктивности выводов керамических конденсаторов.

Во-вторых, собственная резонансная частота СЧ - контура должна быть достаточно высокой, чтобы емкостное сопротивление конденсаторов на объединительной плате не оказывало влияния на работу контура. Это условие безусловно выполняется если на объединительной плате применяются танталовые чип-конденсаторы.

Наиболее низкочастотный контур (НЧ) образуется паразитными параметрами блочных шин питания – индуктивностью и активным сопротивлением, а также параметрами электролитических конденсаторов – суммарной емкостью и активным сопротивлением электролита. В данном случае ни одним паразитным параметром пренебречь нельзя, т.к. их величина соизмерима с волновым сопротивлением НЧ - контура.

Результирующий переходной процесс представляет собой суперпозицию переходных процессов в каждом из трех контуров. Момент суммирования зависит от алгоритма выполняемой программы.

Для каждого из контуров получены аналитические выражения описывающие переходные процессы в них при возбуждении импульсами тока с конечной длительностью фронта.

На рис. 6 представлена расчетная кривая переходного процесса в высокочастотном контуре при групповом срабатывании КМОП элементов. Программа анализа цепей питания автоматически вычисляет максимальную амплитуду и длительность помехи питания.

Форма переходного процесса после окончания фронта, но до окончания импульса рассчитывается, как разность функций:

$$K_{\text{лин}}(t_{\phi} \leq t < 2t_{\phi}) = K_{\text{лин}}(t) - 2K_{\text{лин}}(t - t_{\phi}).$$

После окончания действия импульса переходной процесс представляет собой суперпозицию трех функций (рис. 6):

$$K_u(t > 2t_{\phi}) = K_u(t) - 2K_u(t - t_{\phi}) + K_u(t - 2t_{\phi}).$$

Особенность воздействия на параллельный контур импульса треугольной формы - размах колебаний после спада может превышать амплитуду первой полуволны, что определяется соотношением фронтов и периода колебаний.

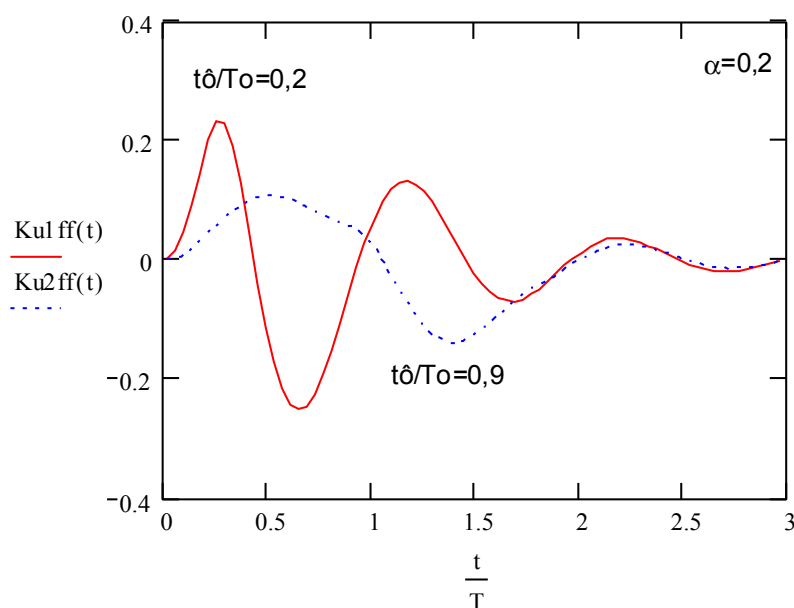


Рис. 6. Реакция параллельного контура на импульс тока треугольной формы (КМОП-логика).

В рамках работы разработана программа анализа цепей питания (ПАЦП).

Основной задачей программы **Analysis Power (ПАЦП)** является, обеспечение математической базы для оптимизации конструктивно-технологических параметров цепей электропитания ВПМ включая:

- Емкость слоев питания и «земли» базового конструктива ячейки;
- Количество и номинал фильтрующих конденсаторов базового модуля;
- Количество пар контактов питания и «земли» разъемного соединителя;
- Количество и номинал электролитических конденсаторов на объединительной панели.

Программа позволяет моделировать переходные процессы, развивающиеся на шинах электропитания импульсных устройств в режиме осциллографа, а также степень их влияния на задержку и помехозащищенность сигнальных линий передачи.

Графический интерфейс информирует разработчика о вероятной величине и длительности помехи по цепям электропитания.

Предварительный выбор параметров конструкции. Каждый блок может работать независимо друг от друга. Такое построение программы позволяет анализировать цепи электропитания устройств, как ячеечной, так и модульной конструкции, включая моноплатный конструктив.

Все три модуля имеют, примерно, одинаковую структуру (Рис. 7):

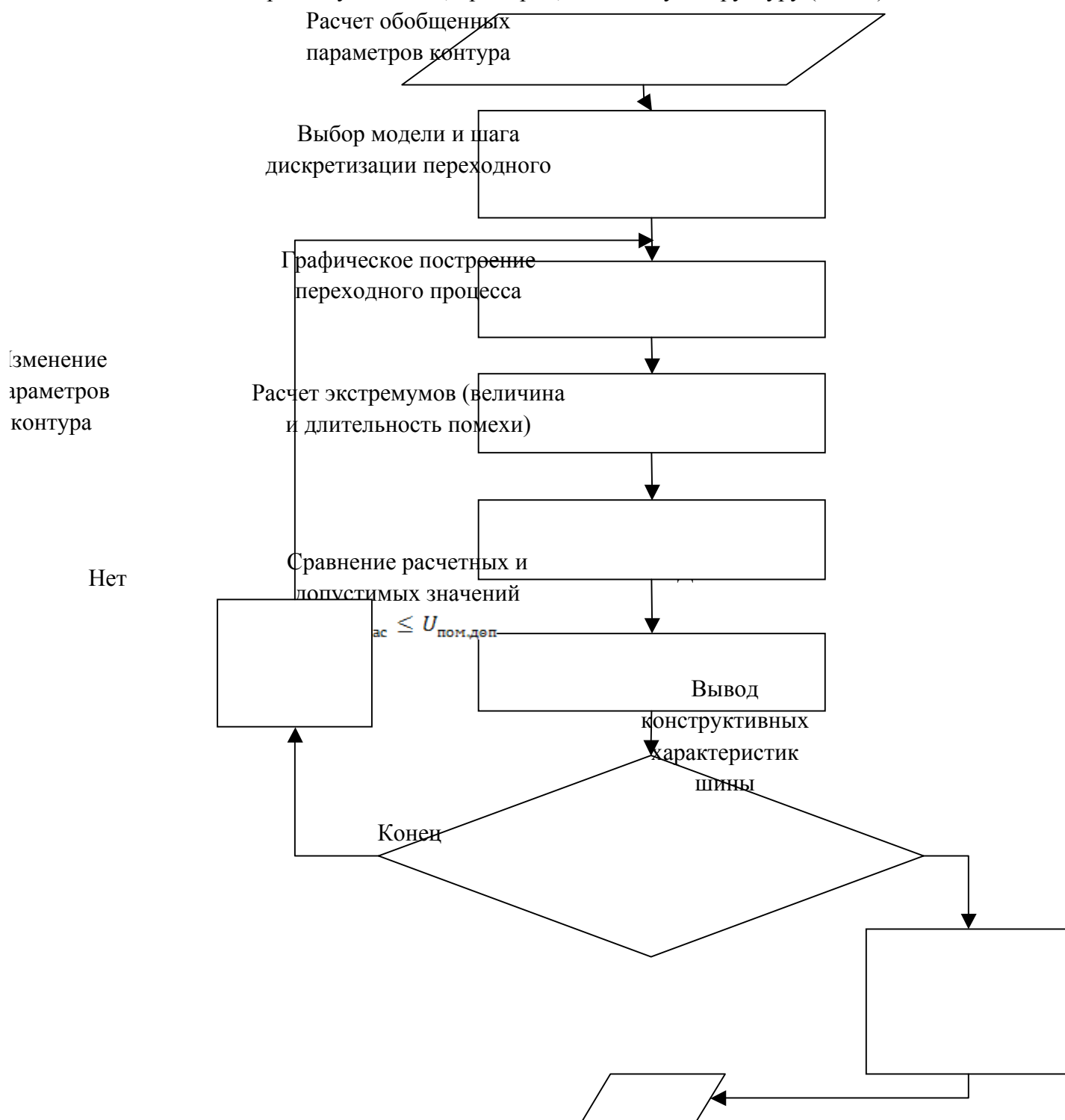


Рис. 7. Блок-схема процедуры анализа переходных процессов в цепях питания цифровых устройств.

В третьей главе сформулированы основные факторы, определяющие скорость обмена между удаленными устройствами вычислительных комплексов. Анализируется точность существующих и предлагаемых моделей линий передачи с потерями.

На уровне интерфейсных связей разработчика интересует пропускная способность и габаритные размеры конкретного типа кабельной линии.

Фирмы-производители дифференциальных приемо-передатчиков декларируют предельные скоростные возможности интерфейсов исходя из результатов экспериментальных исследований макетов линий передачи, построенных в лабораторных условиях.

Разработчик быстрых каналов связи должен оперировать более объективным инструментом прогнозирования скорости передачи.

Таким инструментом может быть математическая модель дифференциальной передачи, обеспечивающей расчет переходного процесса на входе приемника с точностью не хуже (5-7)% при любых габаритах проводников.

Для контроля процессов протекающих в длинных печатных линиях разработчик, прежде всего, должен обладать инструментом моделирования искажений импульсных сигналов с учетом активных и реактивных потерь в меди проводников с учетом **скин-эффекта** и реактивных потерь в диэлектрике.

Влияние активных и реактивных потерь приводит к частотной зависимости электрических параметров эквивалентной схемы замещения длинной линии, а именно $R \cong f(\omega)$ и $L \cong f(\omega)$. В результате, при передаче происходит нелинейный «завал» фронта импульсного перепада, уменьшение амплитуды одиночных и пачек импульсов, т.е. нарушается целостность информационных сигналов.

Программа анализа длинных линий (ПАДЛ) позволит обосновать количественные ограничения на сечение и длину печатных проводников в критических связях, обеспечивающих надежную прием-передачу логических сигналов, в пределах МПП.

Передача импульсных сигналов с высокой частотой следования в согласованном кабеле сопровождается «затягиванием» фронтов и уменьшением амплитуды импульсов. Причем, фронт логического сигнала на конце линии связи становится существенно нелинейным, в первую очередь, из-за частотной зависимости коэффициента затухания, определяемой скин-эффектом.

Возникающие в результате деформации импульса, дополнительная задержка и потеря помехозащищенности зависят от пяти основных факторов:

- геометрических размеров линии передачи;
- фронта логического сигнала;
- выходных и пороговых уровней приемо-передатчиков;
- типа передачи (однофазная, парафазная);
- типа согласования линии (последовательное, параллельное).

Применение субнаносекундной логики и особенно прецизионных, полосковых линий печатных плат, а также субминиатюрных кабелей вынуждает при проектировании трактов связи в первую очередь учитывать импульсные параметры передачи:

- время установления фронта логического перепада до порогового уровня приемного элемента;
- динамическое уменьшение амплитуды пачки импульсов;
- расширение (обужение) импульсов;
- разброс задержек сигналов в кабельном жгуте.

Например, применение миллиметрового кабеля РК50-1-24 для передачи сигналов на расстояние 20 м приводит к уменьшению темпа передачи из-за потерь электромагнитной энергии в проводниках, более, чем на 20% по сравнению с «чистой»

задержкой линии ($T = T_0 l = 5 \cdot 20 = 100 \text{ нс}$). Аналогичные потери происходят в прецизионных полосковых линиях шириной менее 0,3 мм в многослойных печатных платах размером 400x400 мм.

Приближенное выражение переходной характеристики согласованной линии передачи (при $t_{\phi}=0$) предложено в [1] и имеет вид:

$$h(t) = \frac{u(t)}{U_{\text{лог}}} = 1 - \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}} \quad (1)$$

где: $\operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}}$ – интеграл вероятности (функция Крампа),

$$\vartheta = \frac{4t}{l^2 M^2}, \quad M \left[\frac{\sqrt{\text{нс}}}{\text{м}} \right] = 2,05 \frac{\alpha [\text{дБ/м}]}{\sqrt{f [\text{МГц}]}}$$

α – затухание гармонического сигнала в линии, рассчитанное или измеренное на частоте f

$U_{\text{лог}}$ – значение логического перепада в начале линии.

При конечном фронте входного перепада напряжения переходной процесс в конце линии передачи можно описать выражением:

$$\begin{cases} H(t \leq t_{\phi}) = \frac{2}{\vartheta_{\phi}} A(\vartheta) \\ H(t > t_{\phi}) = \frac{2}{\vartheta_{\phi}} [A(\vartheta) - A(\vartheta - \vartheta_{\phi})] \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{где: } \vartheta_{\phi} = \frac{4t_{\phi}}{l^2 M^2}, \quad A(\vartheta) = \left(1 + \frac{\vartheta}{2}\right) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}}\right) - \sqrt{\frac{\vartheta}{\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{\vartheta}}$$

Выражения (1), (2) справедливы в ограниченном частотном диапазоне и найдены при следующих допущениях:

а) Потерями в диэлектрике можно пренебречь при передаче импульсов со спектром шириной до ~500 МГц. Влияние диэлектрика на форму импульса заметно на низких (неинформативных) уровнях переходной характеристики.

б) В нижней части спектра рабочий диапазон выражений (1), (2) ограничен двумя факторами. Предполагается, что внешняя индуктивность (контур прямой – обратный проводник), зависящая только от геометрических размеров линии, существенно больше внутренней индуктивности каждого проводника, зависящей кроме геометрических размеров также и от частоты, т.е. $L_{\text{внут}}/L_{\text{внеш}} \ll 1$ и внутренней индуктивностью проводников можно пренебречь. Для большинства радиочастотных кабелей это условие выполняется для частот уже более (0,5-1,0) КГц.

Кроме того, предполагается, что омическое сопротивление проводников прямо пропорционально корню квадратному из частоты, т.е. на постоянном токе сопротивление равно нулю. В действительности, переходной процесс стремится к единице только при последовательном согласовании. При параллельном, наиболее распространенном согласовании установившееся значение равно напряжению делителя:

$$K = R_{\text{сог}} / (R_{\text{сог}} + R_0 l) < 1,$$

где: $R_{\text{сог}}, R_0$ – соответственно согласующее и погонное сопротивление линии.

Попытка повысить точность вычислений путем суммирования частотно зависимого сопротивления и сопротивления на постоянном токе приводит к еще более существенной ошибке расчета, но уже в области высоких частот на малых уровнях переходного процесса. Экспериментальные исследования переходного процесса показали, что для большинства радиочастотных кабелей влияние сопротивления проводников на постоянном токе заметно лишь с уровнем $0,95K$ и выше.

Таким образом, для параллельного согласования выражения (1), (2) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} h_{\text{пар}}[t, h(t) \leq 0,95] = h(t) \\ h_{\text{пар}}[t, h(t) > 0,95] = Kh(t) \end{cases} \quad (3)$$

Выражение (1), (2), (3) описывают переходной процесс на конце согласованной линии передачи с потерями при возбуждении ее перепадом напряжения с конечной длительностью фронта (рис. 8). С их помощью при использовании теоремы запаздывания можно описать реакцию линии на импульсы, практически, любой формы.

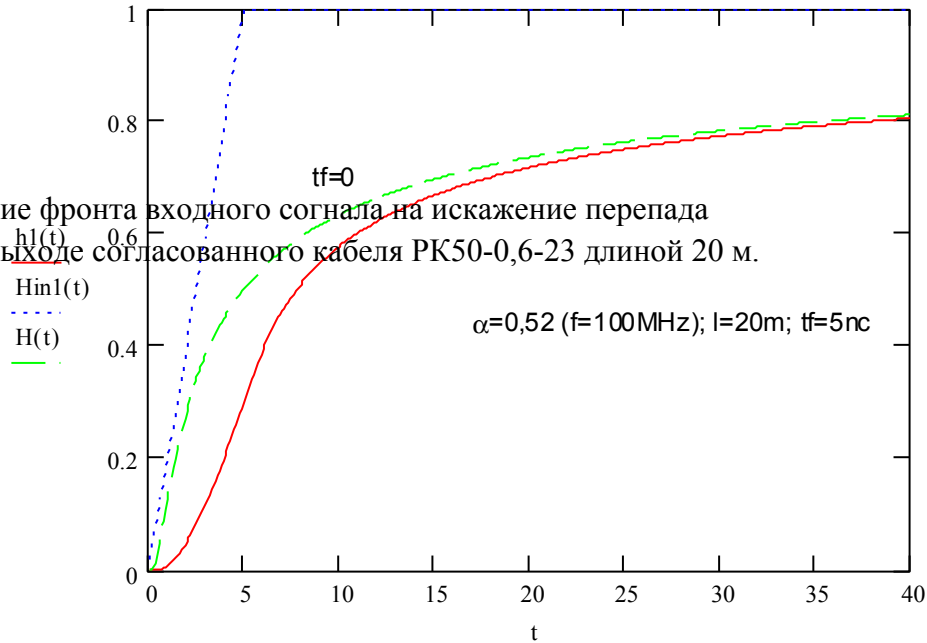


Рис.8. Влияние фронта входного сигнала на искажение перепада напряжения на выходе согласованного кабеля РК50-0,6-23 длиной 20 м.

Передача пачки импульсов, также, сопровождается характерными видами искажений, основное из которых – динамическая потеря помехозащищенности (Рис. 9).

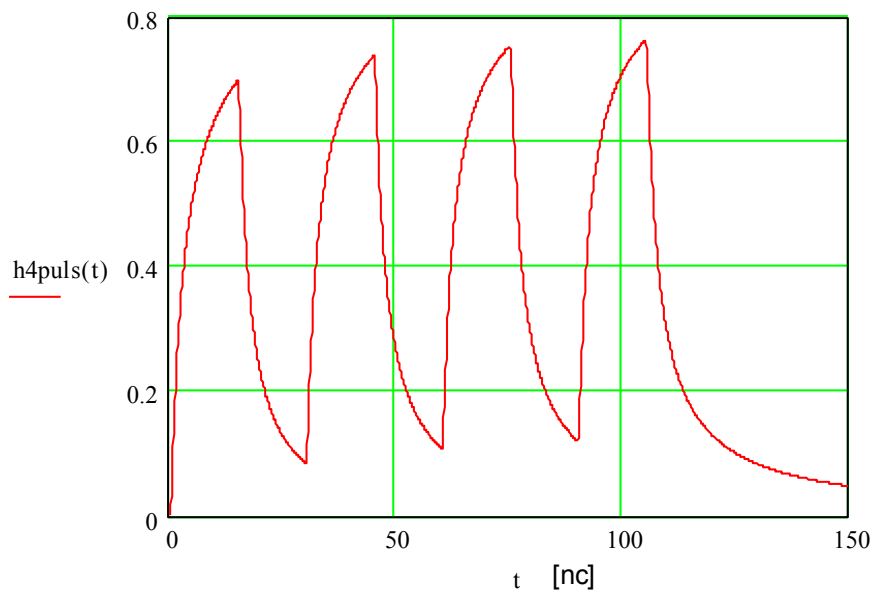


Рис.9. Искажение «пачки» из 4-х импульсов длительностью 15 нс и скважность 2 на выходе согласованного кабеля РК50-0,6-23 длиной 20 м.

В «пачке» из 4-х импульсов наблюдается автосмещение последних импульсов к среднему уровню, а в наихудших условиях с т. з. помехозащищенности оказывается первый импульс.

При бесконечном увеличении число импульсов в пачке со скважностью $\gamma=2$ (периодическая последовательность) переходной процесс устанавливается симметрично относительно среднего уровня выходного перепада напряжения.

Представленные примеры иллюстрируют важность предварительного моделирования трактов передачи на этапе электронного проектирования вычислительных комплексов.

В четвертой главе предлагается метод экспериментальной диагностики запаса помехоустойчивости логических цепей и прогнозирования наработки на сбой устройств и блоков цифровой техники.

Надежность обработки информации, в общем случае, определяется тремя факторами:

- Полный или частичный отказ логических элементов;
- Эксплуатационные дефекты элементов конструкции межсхемных соединений (разъемы, согласующие элементы, кабельные каналы и др.);
- Соотношение между уровнем импульсных помех и запасом помехоустойчивости примененной логики.

Отказы в коммутационной матрице также как и отказы оперативной памяти целесообразно маскировать применением кодов, корректирующих ошибки (например, коды Соломона).

Наиболее сложны для обнаружения и восстановления информации отказы процессоров, однако в случае наличия 100% аппаратного самоконтроля или при периодическом прогоне на каждом процессоре контрольных тестов, задача обнаружения решается довольно легко. Восстановление вычислительного процесса состоит в исключении операционной системой отказавшего процессора из списка доступных и запуске на другом процессоре пострадавшего процесса с последней контрольной точки (технология контрольных точек – snapshots). В соответствии с этой технологией в системе должна присутствовать *стабильная память*, для которой гарантируется, что состояние памяти не меняется при отказах. В случае отказа записанная информация используется для того, чтобы повторить вычисления с момента, когда была записана эта информация. В качестве стабильной памяти может быть использована, например, энергонезависимая оперативная память.

Отказы процессоров ввода-вывода обнаруживаются довольно легко, восстановление ввиду наличия 4-х идентичных по функциям ПВВ также несложно – необходимо лишь подключение в критичных для работы МПВК периферийных устройств ко всем ПВВ с соответствующей коммутацией. Отказы самих периферийных устройств – наиболее простая и хорошо проработанная часть организации отказоустойчивости. Наиболее часто применяется тот или иной вид резервирования на уровне устройств – нагруженное, ненагруженное или скользящее.

Итак, отказы элементной базы, влияют на деградацию **коэффициента производительности вычислительных средств**, что вполне допустимо если ВС эксплуатируется в составе информационно-вычислительного центра или файлового сервера приложений, обеспечивающего удаленный, коллективный доступ к файловой системе.

Эксплуатационные дефекты монтажа, также как, и факторы помехообразования, как правило, приводят к **сбою** вычислительной системы. Локализация нестационарных неисправностей (сбоев) создает наибольшие трудности в процессе эксплуатации вычислительных средств, если учесть, что во первых, они носят перемежающийся (плавающий) характер и во вторых проявляются только на определенных тестовых комбинациях или программах пользователя (**кодозависимая неисправность**).

Сбой вычислительного процесса опасен, прежде всего, для задач решаемых в реальном масштабе времени. Устройство считается неисправным, если частота сбоев превзошла определенный критерий. Этот критерий для различных случаев использования комплекса может быть различным и вводиться как параметр, по которому операционная система делает вывод об исправности того или иного модуля. Обычно модуль считается исправным, если период между сбоями превышает 15-30 минут.

Представление о реальном распределении цепей с пониженной помехозащищенностью («слабые» точки монтажа) могут дать, только **экспериментальные, групповые методы электронной диагностики** эксплуатационных дефектов и устойчивости ВС к внутренним помехам.

К эксплуатационным дефектам монтажа следует отнести следующие:

- Обрыв оплетки (обратного проводника) кабельной линии связи;
- Нестабильность («уход») сопротивления согласующего резистора «длинной» линии передачи;
- Увеличение переходного сопротивления разъемных соединителей;
- Частичное нарушение контактирования «земляных» выводов разъемных соединителей;
- Перекос параметров электропитания и системы охлаждения между модулями.

Значение суммарной помехи монтажа определяется четырьмя слагаемыми:

- Взаимные наводки сигнальных линий;
- Помехи отражений в демпфированных (не согласованных) линиях;
- Помехи в контурах электропитания логических схем;
- Помехи от суммирования обратных токов на общих проводниках.

В наиболее совершенных конструкциях МПВК основной удельный вес суммарной помехи монтажа падает на разъемные соединители и резисторные матрицы, чему, в немалой степени, способствует требование максимальной плотности сигнальных линий.

Метод групповой диагностики эксплуатационных дефектов и запаса помехозащищенности логических цепей.

Предлагаемый метод разбит на три этапа: выявление наиболее незащищенной объединительной платы, выявление наиболее «слабой» ячейки и детальное исследование сигнальных цепей «слабой» ячейки.

На этапе испытаний опытного образца модулей (узлов кластера) МПВК и запуска в серийное производство реальное распределение запаса помехоустойчивости сигнальных цепей позволяет решить следующие задачи:

- ✓ Оценить средний уровень помех в модуле и вероятность возникновения максимальной помехи монтажа в модуле, что может характеризовать корректность конструктивных решений при реализации межсхемных соединений общее качество монтажа;

- ✓ Средний уровень запаса помехозащищенности позволяет принимать разумные решения по упрощению монтажа с целью повышения технологичности конструкции;
- ✓ Выявление «слабых» точек монтажа с пониженной помехозащищенности для доработки таких связей.

Метод основан на измерении дополнительных импульсов помехи от асинхронного с тактовой частотой машины генератора импульсного тока, внедряемых в «общие» цепи заземления и приводящие к сбою системы. Ток имитатора импульсных помех (ИИП) увеличивается поэтапно и выдерживается на каждом уровне по 15-30 минут. За это время перебираются, практически, все возможные кодовые комбинации в «слабой» цепи и если факт сбоя отсутствует, ток повышают на следующий уровень. При сбое можно зафиксировать значение помехи-«подставки» по осциллографу на выходе любого логического элемента, если он синхронизируется от ИИП.

И не важно, на какой минуте произошел сбой на первой или тридцатой, важно, что предыдущий уровень дополнительной помехи, на котором факта сбоя не обнаружено, является **объективной характеристикой уровня внутренних помех**, гарантирующим бессбойную работу вычислительного комплекса за заданный промежуток времени.

На первом этапе используется генератор импульсного тока до 20 А, который подключается в двух точках к схемной и защитной «земле» (Рис. 10.). При возникновении сбоя определяется объединительная плата, на которой он произошел и подробно исследуется на втором этапе.

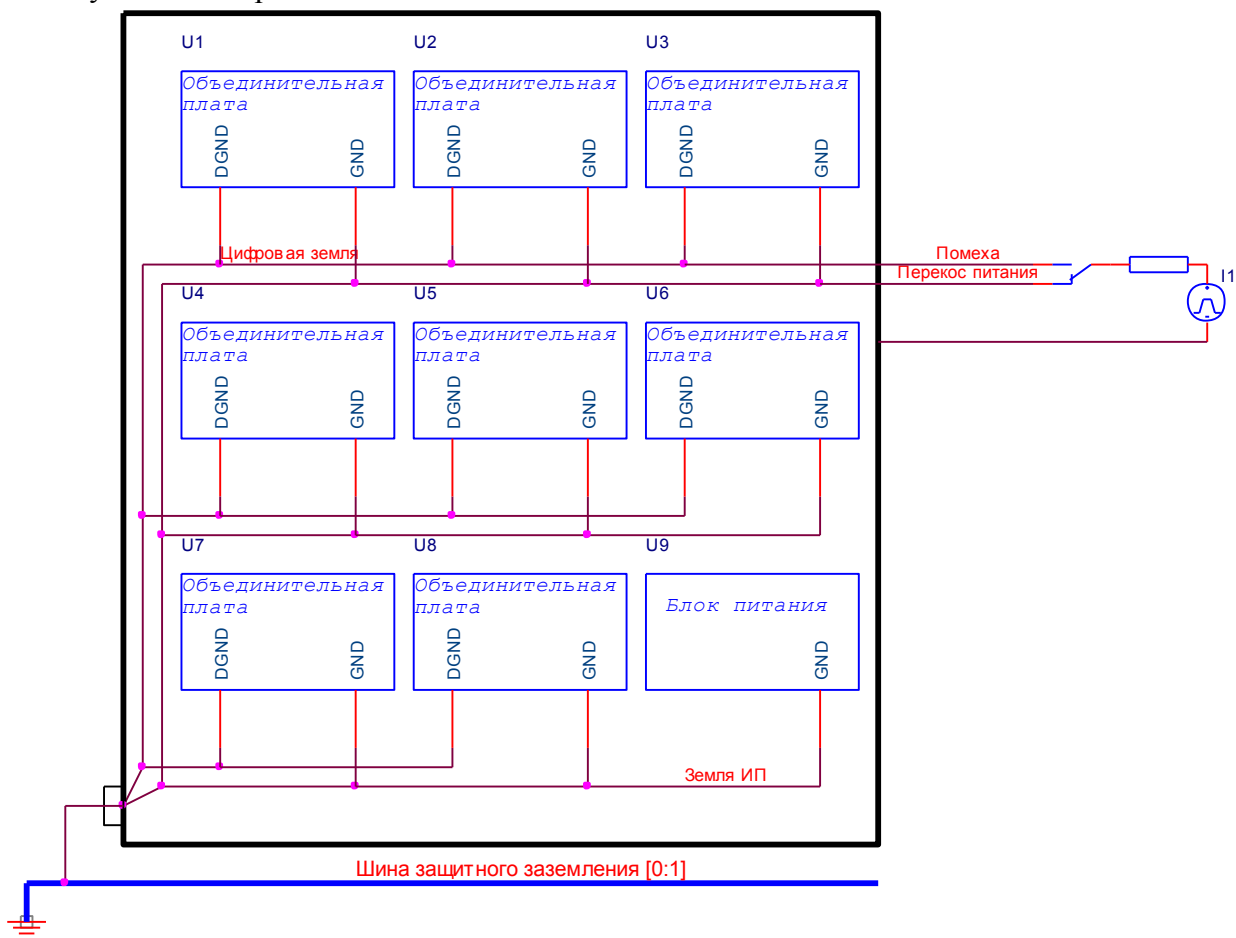


Рис. 10. Блок-схема подключения ИИП к шинам схемной и защитной «земли» шкафа.

Отбор «слабых» ячеек осуществляется генератором, принцип действия, которого основан на дифференцировании перепада тока 8-10 А на индуктивности разъемных контактов «земли» и питания пары не связанных между собой ячеек.

Отобранные ячейки исследуются по каждому контакту, с помощью генератора напряжения, с переменной амплитудой вызывая сбой вычислительного процесса.

Таким образом, можно получить распределение реального запаса помехозащищенности в целом по ячейке **на фоне внутренних помех**. Зная распределение запаса помехозащищенности элементной базы (дается в спецификации или исследуется на партии триггеров используемой элементной базы), и используя правила сложения математического ожидания и дисперсии можно определить **вероятность возникновения сбоя (максимальной помехи монтажа) в единицу времени**:

$$U_{ном} \leq U_{пор} - U_{ИПП}$$

Точнее, вероятность существования линии связи, в которой может быть сгенерирована помеха максимально возможной амплитуды для данной элементной базы и конструкции МПВМ.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертационная работа содержит новое решение актуальной научной задачи - получения научно-обоснованных технических решений математического моделирования межсхемных соединений, обеспечивающих функциональную надежность устройств вычислительной техники.

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования разрабатываемых вычислительных устройств на этапах проектирования, наладки и испытаний, на основе которых создана комплексная система обеспечения целостности сигналов для устройств на базе современных высокопроизводительных микропроцессоров.

2. Исследовано влияние конструкции и технологии многослойного печатного монтажа на целостность логических сигналов и задержку передачи информации. Разработан алгоритм и ПО для расчета геометрии МПП на заданное волновое сопротивление в условиях конструктивных неоднородностей. Предложена методика допускового анализа конструктивных и электрических параметров МПП.

3. Разработаны модели контуров электропитания узлов и блоков вычислительных средств при групповом срабатывании логических элементов высокопроизводительных цифровых устройств.

4. Исследованы искажения импульсных сигналов в длинных линиях передачи с потерями. Разработан метод экспресс-анализа временных и динамических потерь печатных и кабельных линиях связи из-за искажения фронтов результате воздействия скин-эффекта. Обоснованы критерии выбора тапа кабеля в зависимости от скорости и типа передачи.

5. Разработан методика экспериментальной диагностики фактического запаса помехоустойчивости логически цепей макетных и опытных образцов вычислительных устройств при экстремальных условиях, позволяющая определить и устранить дефекты в обеспечении целостности сигналов, не выявленные в процессе

теоретических и экспериментальных исследований. Предложена методика прогнозирования наработки на сбой устройств и блоков цифровой техники.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. В.А. Волков. Метод оценки надежности кластерных вычислительных структур и отказоустойчивости приложений с недетерминированным поведением/Чудинов. С.М// «Научные ведомости БелГУ» № 19/1, Москва 2011г. С.121-126.
2. Волков В.А. Оценочные модели надежности кластерных вычислительных систем // Динамика сложных систем. - 2011. - № 3. - С.65-72.
3. Волков В.А., Травкин Д.Н. Допусковый анализ прецизионных печатных плат // Динамика сложных систем. - 2011. - № 4. - С.66-75.

Научные статьи и доклады в региональных журналах, сборниках научных трудов и материалы научных конференций

4. В.А. Волков. Разработка элементов распределенной системы схемотехнического моделирования (статья). /С. Р. Тумковский//Сборник научных трудов МИЭМ. Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств, под общ. Ред. Кечиева Л.Н. – М.: МИЭМ, 2009. стр.23-27.
5. В.А. Волков, Г.Н., Карпенко, М.А. Колесников. Прогнозирование отказоустойчивых кластерных систем при работе в режиме реального времени (статья)., Вестник МАРТИТ №1, 2010 г., 85-92 стр.
6. В.А. Волков. Идентификация параметров модели диода для систем схемотехнического проектирования с применением технологии «облачных» вычислений (статья)/ С. Р. Тумковский, А.К. Мельниченко// Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы тринадцатого научно-практического семинара. -МИЭМ. М.,2010 стр 202-208.
7. В.А. Волков. Технология «облачных» вычислений при построении модулей САПР (тезис)/ С. Р. Тумковский// Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двенадцатого научно-практического семинара.- МИЭМ. М., 2009,с. 84.
8. В.А. Волков. Перспективы создания многоуровневой модели мультиагентных систем с использованием миварных технологий (доклад). / А.И. Белоусова О.О. Варламов //Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям. Россия, Черноморское побережье, Геленджик-Дивноморское, 2-9 сентября 2011 г стр.15-19.
9. В.А. Волков. Применение миварного подхода для формализованного моделирования мышления и искусственного интеллекта (доклад)/ О.А. Репина, О.А. Соломатина, О.О. Варламов// Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям. Россия, Черноморское побережье, Геленджик-Дивноморское, 2-9 сентября 2011 года. стр.303-308.
10. В.А. Волков. Моделирование переходных процессов в шинах электропитания высокопроизводительных ЭВМ (доклад) Сборник трудов Второй Международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и технологии», Белгород 3-5 октября 2011г.с. 45-49
11. В.А. Волков. Моделирование формы импульсных сигналов в линиях связи с потерями (доклад) Сборник трудов Второй Международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и технологии», Белгород 3-5 октября 2011г с.40-45