

Гришин Роман Анатольевич

**Автоматизация ранних этапов проектирования цифровых
устройств на ПЛИС на основе двухуровневого
макромоделирования**

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(в электронике, радиотехнике и связи)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств» «Радиовтуза» Московского авиационного института (государственного технического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ильин Валерий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Норенков Игорь Петрович

кандидат технических наук
Бруханский Александр Владимирович

Ведущая организация – ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца».

Защита состоится «21» декабря 2010г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.02 в Московском авиационном институте (государственном техническом университете) 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.02
к.т.н., доцент

А.М. Петраков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Все более широкое применение в современной РЭА находят программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). К особенностям ПЛИС, обусловившим их широкое распространение, следует отнести: возможность оперативного изменения внутренней структуры, достаточно высокие технические характеристики, относительно невысокую стоимость микросхем.

Обычно применяемые в настоящее время при проектировании цифровых устройств (ЦУ) нисходящий и восходящий маршруты проектирования основаны на непрерывном прохождении проектных операций по всему маршруту проектирования от начала до конца. При поиске оптимального варианта реализации устройства эти маршруты требуют многократного итерационного повторения процесса проектирования и поэтому характеризуются большими трудозатратами. Это обстоятельство препятствует анализу большого числа вариантов проектируемого устройства, что необходимо при поиске оптимального из них. В связи с этим задача обеспечения возможности многовариантного анализа ПЛИС уже на ранних этапах проектирования представляется весьма актуальной.

ПЛИС представляет собой микросхему, в которой материализован алгоритм её работы, поэтому проектировать ЦУ на основе ПЛИС необходимо с учетом специфики аппаратного базиса, то есть микросхемы ПЛИС, на которой реализуется устройство. Проектирование ЦУ на основе ПЛИС позволяет совместить этапы разработки конструкции и реализации алгоритма, чем достигается существенная экономия времени проектирования. Однако для реализации этой возможности на ранних этапах проектирования, то есть до материализации алгоритма работы устройства, должны быть определены требования к аппаратной части ПЛИС. Или, иначе говоря, должна быть выбрана модель ПЛИС, обеспечивающая выполнение требований технического задания к значениям выходных параметров проектируемого ЦУ. Следовательно, при анализе вариантов построения и аппаратной реализации ЦУ на ПЛИС в ходе ранних этапов проектирования необходимо выполнить:

- структурно-параметрический синтез ЦУ с учетом специфики аппаратной базы;
- выбор аппаратной базы (модели ПЛИС), позволяющей удовлетворить требованиям ТЗ.

Существующие методы синтеза не учитывают специфику аппаратного базиса. Методы оценки выходных параметров ЦУ на ПЛИС, необходимые для выбора модели ПЛИС, характеризуются высокой трудоемкостью ввода исходных данных и получения оценки, что неприемлемо для ранних этапов проектирования.

Таким образом, актуальной является разработка новых, малозатратных по времени автоматизированных методов структурного синтеза ЦУ на ПЛИС с учетом специфики аппаратного базиса, а также методов оценки выходных параметров цифровых устройств на ПЛИС. В данной работе предлагается решение перечисленных задач с использованием двухуровневого макро моделирования.

Цель и задачи работы.

Целью данной диссертационной работы является разработка методов автоматизации структурно-параметрического синтеза ЦУ на ПЛИС в ходе ранних этапов проектирования на основе ускоренной оценки выходных параметров ЦУ на ПЛИС, а также прототипа САПР, реализующего предложенные методы.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Разработка метода двухуровневого структурно-параметрического синтеза ЦУ на ПЛИС, учитывающего специфику аппаратного базиса.
2. Формирование двух уровней макромоделей, определение множества макро моделируемых блоков на каждом уровне и разработка библиотек макромоделей двух уровней.
3. Разработка метода ускоренной оценки выходных параметров ЦУ на ПЛИС с использованием двух уровней макромоделей.
4. Создание базового информационного и программного обеспечения САПР, подтверждающего работоспособность предложенного подхода и разработанных методов его реализации при выполнении ранних этапов проектирования.
5. Апробация предложенных методов проектирования на конкретных проектах.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы теорий графов, множеств, планирования эксперимента, электронных цифровых машин, искусственного интеллекта, баз данных, принципы объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна

- 1) Предложен комбинированный (нисходяще-восходящий) маршрут проектирования ЦУ на основе ПЛИС с использованием двухуровневого макро моделирования, отличающийся от известных учетом специфики аппаратного базиса на ранних этапах проектирования.

- 2) Разработан метод ускоренной оценки выходных параметров ЦУ на основе ПЛИС, базирующийся на двухуровневом макро моделировании. Метод отличается от известных малыми вычислительными затратами и редуцированным составом исходных данных, что позволяет просчитать на ранних этапах проектирования за приемлемое время большое количество вариантов ЦУ и выбрать оптимальный из них.
- 3) Предложен метод создания макромоделей, основанный на комбинировании различных способов их построения. Метод обеспечивает компромисс между конфликтными требованиями высокой точности и малых вычислительных затрат.
- 4) Предложен метод структурно-параметрического синтеза ЦУ на ПЛИС методом направленного поиска по дереву И-ИЛИ, отличающийся от известных оригинальным представлением вершин дерева И-ИЛИ макромоделями верхнего и нижнего уровня и их входными параметрами, что позволяет определить оптимальные значения параметров компонентов ПЛИС.

Практическая ценность

1. Предложенный метод проектирования ЦУ на ПЛИС на основе двухуровневого макро моделирования позволяет ускорить многовариантный анализ ЦУ на ПЛИС с целью выбора лучшего варианта на ранних этапах проектирования и тем самым сократить сроки разработки ЦУ на ПЛИС, уменьшить вероятность ошибок, связанных с выбором оптимального варианта микросхемы ПЛИС.
2. Предложенный метод структурно-параметрического синтеза позволяет синтезировать оптимальную в отношении заданных критериев структуру и параметры ЦУ на основе ПЛИС.
3. Разработаны макромоделей, в большинстве своем оригинальные, нижнего и верхнего уровней для основных узлов ЦУ на ПЛИС: регистра, сумматора, счетчика, цифрового компаратора, умножителя, блока памяти, блока выполнения поразрядных логических операций, фильтра с конечной импульсной характеристикой, контроллера памяти типа SDRAM, блока извлечения квадратного корня, буфера типа «очередь». Макромоделей могут использоваться в качестве базиса для построения других макромоделей, а также широкого класса цифровых устройств при проектировании по методу двухуровневого макро моделирования. На основе макромоделей созданы их библиотеки, вошедшие в состав прототипа САПР.

4. Разработанный прототип САПР на основе метода двухуровневого макро моделирования имеет открытую структуру, допускающую быстрое усовершенствование до САПР промышленного уровня, обеспечивающей быструю оценку выходных параметров ЦУ на ПЛИС в ходе ранних этапов проектирования.
5. Выполненная программная реализация библиотек макромоделей нижнего и верхнего уровней для основных узлов ЦУ на ПЛИС существенно облегчает и ускоряет процесс автоматизированного проектирования ЦУ на ПЛИС на основе двухуровневого макро моделирования.
6. Разработанные методики автоматизации проведения эксперимента для построения макромоделей нижнего уровня позволяют существенно снизить трудоемкость процесса построения макромоделей.

Результаты внедрения

Предложенные в работе методы использовались в производственной деятельности предприятий НПО «Астрофизика» и ФГУП НПЦ «Дельта» на этапе эскизного проектирования при создании ряда промышленных изделий. В результате была достигнута существенная экономия времени проектирования, что подтверждается актами внедрения.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Предложен комбинированный (нисходяще-восходящий) маршрут проектирования ЦУ на основе ПЛИС с использованием двухуровневого макро моделирования, позволяющий учесть специфику аппаратного базиса на ранних этапах проектирования.
- 2) Разработанный метод оценки выходных параметров ЦУ на ПЛИС на основе двухуровневого макро моделирования позволяет выполнить ускоренную оценку выходных параметров устройства по сокращенному набору исходных данных.
- 3) Предложенный метод создания макромоделей, основанный на комбинировании различных способов их построения, обеспечивает компромисс между конфликтными требованиями высокой точности и малых вычислительных затрат.
- 4) Предложенный метод структурно-параметрического синтеза ЦУ на ПЛИС путем направленного поиска по дереву И-ИЛИ позволяет определить оптимальные значения параметров компонентов ПЛИС на ранних этапах проектирования.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на двух научно-технических конференциях: Научно-техническая конференция молодых ученых «Информационные технологии и радиоэлектронные системы», Москва, 2007г.; XXII Научно-техническая конференция «Космические информационно-управляющие системы наблюдения», Москва, 2008г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ: 3 работы в специализированных журналах, 2 работы в сборниках научных трудов. Из них 3 работы опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения изложенных на 162 страницах, включающих 45 рисунков, 28 таблиц, а также список литературы из 70 наименований. Приложения к диссертации составляют 33 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации.

Первая глава содержит анализ современных микросхем ПЛИС, современных методов проектирования цифровых устройств (ЦУ), систем автоматизации проектирования, по результатам которых формулируются цель и задачи диссертационного исследования.

На основе анализа современных микросхем ПЛИС выделена особая группа частных критериев, отражающих структурно-архитектурные особенности этих микросхем. Отмечена важность учета данной группы критериев при проектировании ЦУ на ПЛИС.

Анализ современных методов проектирования показал, что наибольшая эффективность использования ПЛИС может быть достигнута в случае применения специального маршрута проектирования. Этот маршрут предполагает распараллеливание ряда работ. В частности возможно совмещение этапов разработки конструкции и реализации алгоритма, что позволяет существенно сократить время проектирования и перейти к новому маршруту проектирования (см. рисунок 1).



Рисунок 1 Маршрут проектирования ЦУ на ПЛИС

Реализация данного маршрута требует решения следующих важных задач в ходе ранних этапов проектирования:

- выполнить структурно-параметрический синтез устройства;
- определить требования к аппаратной части устройства.

Для решения перечисленных задач крайне важное значение имеет быстрая оценка выходных параметров ЦУ на ПЛИС, которая позволяет в короткий срок сравнить значительное число вариантов и принять обоснованное решение. Проведенный анализ современных средств автоматизации проектирования показал, что существующие методы решения перечисленных задач имеют существенные недостатки с точки зрения их применения в ходе ранних этапов проектирования.

Существующие средства оценки выходных параметров (например, САПР производителей ПЛИС) требуют наличия полного описания алгоритма работы устройства на языках описания аппаратуры или в виде схемы. Составление и отладка такого описания требует значительных трудозатрат и не соответствует задачам ранних этапов проектирования. Так, например, описание буфера типа «очередь» на языке Verilog HDL занимает около 200 строк кода. Кроме того, для оценки выходных параметров каждого варианта реализации необходимо провести логический и физический синтез, а также анализ полученной структуры с целью расчета выходных параметров. Указанные операции характеризуются большими вычислительными затратами, что сильно затрудняет или делает невозможным анализ множества вариантов реализации устройства, который весьма желательно провести на ранних этапах проектирования.

Выбор варианта структурной реализации алгоритма также является нетривиальной задачей. Учитывая значительную размерность множества возможных вариантов, решение данной задачи без привлечения средств автоматизации может привести к существенным ошибкам. В то же время существующие средства автоматизации не обеспечивают выбор варианта реализации с учетом специфики

аппаратного базиса. Существующие САПР системного уровня (например, Matlab) позволяют выполнить высокоуровневую оптимизацию параметров устройства, которая, однако, не учитывает специфику аппаратного базиса. САПР логического и физического синтеза (Leonardo Spectrum, Sinplify, XST и др.), напротив, выполняют оптимизацию схемы только на низком уровне.

В работе предложен новый, нисходяще-восходящий (комбинированный) маршрут проектирования на основе двухуровневого макромоделирования, позволяющий преодолеть недостатки существующих методов. Совмещение нисходящего и восходящего проектирования заключается в том, что специфика элементной базы учитывается уже на этапе подготовки технического предложения, а также в использовании нового способа расчета выходных параметров ЦУ, который раскрыт в главе два.

По результатам проведенных исследований сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава содержит изложение метода двухуровневого макромоделирования (МДМ), метода ускоренной оценки выходных параметров ЦУ на ПЛИС с использованием МДМ. Также предлагается метод структурно-параметрического синтеза ЦУ на ПЛИС с учетом специфики аппаратного базиса, основанный на двухуровневом макромоделировании.

Основной недостаток существующих методов оценки выходных параметров, который затрудняет их использование в ходе ранних этапов проектирования – это высокая трудоемкость ввода исходных данных и получения оценки. С целью упрощения процесса ввода исходных данных предлагается использовать известный метод описания с помощью сложно-функциональных блоков (СФ-блоков, например, КИХ-фильтр, квадратурный демодулятор, контроллер динамической памяти и т.п.), но при этом за счёт проведенной модернизации этого метода существенно уменьшить количество входных параметров и портов блока, ограничившись 3-4 важнейшими.

Для снижения вычислительных затрат в работе предлагается использовать принцип макромоделирования. В отличие от обычных методов одноуровневого макромоделирования в работе предложено использовать двухуровневый подход, основанный на ММ верхнего уровня (ВУ) для СФ-блоков и ММ нижнего уровня (НУ) для элементов уровня регистровых передач (RTL), что соответствует принципу функциональной декомпозиции. Элементы уровня RTL представлены триггерами, сумматорами, счетчиками и другими подобными узлами. Введение двух уровней макромоделей обусловлено следующими соображениями: в качестве способа ввода исходных данных было решено использовать описание на основе СФ-блоков,

однако, макро моделирование СФ-блоков затруднено их высокой сложностью. В предлагаемом методе вводится дополнительный уровень абстракции, представленный ММ НУ. ММ НУ являются базисом для построения ММ ВУ, что упрощает задачу макро моделирования последних.

Таким образом, ЦУ можно представить в виде дерева (см. рисунок 2) $D = \{M, C\}$, где M – множество вершин дерева; C – множество ребер. Множество вершин образовано как ММ ВУ, так и ММ НУ: $M = MB \cup MH$, где MB – множество ММ ВУ; MH – множество ММ НУ.

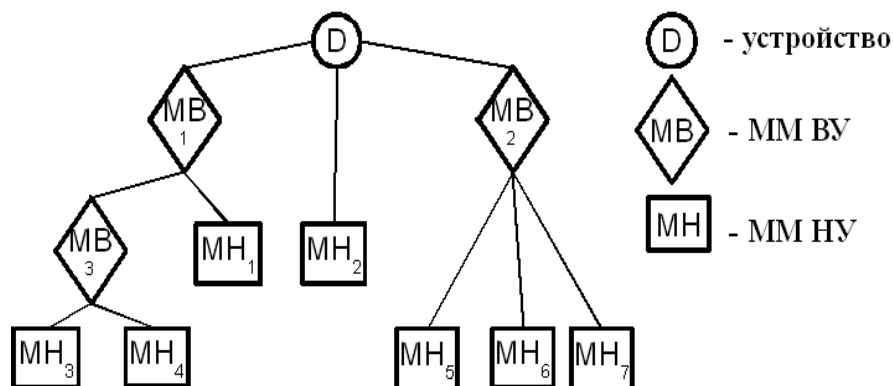


Рисунок 2 Представление устройства двумя уровнями ММ

В предлагаемом методе ММ НУ отражают аппаратную специфику, а ММ ВУ, напротив, слабо связаны или не связаны с аппаратурой. Это позволяет достаточно легко выполнять адаптацию макромоделей к новому аппаратному базису, учитывая тот факт, что множество RTL-элементов невелико.

Метод предусматривает возможность создания нескольких вариантов ММ одного узла. Так, например, различные варианты ММ КИХ-фильтра будут соответствовать его реализации в прямой или транспонированной, конвейерной или параллельной формах.

В работе предложены процедуры формирования ММ ВУ и НУ, а также оценки выходных параметров ЦУ с использованием МДМ.

Процедура А. Получение макромоделей верхнего уровня $Y2 = \Phi(Y1, X2)$ для СФ-блоков.

1. Определить множество СФ-блоков, для которых необходимо построить макро модели.
2. Задать множество входных $X2$ и выходных $Y2$ параметров СФ-блока. В множество $X2$ могут входить как независимые параметры $X2_{нз}$, так и зависимые (структурные) $X2_з$, для вычисления которых необходимо определить функцию $X2_з = \Phi_{вх}(X2_{нз})$. Структурные параметры могут быть использованы для создания более универсальных ММ ВУ, в которых внутренняя структура может варьироваться в зависимости от заданных значений независимых входных

параметров. Так, например, зависимым входным параметром может быть выражено количество элементов в линии задержки для цифрового фильтра.

3. Для каждого СФ-блока составить его эквивалентную схему (ЭС), элементами которой должны быть RTL-элементы.
 - 3.1 Задать эквивалентную схему ММ СФ-блока в базисе RTL-элементов.
 - 3.2 Определить функцию $X1 = \Phi_{RTL}(X2)$ расчета входных параметров $X1$ всех RTL-элементов, вошедших в ЭС данного СФ-блока.
 - 3.3 Составить для определённой в п.3.1 ЭС макромоделли конкретную функцию $Y2 = \Phi(Y1, X2)$, где $Y1$ – множество выходных параметров RTL-элементов.
 - 3.4 Если существуют другие варианты ЭС СФ-блока, для которых необходимо создать вариант ММ, то вернуться к п.3.1 и задать новый вариант ЭС СФ-блока с новым составом RTL-элементов.

4. Объединить полученные макромоделли верхнего уровня в библиотеку СФ-блоков. Таким образом, макромоделль СФ-блока образуется функцией $\Phi(Y1, X2)$, а также функциями $\Phi_{вх}(X2_{нз})$ и $\Phi_{RTL}(X2)$.

Создание макромоделлей в значительной степени является искусством. Значительные усилия, необходимые для создания ММ СФ-блока, оправдываются только при условии многократного использования этих ММ в дальнейшем, поэтому необходимо уделять достаточное внимание вопросу выбора моделируемых СФ-блоков.

Для каждого СФ-блока его эквивалентная схема и функции $\Phi_{вх}$, Φ_{RTL} уникальны, формализовать их построение практически невозможно, так как они зависят от конкретной структуры макромоделлируемого СФ-блока и для их построения необходимо анализировать эту структуру. Создание функции $Y2 = \Phi(Y1, X2)$, также требует анализа структуры СФ-блока. Возможен и более простой способ расчета $Y2$, который заключается в том, что функция $\Phi(Y1, X2)$ заменяется расчетом выходных параметров по ЭС с использованием процедуры В, которая будет приведена ниже.

Процедура Б. Получение макромоделлей нижнего уровня $Y1 = \Omega(X1)$ для RTL-элементов.

1. Используя информацию о структуре созданных ММ ВУ, а также знание предметной области определить множество RTL-элементов, для которых необходимо построить ММ.
2. Задать множество входных $X1$ и выходных $Y1$ параметров макромоделли.
3. Для каждого такого RTL-элемента построить ряд вариантов макромоделли, отражающих различные способы аппаратной реализации RTL-элемента:
 - 3.1 Используя специализированную САПР проектирования на ПЛИС, методом многовариантного анализа получить множество вариантов значений

выходных параметров.

3.2 Обработать полученные в п. 3.1 данные, с помощью специальных САПР (Matlab, Mathcad и т.п.) и получить функциональную зависимость $Y1 = \Omega(X1)$, либо таблицу значений, отражающую эту зависимость, которые и составят макромодель элемента RTL-уровня. В ряде случаев, для сокращения объема экспериментов, целесообразно строить зависимость $Y1 = \Omega(X1)$ на основе знаний о способе реализации данного RTL-элемента в ПЛИС.

3.3 Если необходимо создать варианты макромодели, отражающие иные способы аппаратной реализации RTL-элемента, то вернуться к п.3.1, задав новый вариант реализации RTL-элемента с помощью САПР ПЛИС.

4. Объединить полученные макромодели нижнего уровня в библиотеку.

Создание ММ двух уровней в основном выполняется разработчиком этой метода, а не его пользователем. Пользователь метода (разработчик ЦУ), имея полученные описанным способом библиотеки ММ, сможет быстро оценить выходные параметры ЦУ, рассчитать большое количество вариантов ЦУ, отличающихся набором составляющих их СФ-блоков, структурой СФ-блоков, значениями их входных параметров и типом используемой ПЛИС.

Оценка выходных параметров ЦУ выполняется в соответствии с процедурой В, которую иллюстрирует рисунок 3. Процедура ориентирована на наиболее типичный случай, когда ЦУ строится в базисе СФ-блоков. Метод также допускает непосредственное включение RTL-элементов в структуру устройства, при этом процедура В изменится незначительно.

Процедура В. Оценка выходных параметров ЦУ.

1. Покрыть ЦУ набором СФ-блоков (верхняя часть рисунка 3) и задать их независимые входные параметры ($X2_{H3}$).

2. Для каждого СФ-блока, вошедшего в ЦУ ($MВ \in D$), выполнить следующее:

2.1 Выбрать один из вариантов ЭС СФ-блока из библиотеки ММ.

2.2 Используя функцию $\Phi_{вх}(X2_{H3})$ определить значения структурных параметров $X2_3$ СФ-блока.

2.3 Определить значения входных параметров $X1$ RTL-элементов, вошедших в структуру данного СФ-блока, используя функцию $\Phi_{RTL}(X2)$.

3. Определить выходные параметры $Y1$ RTL-элементов, используя ММ НУ $Y1 = \Omega(X1)$ и полученные значения входных параметров $X1$.

4. Рассчитать выходные параметры $Y2$ СФ-блоков, используя полученные на предыдущем шаге оценки выходных параметров RTL-элементов ($Y1$) и ММ ВУ $Y2 = \Phi(Y1, X2)$.

5. Используя функцию $\Psi(Y2)$ оценить выходные параметры ЦУ в целом ($Y3$).

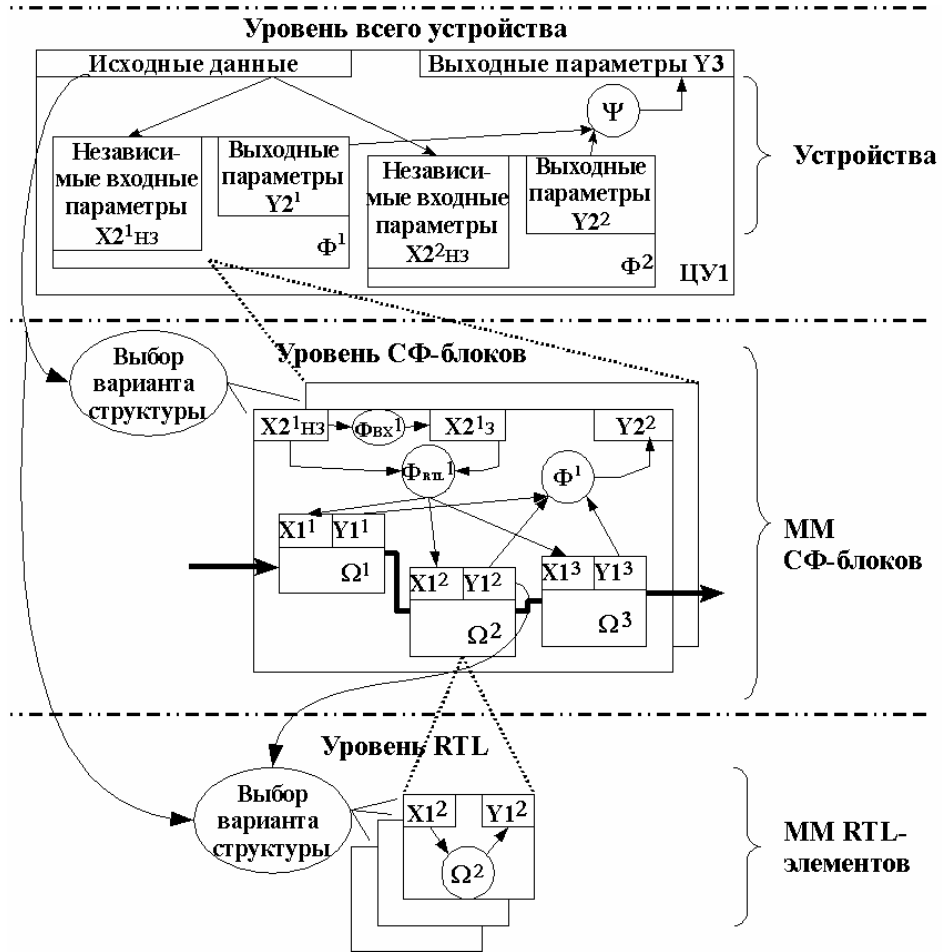


Рисунок 3 Графическое представление процедуры расчета выходных параметров ЦУ

Относительно функции $\Psi(Y2)$ можно отметить следующее: для каждого выходного параметра ЦУ, входящего в $Y3$, необходимо разработать свой алгоритм его расчета по известным значениям выходных параметров СФ-блоков ($Y2$), входящих в данное ЦУ. Так, например, алгоритм расчета таких выходных параметров как «затраты ЛЭ» и «затраты памяти» всегда будет заключаться в суммировании соответствующих выходных параметров ММ, входящих в данное ЦУ. Расчет быстродействия ЦУ, требует применения более сложного алгоритма.

Предлагаемый способ расчета выходных параметров дает существенный выигрыш по вычислительным затратам, по сравнению с известными методами синтеза за счет замены наиболее трудоемких операций логического и физического синтеза и анализа расчетом по ММ (см. рисунок 4). Наибольшая эффективность метода двухуровневого макромоделирования достигается при использовании САПР, созданной на его основе. Количественная оценка выигрыша от применения метода будет приведена ниже при рассмотрении прототипа такой САПР.

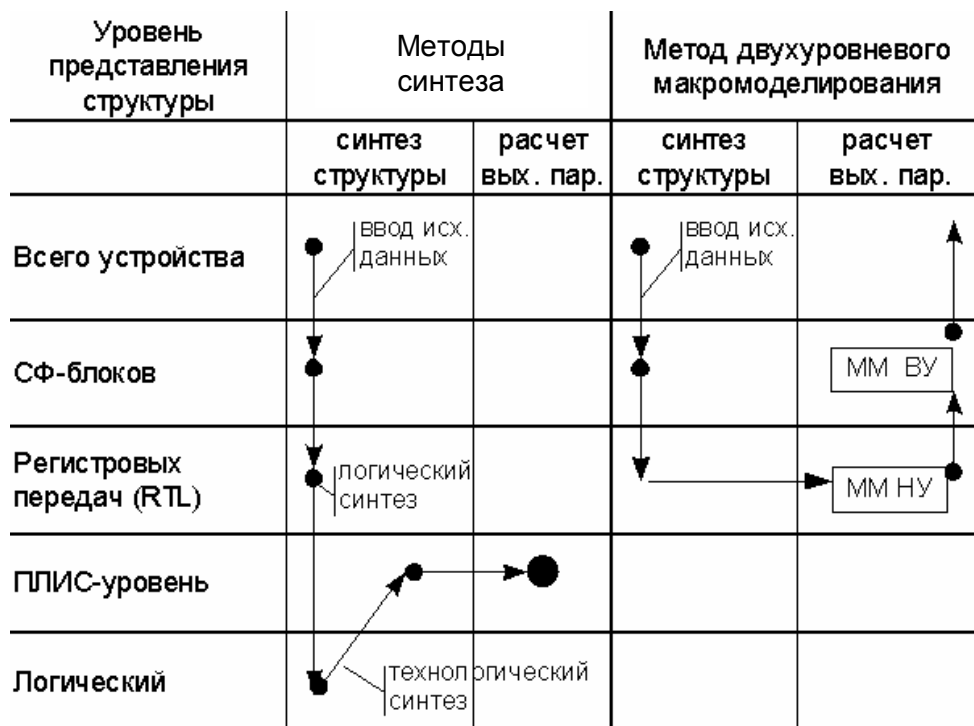


Рисунок 4 Схема расчета выходных параметров ЦУ

В главе два был также предложен метод структурно-параметрического синтеза ЦУ на основе ПЛИС с использованием МДМ. Как было отмечено выше, для каждого СФ-блока и RTL-элемента может существовать несколько вариантов его реализации. Выбор наиболее подходящего варианта, в соответствии с заданными критериями является непростой задачей. В работе предложен метод автоматизированного структурно-параметрического синтеза ЦУ на ПЛИС с учетом специфики аппаратного базиса на основе МДМ. При этом ЦУ представляется деревом И-ИЛИ (см. рисунок 5).

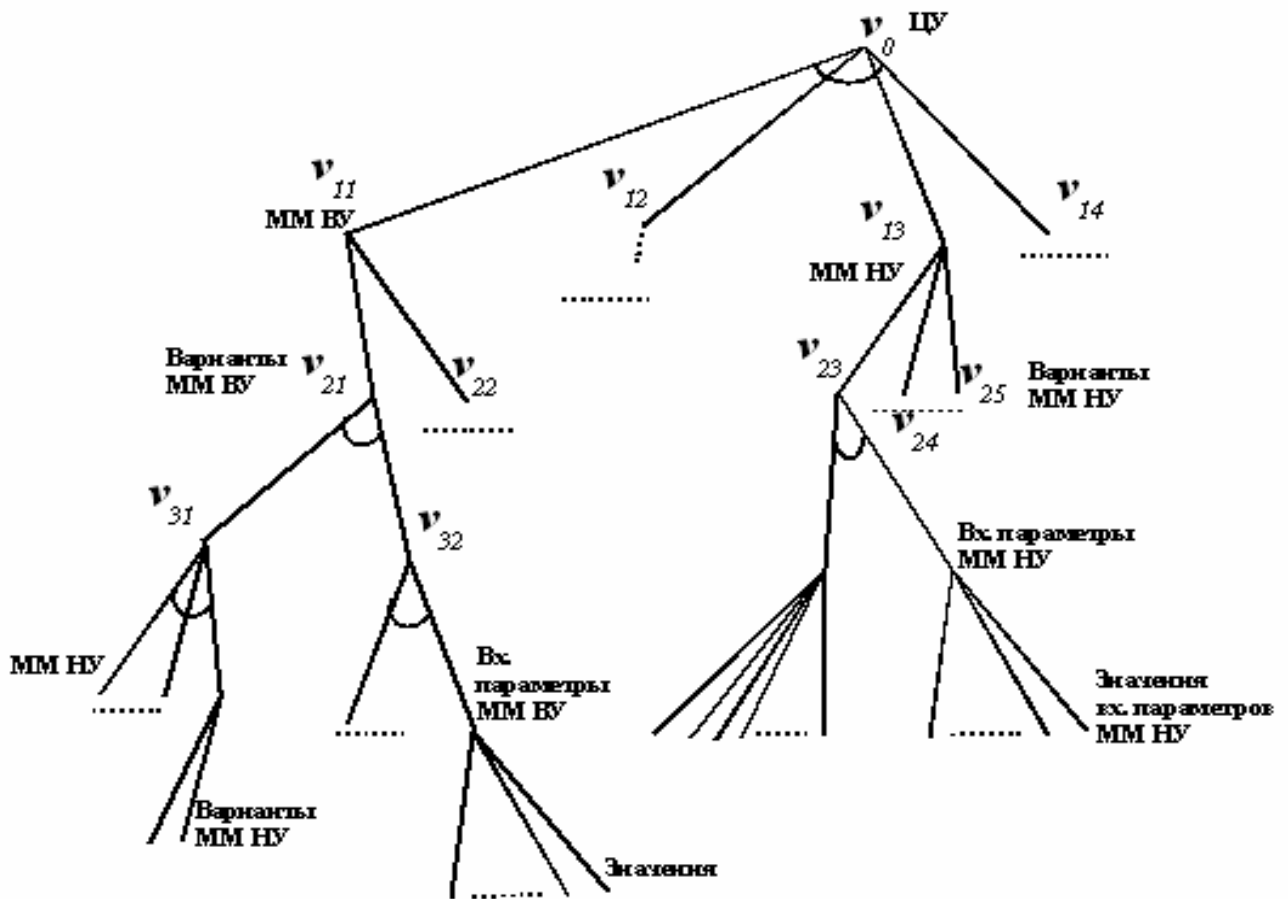


Рисунок 5 Пример представления вариантов ЦУ деревом И-ИЛИ

Корневая вершина дерева представляет все ЦУ в целом. Промежуточные вершины представлены MM ВУ и НУ. Вариантам MM и значениям их входных параметров могут соответствовать как промежуточные, так и терминальные вершины дерева.

Структурно-параметрический синтез заключается в построении оптимального дерева решения. Дерево решений называется оптимальным, если оно включает все дочерние вершины для вершины типа И из дерева перебора и дочернюю вершину с минимальной/максимальной стоимостью для вершины ИЛИ из дерева перебора. В работе предложено в качестве стоимости вершины, использовать обобщенный критерий оптимальности:

$$H_j = \sum_i f_i \cdot h_{ji} \quad , \text{ где}$$

h_{ji} – балльная оценка j -й вершины с точки зрения i -го частного критерия. Частными критериями являются отдельные выходные параметрам ЦУ (быстродействие, объем аппаратуры и т.д.); f_i – весовой коэффициент, характеризующий важность i -го частного критерия. Значения h_{ji} и f_i нормированы к единице. Таким образом, обобщенный критерий H_j характеризует степень оптимальности данной (j -й) вершины (варианта) с точки зрения заданных

разработчиком ЦУ критериальных ограничений и весовых коэффициентов f_i .

Вычислим, например, балльные оценки для вариантов ММ умножителя. Примем, что лучший вариант соответствует наибольшей балльной оценке. Возможны несколько вариантов реализации умножителя: на табличных преобразователях (Т); на специальных аппаратных блоках умножения (D); с использованием встроенной памяти ПЛИС (М). Наименьшее быстродействие имеет вариант на ЛЭ, поэтому ему присвоим балл $h_{1I}=1$ (нормированное значение $h_{1I}'=0,5$). Варианты D и M дают более высокое быстродействие, при этом между собой эти два варианта весьма близки. Поэтому присвоим им одинаковую оценку $h_{2I}=h_{3I}=2$ ($h_{2I}'=h_{3I}'=1$). Выбор одного из двух вариантов может осуществляться на основе других, второстепенных критериев, если они заданы, а также случайным образом или перебором. Возможность выбора варианта посредством перебора обеспечивается высокой скоростью расчета выходных параметров по МДМ.

Таким образом, для любого ЦУ, заданного в базисе ММ можно построить дерево И-ИЛИ и выделить в нем оптимальное дерево решения на основе балльных оценок и заданных критериев. То есть выполнить структурно-параметрический синтез ЦУ на высоком уровне с учетом специфики аппаратного базиса.

В третьей главе решается задача разработки библиотеки ММ двух уровней. В начале главы рассматриваются выходные параметры ЦУ на ПЛИС. В результате рассмотрения выбираются учитываемые в ММ выходные параметры и их единицы измерения:

- количество необходимых логических ресурсов ПЛИС (L). Под логическими ресурсами в данном случае понимаются базовые аппаратные единицы ПЛИС, предназначенные для реализации комбинационных функций, а также триггеры. За единицу измерения логических ресурсов принят логический элемент (ЛЭ), включающий табличный преобразователь и триггер;

- требуемый объем памяти (M, бит). В данном случае учитывается только память, размещенная непосредственно в микросхеме ПЛИС. Так называемые встроенные блоки памяти. Встроенная память выделяется фрагментами фиксированного размера, которые для удобства дальнейшего изложения будем называть сегментами;

- количество используемых сегментов памяти (MS, шт.);
- быстродействие (F , Гц);
- пропускная способность (C , байт/с).

В работе предложен метод создания макромоделей, основанный на комбинировании трех способов их создания и представления:

1. в виде аналитического выражения, полученного на основе экспериментальных данных; $MH \equiv Y1 = \Omega(X1)$;
2. в виде эквивалентной схемы; $MV = \{M, C\}$;
3. в виде аналитического выражения на основе ЭС; $Y2 = \Phi(Y1, X2)$.

Первый способ характерен для ММ НУ. Формирование ММ выполняется следующим образом. Вначале создается описание моделируемого узла в форме, пригодной для САПР ПЛИС. Затем выполняется синтез и анализ макромоделируемого узла средствами САПР ПЛИС при различных значениях входных параметров $X1$. По полученным данным делается вывод о характере зависимости между входными и выходными параметрами. ММ, построенные на основе экспериментальных данных, дают большую точность, но менее универсальны, чем ММ на основе ЭС. Создание таких ММ может потребовать проведения значительного числа вычислительных экспериментов.

В главе три также предложен подход к подготовке исходных данных и обработке результатов эксперимента на основе теории планирования эксперимента, который делает возможным создание ММ с большим количеством входных параметров. Предложены методики автоматизации проведения экспериментов и обработки результатов с использованием специального «языка скриптов» TCL, а также пакетов MS Excel и SciLab.

В качестве иллюстрации процедуры формирования ММ НУ на основе экспериментальных данных рассмотрим задачу определения быстродействия цифрового компаратора. Основным входным параметром компаратора является разрядность операндов W_{Data} . На рисунке 6 точками показаны результаты эксперимента по определению времени срабатывания цифрового компаратора ($t_{cmp}(W_{Data})$) с помощью САПР ПЛИС при различной разрядности операндов.

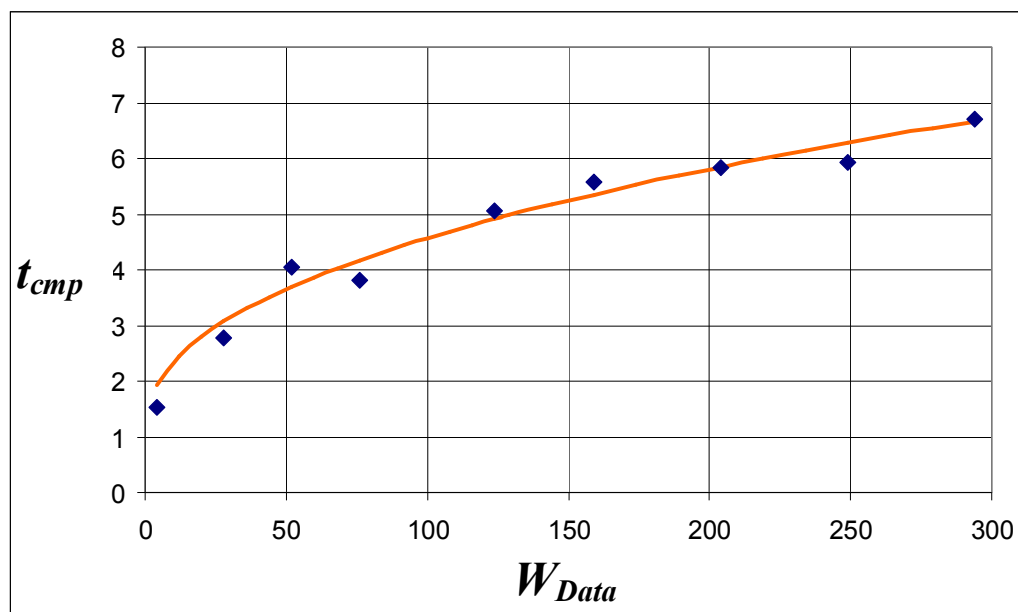


Рисунок 6 Зависимость $t_{cmp}(W_{Data})$ для ПЛИС серии Cyclone-II

По внешнему виду графика было определено, что зависимость $t_{cmp}(W_{Data})$ хорошо аппроксимируется степенной функцией вида:

$$t_{cmp}(W_{Data}) = a + b \cdot W_{Data}^c$$

a, b, c — коэффициенты, определенные путем регрессионного анализа.

Сплошной линией на рисунке 6 показан график аппроксимирующего выражения, которое является частью ММ НУ цифрового компаратора.

Для сокращения числа экспериментов в работе было предложено некоторые выходные параметры ММ НУ рассчитывать по аналитическим выражениям, построенным на основе знаний о способе реализации моделируемого RTL-элемента в ПЛИС. Так, например, можно рассчитать затраты аппаратуры для двоичного счетчика. Основной входной параметр счетчика-коэффициент пересчета (КоП). Количество двоичных разрядов счетчика, определяется как $W = \log_2(\text{КоП})$. Величина W соответствует количеству аппаратуры, то есть ЛЭ ПЛИС, необходимых для реализации счетчика. Таким образом получено выражение для расчета затрат аппаратуры на двоичный счетчик с достаточной точностью без привлечения экспериментальных данных, что позволило сократить количество экспериментов.

Способы представления 2 и 3 (на основе ЭС) используются, в основном, для ММ ВУ.

При **втором способе**, ММ представляется своей структурой (или, что то же самое, ЭС) в базе ММ НУ и других ММ ВУ ($МВ = \{M, C\}$). Выходные параметры такой ММ вычисляются с использованием стандартной процедуры, аналогичной процедуре вычисления выходных параметров всего устройства. Достоинства данного метода – относительная простота создания ММ, возможность

обработки стандартной процедурой. Недостатки – потери времени на расчет по стандартным алгоритмам. Данный способ хорошо подходит для дополнения библиотеки ММ макромоделями пользователя.

При **третьем способе** макромоделю представляется аналитическими выражениями для расчета выходных параметров, построенными непосредственно в процессе разработки ММ путем анализа ее ЭС ($МВ \equiv Y_2 = \Phi(Y_1, X_2)$). Это позволяет исключить вычислительные затраты на выполнение стандартной процедуры расчета выходных параметров. Недостатком данного способа построения ММ является его высокая трудоемкость и неформализуемость, достоинством, как уже отмечалось, – высокая скорость расчета.

По сравнению с методами построения на основе эксперимента методы на основе ЭС не требуют проведения экспериментов, позволяют создать более универсальные модели, учесть большее кол-во входных параметров, но предполагают разработку и, возможно, анализ ЭС, что может являться непростой задачей.

В качестве примера ММ ВУ, использующей третий способ представления, рассмотрим ММ буфера типа «очередь» (FIFO). ЭС буфера в базисе ММ НУ показана на рисунке 7.

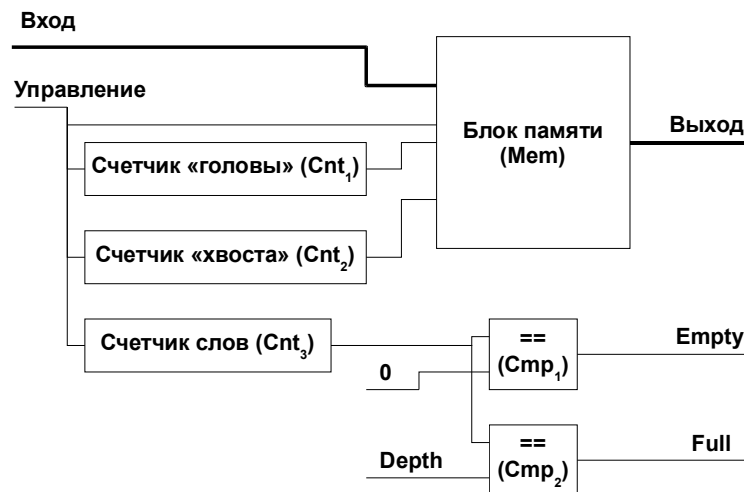


Рисунок 7 Эквивалентная схема буфера типа «очередь».

Основные независимые входные параметры блока: разрядность хранимых данных (W_{data}); объем хранимых данных ($Depth$), то есть количество хранимых слов разрядности W_{data} . Введем зависимый входной параметр данного СФ-блока: $W_{Depth} \in X_{2^3}$, который определяется как: $W_{Depth} = \lceil \log_2(Depth) \rceil$. Квадратные скобки обозначают округление до ближайшего целого в большую сторону.

На основе ЭС были сформированы выражения для расчета выходных параметров данной ММ. При расчете используются ММ НУ. Объем необходимых логических ресурсов:

$$L_{FIFO} = 3 \cdot L_{cnt}(W_{Depth}) + 2 \cdot L_{cmp}(W_{Depth}) + L_{mem}(W_{data}, Depth) \quad , \text{где}$$

$L_{cnt}()$, $L_{cmp}()$, $L_{mem}()$ – функции расчета количества логических ресурсов для счетчика, компаратора и блока памяти соответственно, с учетом заданных значений параметров. Эти функции входят в состав соответствующих ММ НУ. Время срабатывания FIFO:

$$t_{FIFO} = \max (t_{cnt}(W_{Depth}) , t_{cmp}(W_{Depth}) , t_{mem}(W_{data}, W_{Depth})) \quad , \text{где}$$

$t_{cnt}()$, $t_{cmp}()$, $t_{mem}()$ – функции расчета времени срабатывания счетчика, компаратора и блока памяти соответственно.

Объем памяти определяется лишь затратами на блок памяти:

$$M_{FIFO} = M_{mem}(W_{data}, W_{Depth})$$

$M_{mem}()$ – функция для расчета необходимого объема памяти на блок памяти с заданными параметрами.

Количество сегментов памяти (MS-Memory Segment):

$$MS_{FIFO} = MS_{mem}(W_{data}, W_{Depth})$$

$MS_{mem}()$ – функция для расчета количества необходимых сегментов памяти для блока памяти с заданными параметрами.

Разработанная библиотека включает в себя следующие ММ:

- ММ ВУ для: КИХ-фильтра, контроллера SDRAM, буфера типа «очередь».
- ММ НУ для: регистра, сумматора, умножителя, счетчика, блока памяти, цифрового компаратора, блока выполнения поразрядных логических операций, блока извлечения квадратного корня.

Для всех макромоделей определены их выходные параметры и способы их расчёта, проведены эксперименты, подтвердившие достаточную для начальных этапов проектирования точность ММ: среднеквадратическое отклонение не превышает 8% от диапазона изменения выходного параметра, а относительная ошибка – 30%.

Также в главе три сформулированы рекомендации по выбору способа представления ММ при их разработке.

Глава четыре посвящена разработке САПР проектирования ЦУ на ПЛИС на основе МДМ. Предложена структура подсистем САПР, показанная на рисунке 8.

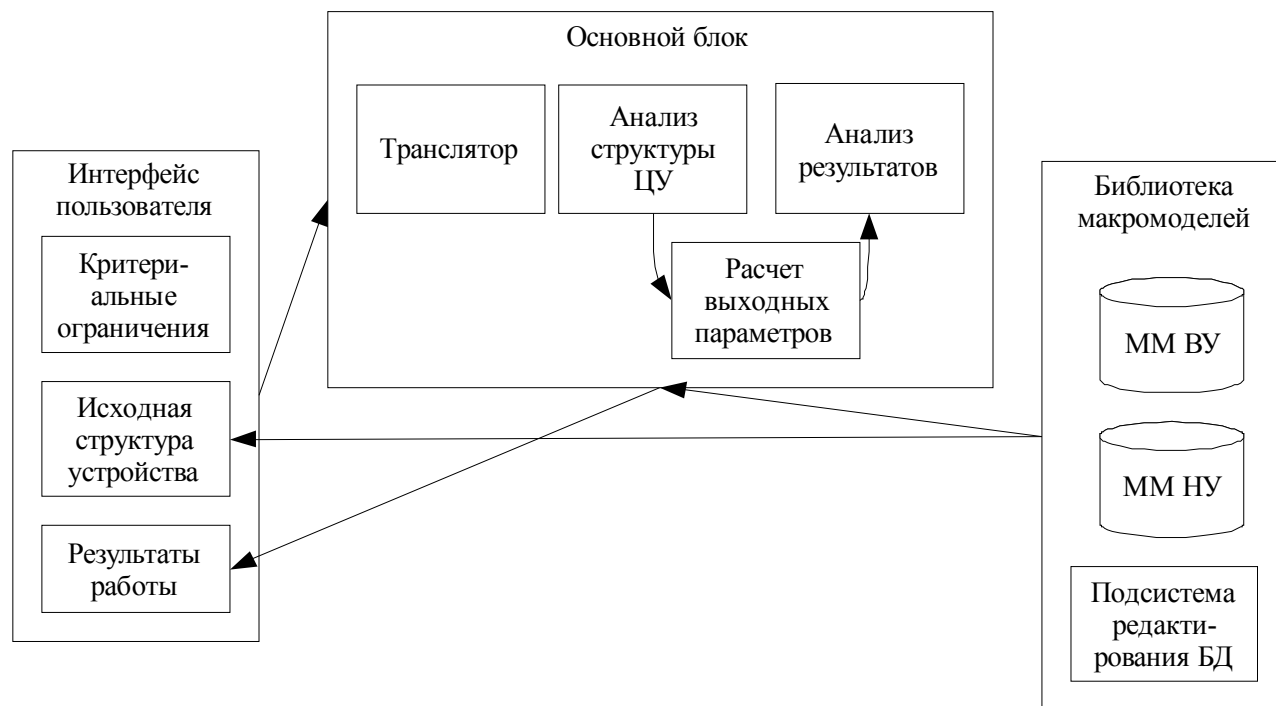


Рисунок 8 Структура подсистем САПР на основе МДМ

В предложенной структуре можно выделить три основных блока – интерфейс пользователя, блок основных алгоритмов, база данных ММ с СУБД. Блок основных алгоритмов обеспечивает трансляцию исходных данных, расчет выходных параметров по ММ. БД ММ содержит такую информацию о ММ, как состав ММ, их входные и выходные параметры, диапазоны изменения параметров.

В ходе работы была выполнена реализация прототипа САПР проектирования ЦУ на основе МДМ. При разработке прототипа САПР использовался язык Си++ и платформа Microsoft .NET, в качестве СУБД использована программа MS Access. Прототип САПР построен по компилирующему принципу, что в частности выражается в том, что ММ хранятся в скомпилированном виде.

Для реализации прототипа САПР были разработаны структуры данных для представления ММ, исходных и промежуточных данных. Реализованы алгоритмы расчета выходных параметров. Каждой макромодели из библиотеки, описанной в главе три, поставлен в соответствие класс языка Си++. Разработана иерархия классов макромodelей в соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования.

Интерфейс пользователя прототипа САПР включает четыре окна: основное окно программы, содержащее структуру ЦУ в табличной форме и органы управления; окно редактирования входных параметров ММ; окно с результатами расчета выходных параметров ЦУ; окно выбора модели ПЛИС.

Работа программы складывается из следующих шагов:

1. Ввод исходных данных (структура ЦУ, входные параметры ММ, выбор модели ПЛИС).

2. Трансляция исходных данных.
3. Выделение комбинационных путей (КП).
4. Расчет выходных параметров всех ММ, входящих в ЦУ.
5. Расчет задержек в КП, определение критического пути и быстродействия ЦУ. Расчет пропускной способности ЦУ.
6. Вывод результатов

Выигрыш по вычислительным затратам при использовании прототипа САПР можно оценить по времени расчета выходных параметров отдельных ММ. Как правило, для прототипа САПР это время не превышает десятков миллисекунд, что значительно меньше, чем при использовании САПР ПЛИС. Наибольший выигрыш по скорости расчета достигается для более-менее сложных ММ. Так, например, расчет выходных параметров умножителя для 64-разрядных операндов с использованием САПР ПЛИС занял 5 минут, а блока извлечения квадратного корня для 32-разр. операндов – 4,5 минуты. Время расчета этих ММ в прототипе САПР не превышает 10мс, что делает возможным использование многовариантного анализа при структурно-параметрическом синтезе ЦУ.

В главе пять приведены примеры использования предложенных в работе методов при проектировании реальных устройств. Так, в частности, была решена задача эскизного проектирования контроллера видеоканалов многоканального регистратора сигналов РИЦ822. Требовалось решить следующие задачи: определить оптимальную разрядность слов внешней памяти, обеспечивающую требуемую пропускную способность видеоканала при минимальных затратах ресурсов; выбрать модель ПЛИС фирмы Altera серии АСЕХ1К для реализации устройства.

Для решения поставленных задач были оценены выходные параметры основной части контроллера – тракта передачи данных с использованием МДМ. Оценка проводилась как вручную, так и с применением прототипа САПР. В последнем случае время расчета составило 1,3с. по сравнению с 38с. при использовании САПР ПЛИС. Таким образом, время расчета сократилось почти в 30 раз, а общая экономия времени оценки выходных параметров для девяти вариантов составила 5,5 минут при точности оценки не ниже 30%. Примерное время ввода данных в прототип САПР – 20мин., в САПР ПЛИС – 4-5 часов, что в 12-15 раз дольше.

Также были проанализированы три варианта структурной реализации модуля зашифрования/расшифрования по алгоритму ГОСТ28147. Для всех вариантов определены выходные параметры с точностью не хуже 31%. Сделаны выводы по выбору наилучшей структурной реализации модуля, а также модели ПЛИС. Оценка выходных параметров по МДМ с использованием ручного расчета заняла около 3ч.,

в то время как аналогичная оценка с использованием САПР ПЛИС с учетом времени ввода исходных данных потребовала большего времени – почти 10 часов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен и реализован комбинированный (нисходяще-восходящий) маршрут проектирования ЦУ на основе ПЛИС с использованием двухуровневого макро моделирования, позволяющий учесть специфику аппаратной базы на ранних этапах проектирования.
2. Предложены и разработаны метод и процедуры оценки выходных параметров ЦУ на ПЛИС с использованием двухуровневого макро моделирования, отличающиеся малыми затратами времени на их вычисление.
3. Предложен и разработан метод структурно-параметрического синтеза ЦУ на ПЛИС на основе направленного поиска по дереву И-ИЛИ. Метод отличается от известных оригинальным представлением вершин дерева И-ИЛИ макро моделями верхнего и нижнего уровня и их входными параметрами, что позволяет определить оптимальные значения параметров компонентов ПЛИС.
4. Предложен метод создания макро моделей, основанный на комбинировании различных способов их построения. Метод обеспечивает компромисс между конфликтными требованиями высокой точности и малых вычислительных затрат.
5. Разработана методика проведения экспериментов и обработки результатов при создании макро моделей на основе экспериментальных данных. Предложены критерии оценки адекватности полученных макро моделей.
6. Разработаны библиотеки макро моделей нижнего и верхнего уровня. Определено множество макро моделируемых узлов, выделены их важнейшие входные параметры. Проведена проверка адекватности полученных макро моделей.
7. Предложен общий алгоритм работы и структура подсистем САПР на основе метода двухуровневого макро моделирования. Выполнена программная реализация прототипа САПР на основе двухуровневого макро моделирования.
8. Показана эффективность применения метода двухуровневого макро моделирования на ранних этапах проектирования ЦУ на основе ПЛИС. Применение МДМ позволило существенно (почти в 30 раз) снизить трудоемкость оценки выходных параметров устройства по сравнению с существующими методами при приемлемой для ранних этапов проектирования точности результатов.

Публикации по теме диссертации

1. Ходоровский, А. З. Мобильный измерительный комплекс [Текст] / А. З. Ходоровский, М. В. Рузин, Р. А. Гришин // Информатика, социология, экономика, менеджмент: сборник научных трудов, ч. 2. – М.: АМИ. – 2006. – №1. – с.176-180.
2. Гришин, Р. А. Автоматизация процесса графической обработки видео в реальном масштабе времени с применением программируемых логических интегральных схем [Текст] / Р. А. Гришин, А. М. Петраков // Вестник компьютерных и информационных технологий: журнал. – М.: Машиностроение. – 2008. – №11(53). – с.8-11.
3. Гришин, Р. А. Оценка основных характеристик цифровых устройств на программируемых логических интегральных схемах на ранних этапах проектирования [Текст] / Р. А. Гришин, А. М. Петраков // Космические информационно-управляющие системы: сборник научных трудов. – М.: ФГУП «ЦНИИ Комета». – 2009. – №3. – с.124-128 .
4. Ильин, В. Н. Методика оценки основных параметров цифровых устройств на ПЛИС на ранних этапах проектирования с использованием двухуровневого макро моделирования [Текст] / В. Н. Ильин, Р. А. Гришин // Информационные технологии: журнал. – М.: «Новые технологии». – 2009. – №7(155). – с. 39-46.
5. Ильин, В. Н. Анализ различных вариантов реализации алгоритма за/расшифрования с использованием двухуровневого макро моделирования [Текст] / В. Н. Ильин, Р. А. Гришин // Вестник МАИ: журнал. – М.: МАИ-Принт. – 2010. – №3. – с. 200-205.

Подписано в печать 27.10.10. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в множительном центре Московского авиационного института
(государственного технического университета)