

Ватутин Эдуард Игоревич

**ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ АКСЕЛЕРАТОР ДЛЯ БЫСТРОГО
СУБОПТИМАЛЬНОГО РАЗБИЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ
ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вы-
числительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет» на кафедре вычислительной техники в совместной научно-исследовательской лаборатории Центра информационных технологий в проектировании РАН и Курского государственного технического университета: «Информационные распознающие телекоммуникационные интеллектуальные системы».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель наук РФ
Титов Виталий Семенович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Бурмака Александр Александрович

кандидат технических наук
Беляев Юрий Валентинович

Ведущая организация:

*Белгородский государственный техноло-
гический университет им. В.Г. Шухова*

Защита состоится 25 июня 2009 г. в 14-00 часов в конференц-зале на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.02 при ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет» по адресу: г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Автореферат разослан 23 мая 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.105.02

_____ Е.А. Титенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Системы логического управления (СЛУ) являются одним из распространенных классов цифровых управляющих систем, проблемы анализа и синтеза которых на протяжении многих лет остаются в центре внимания отечественных и зарубежных ученых (С.И. Баранов, А.А. Баркалов, В.И. Варшавский, В.А. Горбатов, А.Д. Закревский, И.В. Зотов, В.Г. Лазарев, В.З. Магергут, Е.И. Пийль, Е.Н. Турута, В.С. Харченко, А.А. Шалыто, С.А. Юдицкий, T. Agerwala, S. Husson, R. Puri и др.). Современные СЛУ – параллельные многомодульные однородные системы, объединяющие сотни и тысячи процессорных узлов. Как правило, это многофункциональные открытые системы, способные оперативно перестраиваться на новый алгоритм управления, выбираемый из некоторого (часто заранее неизвестного) множества алгоритмов. Подобные системы могут выполнять комплексные управляющие алгоритмы теоретически неограниченной сложности при условии их предварительного разбиения (декомпозиции) на частные алгоритмы (блоки), назначаемые на отдельные модули. При этом длительность процессов начальной настройки, отладки или последующей перенастройки системы, выполняемых обычно автоматизировано, во многом определяется временем поиска подходящего разбиения, сокращение которого ведет к повышению производительности труда и увеличению коэффициента готовности СЛУ.

Разбиение параллельных алгоритмов осуществляется с учетом структурных и технологических ограничений СЛУ, при этом выбор окончательного решения производится по ряду критериев качества (связность и интенсивность взаимодействия частных алгоритмов, число избыточных частных алгоритмов, межблочное распределение микроопераций и логических условий), влияющих на основные функциональные характеристики системы (аппаратная сложность и производительность). Нахождение оптимального решения задачи разбиения практически недостижимо для алгоритмов управления реальной сложности (20 вершин и более) ввиду необходимости перебора и сопоставления очень большого числа различных разбиений (ограниченного сверху числом Белла). В связи с этим на практике распространены эвристические алгоритмы декомпозиции, обеспечивающие приближенное (субоптимальное) решение задачи за приемлемое время (С.И. Баранов, А.А. Баркалов, В.А. Горбатов, В.С. Харченко). Однако известные эвристические алгоритмы характеризуются низким качеством получаемых решений из-за последовательного характера процедур обработки. Более высокое качество разбиений обеспечивает метод параллельно-последовательной декомпозиции (И.В. Зотов). В то же время он требует существенных затрат времени и памяти ЭВМ при программной реализации.

Потребность в построении разбиений высокого качества при ограниченных временных затратах на их получение приводит к необходимости переноса процедур обработки с программного уровня на аппаратный путем разработки специализированных устройств-акселераторов, жестко адаптированных к особенностям решаемой задачи. Известные устройства (В.Л. Баранов, В.В. Васильев, А.Г. Додонов, В.В. Епихин, В.М. Глушань, В.А. Калашников, В.М. Курейчик, А.Н. Чаплиц, В.Н. Червяцов, Л.И. Щербаков, В.И. Ян и др.) для решения схожих задач на графах характеризуются недостаточными функциональными возможностями или избыточной вычислительной сложностью.

Таким образом, существует **противоречие** между необходимостью повышения качества разбиений с целью улучшения функциональных характеристик устройств логического управления и снижения вычислительных затрат на поиск субоптимальных разбиений. В связи с этим актуальной **научно-технической задачей** является разработка новых методов, алгоритмов и аппаратно-программных средств, позволяющих формировать разбиения более высокого качества при ограниченных затратах времени на их построение.

Работа выполнена в рамках совместных НИР КурскГТУ и ОХП ОКБ «Авиаавтоматика» Курского ОАО «Прибор» (темы №1.121.03, №1.218.08П), а также в соответствии с планом НИР Курского государственного технического университета по единому заказ-наряду Министерства образования РФ в 2003–2009 годах.

Объектом исследования являются многомодульные однородные системы логического управления, ориентированные на реализацию комплексных параллельных управляющих алгоритмов.

Предметом исследования являются методы, процедуры и аппаратно-программные средства разбиения параллельных алгоритмов логического управления на частные алгоритмы ограниченной сложности.

Целью работы является повышение качества получаемых разбиений при одновременном сокращении временных затрат на его достижение на основе разработки аппаратно-ориентированных правил преобразования и акселератора для построения субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов на множество последовательных алгоритмов ограниченной сложности.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **основные задачи**:

1. Анализ существующих методов декомпозиции графов, управляющих алгоритмов и устройств-акселераторов для решения комбинаторных задач.
2. Разработка правил преобразований граф-схем управляющих алгоритмов, позволяющих перенести построение разбиений на аппаратный уровень, доказательство их корректности.
3. Разработка устройства-акселератора для реализации наиболее трудоемких операций и преобразований при декомпозиции управляющих алгоритмов. Оценка сложности разработанного устройства и выигрыша во времени обработки при его применении.
4. Проектирование программно-аппаратного комплекса для автоматизации процедур разбиения параллельных алгоритмов логического управления различными методами и проведения вычислительных экспериментов над выборками управляющих алгоритмов.
5. Исследование качества получаемых решений на основе серии вычислительных экспериментов с использованием разработанной программной среды в различных условиях. Оценка трудоемкости разработанного метода формирования разбиений и анализ путей снижения трудоемкости выполняемых преобразований.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Сформулированы редуцирующие правила преобразования схем параллельных управляющих алгоритмов, основанные на представлении алгоритма, описанного системой R -выражений, в виде дерева и позволяющие перенести оценку числовых характеристик разбиений в процессе декомпозиции на аппаратный уровень. Выявлен и обоснован ряд специфических свойств R -выражений (не присущих графам и деревьям общего вида),

позволяющих существенно снизить вычислительную сложность алгоритмов их обработки. С учетом выявленных свойств разработаны аппаратно-ориентированные процедуры обработки R -выражений, представленных в виде деревьев, обеспечивающие возможность формирования множества сечений исходного алгоритма управления за полиномиальное время с одним направлением обхода дерева и, как следствие, существенное снижение затрат памяти при хранении системы R -выражений и аппаратной сложности акселератора.

2. Разработаны процедуры построения матрицы отношений вершин и системы описывающих управляющих алгоритм R -выражений по его граф-схеме, обеспечивающие возможность классификации отношений между вершинами за время, не зависящее от числа вершин в алгоритме, и быстрого построения системы из множества простейших R -выражений.

3. На основе предложенных правил и процедур разработана структурно-функциональная организация устройства-акселератора, позволяющего выполнять наиболее трудоемкие операции (отыскание базового сечения, построение множества сечений) декомпозиции алгоритмов на аппаратном уровне, отличающаяся параллельной обработкой элементов наборов листьев и полей обрабатываемых деревьев, параллельным чтением и ассоциативным поиском значений с использованием различных портов памяти и обеспечивающая N -кратное снижение временных затрат на преобразование R -выражений при декомпозиции управляющих алгоритмов (N – число вершин управляющего алгоритма).

4. Путем проведения вычислительных экспериментов с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса формирования разбиений получены зависимости, позволившие установить повышение качества получаемых разбиений при использовании разработанных правил и процедур с различными значениями технологических ограничений и разным числом вершин в обрабатываемых алгоритмах управления.

Достоверность результатов, положений и выводов диссертации обеспечивается корректным и обоснованным применением методов математической логики, теории множеств и графов, комбинаторной теории, теории вероятностей и математической статистики, методов оптимизации и линейного программирования, теории проектирования конечных автоматов, дискретных систем и устройств ЭВМ, и подтверждается экспертизой РосПатента, результатами практического использования, а также вычислительным экспериментом с применением зарегистрированных в установленном порядке программных средств.

Практическая ценность результатов работы заключается в следующем:

1. Декомпозиция управляющих алгоритмов с использованием разработанных правил и процедур позволяет получать разбиения более высокого качества с минимальным числом блоков в 85–99% случаев, что обеспечивает создание более компактных (фактически, более дешевых) СЛУ с меньшей аппаратной сложностью (за счет уменьшения среднего числа блоков до 13% и снижения сложности сети межблочных связей до 22%) и большим быстродействием (за счет снижения интенсивности межблочных взаимодействий до 20%).

2. Реализация разработанных правил и процедур в созданном акселераторе позволяет снизить время выполнения наиболее трудоемких преобразований (построение множества сечений) при декомпозиции управляющих алгоритмов в N раз, обеспечивая уменьше-

ние трудоемкости декомпозиции алгоритмов реальной размерности (более 1000 вершин) в 2,7 раза, что весьма существенно при разработке или оперативной перенастройке СЛУ ввиду повышения производительности труда и коэффициента готовности системы.

Реализация и внедрение. Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе Курского государственного технического университета в рамках дисциплин «Программирование на языке высокого уровня», «Схемотехника ЭВМ», «Методы оптимизации», «Теория принятия решений», а также внедрены в ООО «Сайнер-Курск» (г. Курск) и ОАО «Прибор» (г. Курск), что подтверждается соответствующими актами.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Редукционные правила преобразования схем параллельных управляющих алгоритмов, отличающиеся представлением алгоритма, описанного системой R -выражений, в виде дерева и позволяющие оценивать числовые характеристики разбиений в ходе декомпозиции непосредственно на аппаратном уровне.
2. Процедуры построения матрицы отношений вершин и системы R -выражений, описывающих исходный управляющий алгоритм, позволяющие классифицировать отношения между вершинами за время, не зависящее от общего числа вершин, и быстро формировать системы из множества простейших R -выражений.
3. Специфические свойства R -выражений, позволяющие существенно снизить вычислительную сложность алгоритмов их обработки, и аппаратные процедуры обработки R -выражений, представленных в виде деревьев, обеспечивающие возможность быстрого построения множества сечений алгоритма управления за полиномиальное время и снижение аппаратной сложности акселератора благодаря использованию только одного направления обхода дерева.
4. Структурно-функциональная организация акселератора с параллельной обработкой элементов наборов листьев и полей дерева, параллельным чтением и ассоциативным поиском значений с использованием различных портов памяти, обеспечивающая быстрое преобразование R -выражений при декомпозиции управляющих алгоритмов.
5. Программно-аппаратный комплекс для быстрого автоматизированного построения субоптимальных разбиений, включающий в своем составе программную реализацию процедур промежуточных преобразований и акселератор, позволяющий проводить оценку качества полученных разбиений и трудоемкости декомпозиции на выборках параллельных управляющих алгоритмов.
6. Зависимости степени приближения получаемых разбиений к оптимуму при использовании разработанных правил и процедур и известных методов декомпозиции от значений технологических ограничений и параметров обрабатываемых алгоритмов управления, демонстрирующие снижение среднего числа блоков разбиений до 13%, уменьшение сложности сети межблочных связей до 22% и интенсивности межблочных взаимодействий до 20%. Оценки трудоемкости декомпозиции управляющих алгоритмов при программной и аппаратной реализации.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на региональных, российских и международных конференциях: Параллельные вычисления и задачи управления «РАСО» (Москва, 2004, 2008); Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems (Испания, 2004, 2005, 2007, Италия, 2006); Идентификация систем и задачи управления «SICPRO»

(Москва, 2006, 2008); Информационные технологии моделирования и управления (Воронеж, 2004); Интеллектуальные и информационные системы (Тула, 2004, 2005); Балтийская олимпиада по автоматическому управлению «ВОАС» (Санкт-Петербург, 2006, 2008); Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании (Екатеринбург, 2007); Образование, наука, производство (Белгород, 2004, 2006); Молодежь и XXI век (Курск, 2003, 2004, 2007, 2008); Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание – 2003» (Курск, 2003, 2005, 2008); Материалы и упрочняющие технологии (Курск, 2003); Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации (Курск, 2006); Перспективы развития систем управления оружием (Курск, 2007); а также на научных семинарах кафедры вычислительной техники Курск-ГТУ с 2003 по 2009 гг.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 39 печатных работ, среди которых 10 статей (из них 6 по перечню ВАК), 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2005613091, № 2007613222) и 1 патент на изобретение (№ 2336556). Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. В работах по теме диссертации, опубликованных в соавторстве, лично соискателем выполнено следующее: в [1, 7] сформулированы процедуры построения множества сечений параллельного алгоритма с использованием системы R -выражений; в [3, 8, 9, 12, 13] разработаны процедуры модифицированной параллельно-последовательной декомпозиции; в [11, 14] определены детали реализации алгоритмов вычисления значений критериев качества; в [15] предложена архитектура аппаратно-программного комплекса для автоматизированного построения разбиений и проведения вычислительных экспериментов; в [5, 16, 17, 18, 20, 21] разработана методика проведения вычислительных экспериментов, а также проведено исследование экспериментальных результатов и влияния на них ряда модификаций методов декомпозиции; в [2, 4, 6, 10, 19] предложена схмотехническая реализация акселератора; в [22] синтезирован ряд коммутационных блоков, необходимых для аппаратной реализации процедур разбиения комплексных алгоритмов логического управления.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 128 источников и 1 приложения. Работа содержит 155 страниц основного текста, 64 рисунка и 16 таблиц.

Области возможного использования. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при создании многофункциональных систем логического управления, способных оперативно перестраиваться на новый алгоритм управления при изменении управляемого объекта (сборочные комплексы, бортовая автоматика, реконфигурируемые коммутационные узлы, перестраиваемые вычислительные структуры). Кроме того, ряд сформулированных и доказанных свойств R -выражений может найти применение в задачах, решаемых современными оптимизирующими компиляторами.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, отмечены научная новизна, практическая ценность и результаты реализации работы.

В первой главе отмечаются особенности задачи разбиения параллельных алгоритмов логического управления на последовательные блоки ограниченной сложности, проводится анализ существующих методов декомпозиции графов, сетей Петри и управляющих алгоритмов, подробно рассматриваются известные аппаратно-ориентированные методы решения комбинаторных задач.

Задача разбиения алгоритмов управления относится к классу *NP*-трудных, что не позволяет находить ее оптимальное решение для управляющих алгоритмов реальной сложности ($n = 1000$ вершин и более) за приемлемое время. Оценка числа возможных разбиений алгоритма с n вершинами, как известно, характеризуется числом Белла B_n (например, $B_{20} \approx 5,17 \cdot 10^{13}$). В связи с этим для решения задачи на практике используются эвристические методы разбиения.

По способу формирования решения выделяются последовательные методы разбиения (методы С.И. Баранова, А.Д. Закревского, В.Г. Лазарева, метод параллельно-последовательной декомпозиции И.В. Зотова), предусматривающие формирование единственного решения с использованием ряда эвристик, и итерационные (метод случайного перебора, генетические алгоритмы, метод В.С. Харченко), подразумевающие перебор вариантов решения и выбор наилучшего. Ряд этих методов ориентирован на разбиение чисто последовательных алгоритмов управления, однако допускает простое расширение на класс параллельных алгоритмов (метод С.И. Баранова). Некоторые из них предполагают сведение задачи выбора разбиения к другим задачам (метод А.Д. Закревского – поиск минимальной раскраски графа). Наконец, известны методы, созданные для разбиения параллельных алгоритмов управления с учетом их специфики (метод В.С. Харченко, метод параллельно-последовательной декомпозиции И.В. Зотова). Кроме того, имеется целый ряд задач, методы решения которых потенциально применимы при разбиении управляющих алгоритмов. Это, например, задачи размещения элементов и трассировки соединений при коммутационно-монтажном проектировании радиоэлектронной аппаратуры, проектирование топологии сетей Ethernet с максимизацией сетевого трафика внутри доменов коллизии и минимизацией между ними. Все эти задачи, в конечном счете, также сводятся к разбиению графов на подграфы.

Для решения обозначенных выше задач на практике применяются эвристические алгоритмы, большинство из которых характеризуются асимптотической временной сложностью порядка $O(n^2) - O(n^3)$. Однако даже полиномиальные алгоритмы, относительно быстро решающие небольшие (размерностью порядка $n = 100 \div 1000$) задачи, могут потребовать очень больших временных затрат при решении задач реальной размерности (трассировка межсоединений современных СБИС, насчитывающих до 2 млрд. транзисторов, размещение функционально законченных фрагментов схем при их ПЛИС-реализации, насчитывающих до 50 млн. вентилях и т.д.). В подобных случаях применимы два существенно различных подхода.

Первый из них заключается в распараллеливании алгоритмов решения задачи (или разработке специализированных хорошо распараллеливаемых модификаций известных методов) с использованием различных форм параллелизма с целью последующего решения на многоядерной/многопроцессорной машине, вычислительном кластере или суперкомпьютере. Спектр подобных задач весьма широк.

Однако, несмотря на очевидные преимущества параллельного выполнения вычислений существует целый ряд задач, не получающих существенного выигрыша от подобного рода распараллеливания. Основными препятствиями, мешающими эффективному параллельному исполнению, является либо последовательный характер решаемой задачи, либо наличие большого числа синхронизаций и/или попарных обменов данными, приводящих к простоям процессоров и фактически сводящих на нет выигрыш от параллельного выполнения. Если проблемы последовательного характера алгоритмов обработки принципиально неразрешимы в свете стремления получить выигрыш от параллельного исполнения, то целый ряд задач допускает ускоренное решение путем разработки специализированных вычислительных средств, жестко адаптированных к их структуре.

Подобные аппаратно-ориентированные решения, несмотря на их относительно узкую сферу применения и, как следствие, высокую стоимость, способны достигать наибольшего выигрыша в быстродействии по сравнению как с последовательными реализациями алгоритмов, так и их с параллельными реализациями на многопроцессорных машинах. Примерами устройств, предназначенных для решения задач такого рода, являются устройства для анализа связности графа и определения числа и состава компонент связности, поиска кратчайших путей в графе, проверки изоморфизма графов, выделения клик в графе, анализа планарности графа, разбиения графа на подграфы, обработки изображений и кодирования видео высокой четкости, поиска последовательностей биополимеров в составе ДНК и РНК, специализированные акселераторы для моделирования задач движения и гравитационного взаимодействия тел, трассировки межсоединений печатных плат или интегральных микросхем и многие другие.

Таким образом, можно выделить целый ряд диктуемых практикой труднорешаемых задач. Возможно их точное решение (при малой размерности, $n \approx 10 \div 15$), приближенное решение с использованием универсальных, широко распространенных и относительно дешевых вычислительных систем (при средней размерности, $n \approx 100 \div 1000$) или приближенное решение с применением дорогих суперкомпьютеров или специализированных акселераторов (задачи большой размерности, $n \approx 10000$ и более).

Во второй главе дается формализованная постановка задачи разбиения параллельных управляющих алгоритмов, приводится описание модифицированного метода параллельно-последовательной декомпозиции, выявляются и строго обосновываются специфические свойства R -выражений, позволяющие существенно снизить вычислительную сложность процедур декомпозиции, и формулируются аппаратные процедуры обработки R -выражений, представленных в виде деревьев, обеспечивающие возможность построения множества сечений алгоритма управления за полиномиальное время.

Опишем исходный алгоритм логического управления параллельной граф-схемой (ПарГСА) (В.И. Варшавский). ПарГСА $G^0 = \langle A^0, V^0 \rangle$ – взвешенный орграф с множеством вершин A^0 и множеством дуг V^0 . Вершинам ПарГСА $a_i \in A^0$, $i = \overline{1, N}$ припишем ряд параметров: тип (начальная, конечная, операторная, условная, объединения альтернативных дуг, синхронизации), вес W (количество микрокоманд, занимаемых вершиной в памяти контроллера), множество микроопераций Y и логических условий X (В.С. Харченко). В качестве параметров дуг $v_i \in V^0$, $i = \overline{1, M}$ выделим вероятность активации дуги α и среднее число передач управления δ (И.В. Зотов). В дальнейшем ограничимся рас-

смотрением подкласса параллельных граф-схем, удовлетворяющих свойствам безопасности, живости и устойчивости (С.И. Баранов, А.Д. Закревский).

С учетом сказанного задачу разбиения параллельного алгоритма логического управления сформулируем следующим образом. Необходимо получить разбиение $Sep(A^0) = \{A_1, A_2, \dots, A_H\}$ множества вершин A^0 алгоритма управления на H блоков, удовлетворяющее структурным ограничениям

$$\bigcup_{i=1}^H A_i = A^0, \quad A_i \neq \emptyset, \quad A_i \cap A_j = \emptyset, \quad i, j = \overline{1, H}, \quad i \neq j,$$

$$\neg(a_i \omega a_j) \forall a_i, a_j \in A_k, \quad i \neq j, \quad k = \overline{1, H},$$

где ω – символ отношения параллельности, при заданных технологических ограничениях базиса СЛУ на суммарный вес вершин блока (W_{\max}), общее число его логических условий ($n_{\text{ЛУ}}$) и микроопераций ($n_{\text{МО}}$):

$$W(A_i) \leq W_{\max}, \quad |X(A_i)| \leq n_{\text{ЛУ}}, \quad |Y(A_i)| \leq n_{\text{МО}}, \quad i = \overline{1, H},$$

где $W(A_i) = \sum_{a_j \in A_i} W(a_j)$ – суммарный вес вершин в составе i -го блока,

$X(A_i) = \bigcup_{a_j \in A_i} X(a_j)$ – множество логических условий, входящих в вершины i -го блока,

$Y(A_i) = \bigcup_{a_j \in A_i} Y(a_j)$ – множество микроопераций i -го блока. При этом необходимо минимизировать следующие критерии качества: число блоков $Z_H = H(Sep(A^0))$, сложность

сети межблочных связей $Z_\alpha = \sum_{i=1}^H \sum_{j=1, j \neq i}^H \alpha(A_i, A_j)$, интенсивность межблочных взаимодействий

$Z_\delta = \delta(Sep(A^0))$ и степени дублирования логических условий

$Z_X = \sum_{i=1}^H |X(A_i)| - |X(A^0)|$ и микроопераций $Z_Y = \sum_{i=1}^H |Y(A_i)| - |Y(A^0)|$ соответственно.

Ниже представлены этапы построения разбиения согласно приведенной формулировке задачи модифицированным методом параллельно-последовательной декомпозиции:

1. Произвести приведение исходной граф-схемы G^0 к ациклической граф-схеме G^+ .
2. Выполнить объединение линейных участков (если разрешено условиями тестирования) граф-схемы G^+ с целью получения граф-схемы G^{L+} с меньшим числом вершин.
3. Ликвидировать «пустые» дуги граф-схемы G^{L+} путем добавления в них фиктивных операторных вершин с целью получения граф-схемы \tilde{G} .
4. Построить матрицу отношений M_R по граф-схеме \tilde{G} .
5. Сформировать систему R -выражений Ξ по граф-схеме \tilde{G} .
6. Выделить базовое сечение Ω_{\max} с использованием системы Ξ .
7. Построить множество смежных сечений \mathfrak{R} с использованием базового сечения Ω_{\max} и системы Ξ .

8. Сформировать скелетный граф G^S по исходной граф-схеме G^0 .
9. Получить искомое разбиение $Sep(A^0)$ с использованием всех построенных структур данных.

Основой метода является построение разбиения из множества сечений путем преобразования системы R -выражений (конструктивных подмножеств вершин) Ξ с использованием правил u - и d -подстановки:

$$\begin{cases} i: X^R \rightarrow B^R \\ j: A^R \rightarrow C^R \end{cases} \Rightarrow i: X^R \rightarrow B^{R'}, \quad \begin{cases} i: C^R \rightarrow A^R \\ j: B^R \rightarrow X^R \end{cases} \Rightarrow j: B^{R'} \rightarrow X^R,$$

где $A^R, B^R, B^{R'}, C^R, X^R$ – некоторые R -выражения, входящие в ее состав. При этом R -выражение задается в виде рекуррентного определения

$$R = (a_i) \vee (R_{j_1} \bullet R_{j_2} \bullet \dots \bullet R_{j_k}) \vee (R_{k_1} | R_{k_2} | \dots | R_{k_p}),$$

где « \bullet » – обозначение отношения параллельности, а « $|$ » – альтернативы.

При практической реализации правил подстановки R -выражения удобно представлять в виде деревьев (рис. 1), а сами правила допускают разбиение на ряд более простых операций, к которым относятся проверка принадлежности, оценка ω -мощности, проверка изоморфизма, удаление изоморфного поддерева, вставка поддерева, раскрытие скобок и удаление «пропусков».

Операции обработки R -выражений, как и основанные на них процедуры выделения базового сечения и построения множества смежных сечений, характеризуются полиномиальной сложностью и при обработке деревьев ограничиваются одним направлением обхода элементов дерева (снизу-вверх) благодаря ряду особых свойств R -выражений, не присущих графам или деревьям общего вида и выявленных в ходе исследований.

Необходимое условие 1 отсутствия r -изоморфизма:

$$\exists L_i^A, \forall L_j^B, L_i^A [\not\sim] L_j^B \Rightarrow A^R [\not\subseteq] B^R,$$

где L_i^A – i -й набор листьев дерева A^R , $L_1[\sim]L_2 \Leftrightarrow (L_1 = L_2) \vee (L_1 \subset L_2) \vee (L_2 \subset L_1)$, $[\subseteq]$ – отношение r -изоморфизма деревьев (конструктивного включения R -выражений).

Необходимое условие 2 отсутствия r -изоморфизма:

$$\exists L_i^A, L_j^B, L_k^A, L_l^B : (L_i^A [\simeq] L_j^B) \wedge (L_k^A [\simeq] L_l^B) \Rightarrow A^R [\not\subseteq] B^R,$$

где $L_1[\simeq]L_2 \Leftrightarrow (L_1 \subset L_2) \vee (L_2 \subset L_1)$.

Следствие 1. $\exists L_i^X, L_j^X, i \neq j, u(L_i^X) = u(L_j^X)$, где $u(L_i^X)$ – функция, возвращающая предка элемента дерева.

Следствие 2. $\forall T_i^X, T_j^X = u(T_i^X) : t(T_i^X) \neq t(T_j^X)$, где T_i^X – i -й узел дерева X^R , $t(T_i^X)$ – тип узла дерева.

Лемма 1. $\forall L_i^X, L_j^X : L_i^X \cap L_j^X = \emptyset, i \neq j$.

Лемма 2. $\exists (a_k, a_l \in L_i^X) \wedge (a_k, a_l \in L_j^Y) \Rightarrow t(u(L_i^X)) = t(u(L_j^Y))$.

Теорема 1. $\forall L_i^A, L_j^B : L_i^A [\sim] L_j^B \Leftrightarrow \exists L_k^B, L_i^A [\sim] L_k^B, k \neq j$.

Теорема 2. $\exists A^R [\sim] X^R, X^R \subseteq B^R : \exists Y^R [\sim] X^R, Y^R \subseteq B^R, X^R \neq Y^R$, где $[\sim]$ – отношение эквивалентности (r -изоморфизма) деревьев.

Теорема 3. $\exists T_j^B = u(T_i^B), t(T_i^B) = t(T_j^B): n(T_i^B) = N_\chi^T$, где $n(T_i^B)$ – номер позиции элемента дерева в табличном представлении, N_χ^T – номер позиции в табличном представлении, в которую был скопирован корень дерева A^R в результате выполнения подстановки.

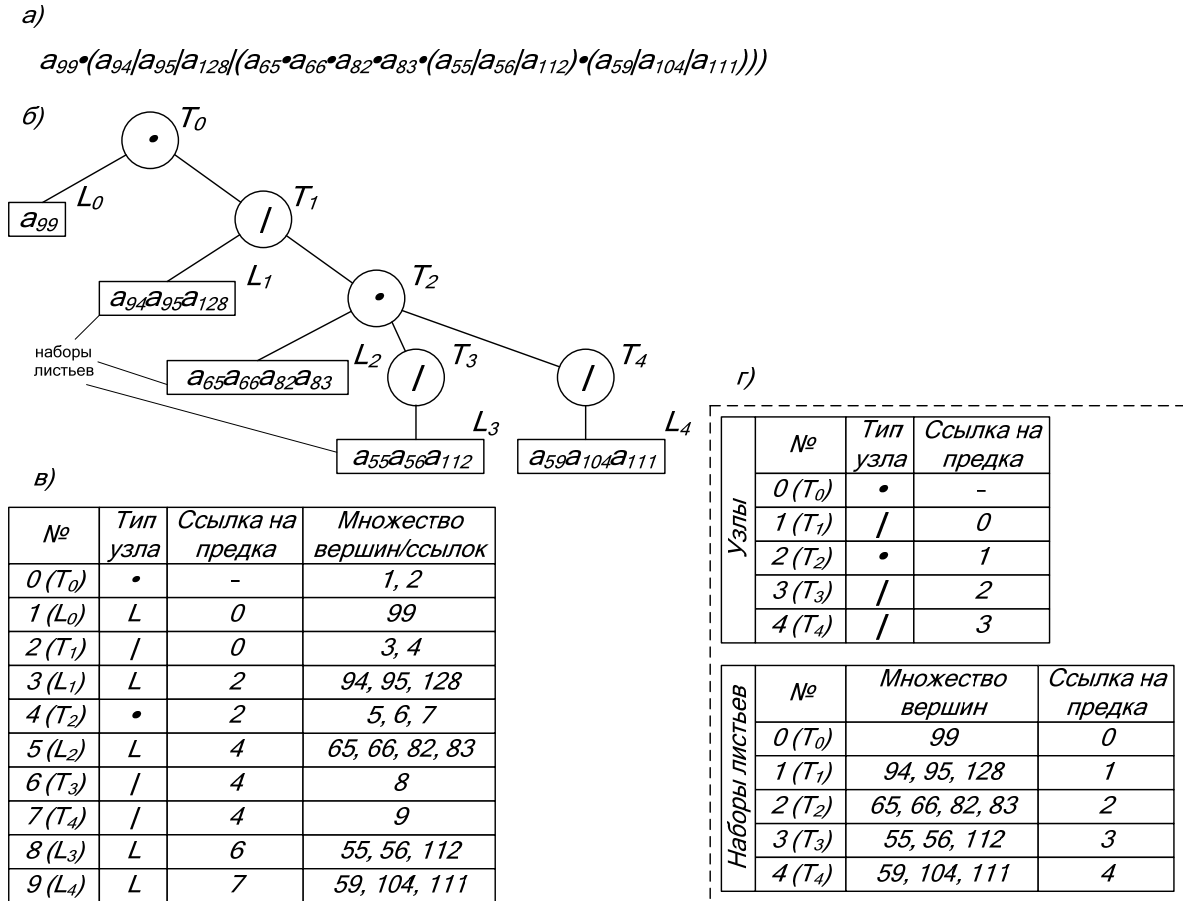


Рис. 1. Представление R -выражения (а) в виде дерева (б) и различные способы его табличного описания (в, г)

Асимптотические временная и емкостная сложность модифицированного метода параллельно-последовательной декомпозиции при обработке ациклических алгоритмов управления составляют $O(\bar{n}_L^2 N \cdot (N + M)^2)$ и $O(\bar{n}_R \log \bar{n}_R \cdot (N + M)^2)$ соответственно, где \bar{n}_L и \bar{n}_R – соответственно среднее число наборов листьев и среднее число элементов в представлении R -выражений в виде деревьев. Приведенные оценки сложности метода обеспечиваются асимптотическими сложностями алгоритмов операций обработки R -выражений. Затраты вычислительного времени на построение разбиений могут быть уменьшены путем переноса указанных операций с программного уровня на аппаратный.

Третья глава посвящена разработке структурно-функциональной организации устройства-акселератора, позволяющего выполнять наиболее трудоемкие операции параллельно-последовательной декомпозиции управляющих алгоритмов на аппаратном уровне на основе применения разработанных правил и процедур (см. рис. 2).

Хранение R -выражений осуществляется в табличном виде с использованием структуры из следующего набора полей: тип узла (ТУ), множество вершин (МВ), ссылка на

предка (СП), мощность узла (МУ), тип соответствия (ТС), номер соответствия (НС), удаляемый элемент (УЭ). Поля хранятся в однородной среде электронной модели дерева, являющейся по своей организации ассоциативной многопортовой памятью.

В структуру акселератора рис. 2 входят схемы проверки принадлежности вершины дереву (СППВД), расчета ω -мощности дерева (СРМД), проверки отношения нестроого включения (СПОНВ), удаления поддерева (СУП), вставки поддерева (СВП), раскрытия скобок (СРС) и удаления пустых позиций (СУПП). Например, операция проверки r -изоморфизма R -выражений выполняется схемой, приведенной на рис. 3.

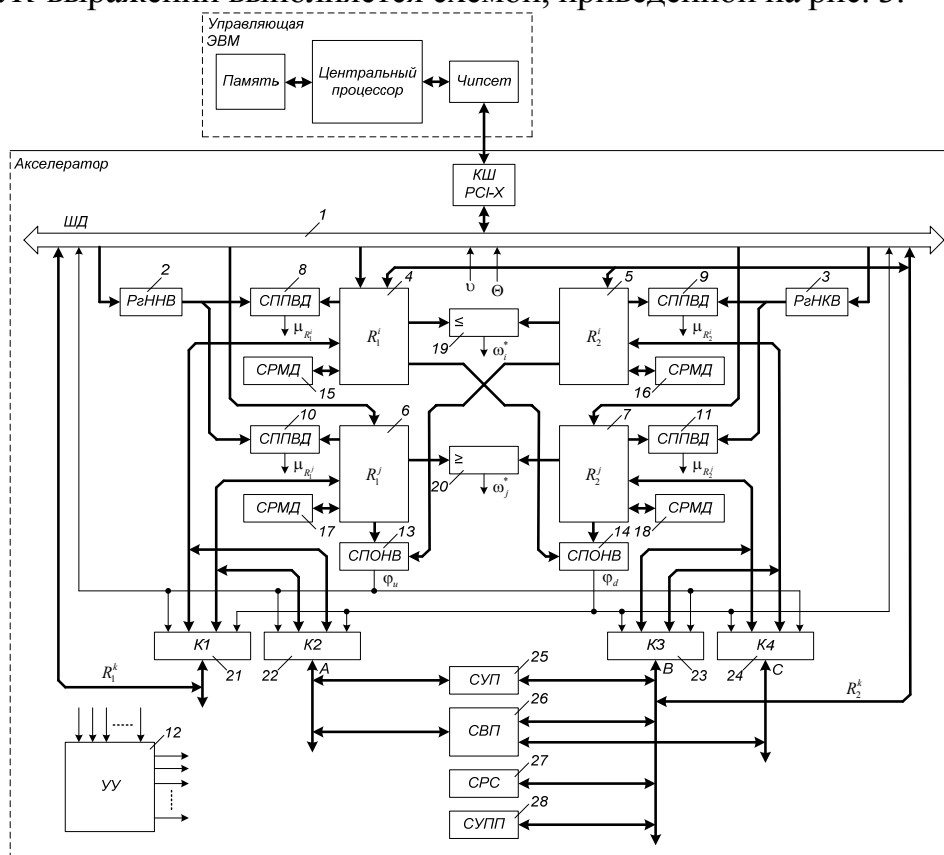


Рис. 2. Структурная схема акселератора для обработки R -выражений

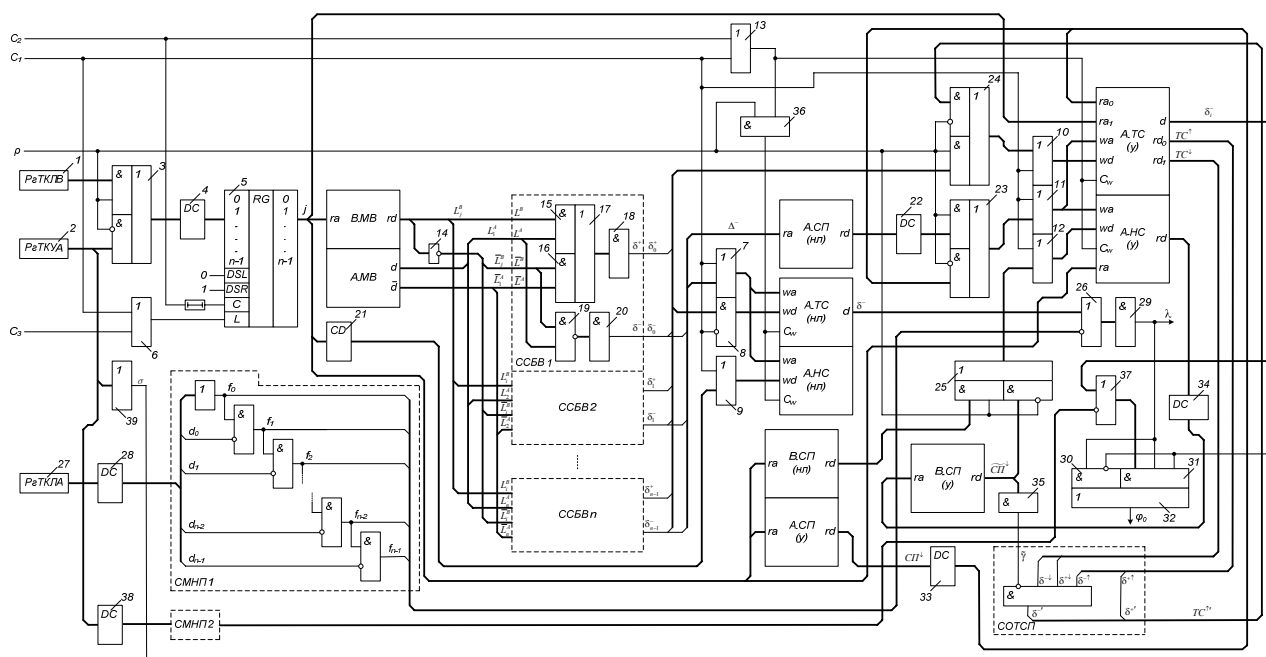


Рис. 3. Схема определения отношения нестроого включения (r -изоморфизма) R -выражений

Помимо перечисленных выше схем акселератор (рис. 2) содержит контроллер шины PCI Express (КШ PCI-X), регистры RгННВ номера начальной и RгНКВ номера конечной вершин соответственно; элементы памяти 4–7, хранящие R -выражения, входящие в состав пары обрабатываемых выражений системы Ξ ; коммутаторы $K1$ – $K4$, обеспечивающие модификацию трех R -выражений A^R , B^R и C^R из четырех, загруженных в акселератор, в зависимости от типа выполняемой подстановки (u - или d -) согласно двоичным значениям признаков φ_u и φ_d . После загрузки исходных значений управляющей машиной по шине данных 1 в элементы 2–7 устройством управления активируются схемы 15–18, в результате чего производится расчет ω -мощностей загруженных R -выражений. На выходах схем 8–11, 19, 20 формируются значения двоичных признаков $\mu_{R_1^i}, \mu_{R_2^i}, \mu_{R_1^j}, \mu_{R_2^j}, \omega_i^*, \omega_j^*$, которые определяют возможность проведения одной из подстановок, что идентифицируется единичным значением признака v , формируемого устройством управления 12. В случае если выполнение операции подстановки возможно, устройство управления поочередно активирует схемы 25–28, в результате чего на выходах коммутаторов $K1$ и $K2$ формируется обновленная пара R -выражений, соответствующих результату операции подстановки, и выставляется единичное значение признака готовности Θ . Обновленная пара R -выражений выдается на шину данных 1.

В результате с использованием акселератора производится построение множества сечений алгоритма управления. Остальные процедуры обработки, входящие в состав метода параллельно-последовательной декомпозиции, выполняются управляющей ЭВМ.

Выигрыш в скорости обработки R -выражений по сравнению с программной реализацией достигается за счет параллельной инициализации полей, параллельной векторной обработки элементов наборов листьев, параллельного чтения значений из различных портов памяти, параллельной обработки различных полей элементов дерева, ассоциативного поиска элементов с указанными значениями полей. Также при выполнении некоторых операций реализованы параллельная обработка элементов дерева, быстрый подсчет числа единичных бит в наборах листьев и быстрое выделение заданных граничных значений в двоичных векторах.

В четвертой главе приводятся оценки качества разбиений, получаемых модифицированным методом параллельно-последовательной декомпозиции, анализируется трудоемкость метода, определяется аппаратная сложность разработанного устройства, а также обеспечиваемый им выигрыш во времени обработки по сравнению с программной реализацией на компьютере с многоядерным процессором.

Анализ качества разбиений был выполнен в разработанной автором визуальной программной системе РАЕ. Первая серия вычислительных экспериментов была направлена на исследование поведения методов построения разбиений при наличии технологических ограничений. Полученные зависимости качественно схожи; например, зависимость вероятности получения минимального числа блоков в разбиении от ограничения на емкость памяти контроллера СЛУ приведена на рис. 4. Их анализ показывает существенное преимущество модифицированного метода параллельно-последовательной декомпозиции по сравнению с известным методом С.И. Баранова.

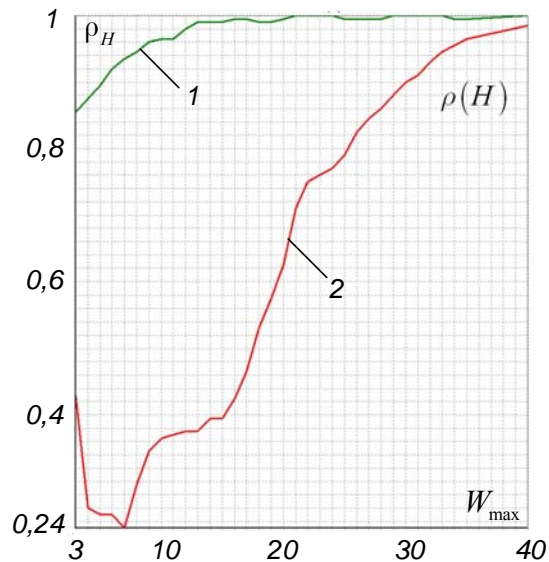


Рис. 4. Зависимость вероятности построения разбиения с минимальным числом блоков ρ_H от ограничения на объем памяти микрокоманд контроллера W_{\max} (1 – модифицированный метод параллельно-последовательной декомпозиции, 2 – метод С.И. Баранова)

Целью второй серии экспериментов являлось выяснение того, как соотносятся значения критериев качества при разбиении алгоритмов управления с различным числом вершин. Полученные результаты (см. рис. 5) показывают, что модифицированный метод параллельно-последовательной декомпозиции обеспечивает максимальную вероятность построения разбиений с минимальным числом блоков как в идеальном случае при отсутствии ограничений (наравне с методом С.И. Баранова), так и при наличии ограничений. Указанный на рис. 4 и 5 критерий качества Z_H является наиболее важным, его рост приводит к росту значений всех остальных критериев качества.

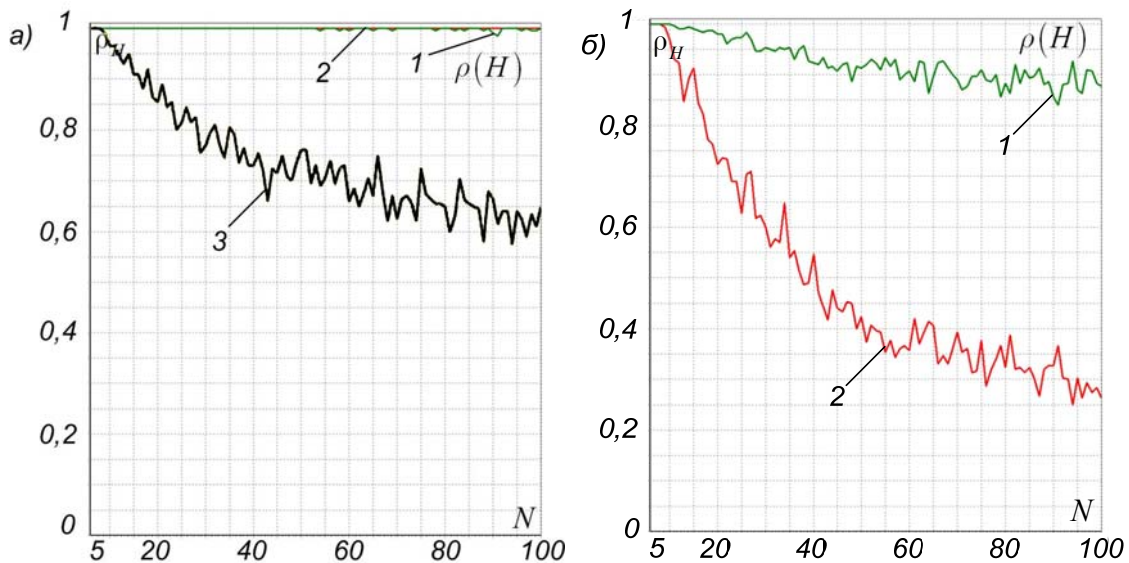


Рис. 5. Зависимости вероятности построения разбиения с минимальным числом блоков ρ_H от среднего размера алгоритма управления N : без ограничений (а) и при наличии ограничений (б): 1 – модифицированный метод параллельно-последовательной декомпозиции, 2 – метод С.И. Баранова, 3 – метод А.Д. Закревского

Также было проведено исследование зависимости времени построения разбиения от среднего числа вершин в алгоритме управления для программной реализации процедур преобразований, в результате чего с использованием метода наименьших квадратов были получены следующие зависимости времени построения разбиения:

$$t(N) = -1,064 + 9,698 \cdot 10^{-2} x \quad \text{для метода С.И. Баранова,}$$

$$t(N) = -6,756 + 1,143x - 4,524 \cdot 10^{-2} x^2 + 6,326 \cdot 10^{-4} x^3 \quad \text{для метода С.И. Закревского и}$$

$$t(N) = -4,596 + 1,145x - 4,005 \cdot 10^{-2} x^2 + 6,833 \cdot 10^{-4} x^3 + 1,417 \cdot 10^{-5} x^4 \quad \text{для модифицированного метода параллельно-последовательной декомпозиции.}$$

С использованием приведенных формул получены оценки времени, необходимого на отыскание разбиений алгоритмов управления с различным числом вершин (см. табл.).

Таблица

*Зависимость среднего времени построения разбиения
от среднего размера алгоритма управления*

Метод	Средний размер алгоритма управления		
	$N = 100$	$N = 1000$	$N = 10000$
С.И. Баранова	0,4 с	0,8 ч	10,3 мес
А.Д. Закревского	0,29 с	9,8 мин	7,3 сут
Параллельно-последовательной декомпозиции	1,8 с	4,1 ч	4,5 года

Таким образом, получение разбиений высокого качества с использованием модифицированного метода параллельно-последовательной декомпозиции требует существенных временных затрат. Использование разработанного акселератора позволяет сократить время обработки R -выражений в N раз, при этом время построения множества сечений, составляющее 2,8 года при программной реализации для $N = 10000$, сокращается до 2,4 часа. Общее время синтеза разбиения сокращается в 2,7 раза.

Аппаратная сложность акселератора, выраженная числом эквивалентных вентилях (ЭВ), выражается формулой

$$R = 16 \lceil \log_2 L_{\max} \rceil + 56 N_{T_{\max}} L_{\max} + 64 L_{\max} - 60 + 152 \lceil \log_2 N_{T_{\max}} \rceil + \\ + 474 N_{T_{\max}} + 250 N_{T_{\max}} \lceil \log_2 N_{T_{\max}} \rceil,$$

где L_{\max} – максимальное число элементов в наборах листьев ($L_{\max} = N$), $N_{T_{\max}}$ – максимальное число элементов в табличном представлении деревьев. При $N = 10\,000$ она составляет величину порядка 60 млн. ЭВ, что соответствует уровню развития современной микроэлектронной элементной базы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача повышения качества разбиений параллельных управляющих алгоритмов при одновременном снижении вычислительной сложности процедур декомпозиции на основе переноса наиболее трудоем-

ких преобразований с программного на аппаратный уровень. При этом получены следующие результаты:

1. Проведен анализ существующих методов разбиения параллельных управляющих алгоритмов. Обоснована перспективность построения разбиений с учетом особенностей структуры алгоритмов управления с применением аппаратно-ориентированных операций над деревьями.
2. Разработано представление R -выражений в виде дерева и процедуры для их преобразования, позволяющие выполнять преобразования за полиномиальное время на основании ряда сформулированных и доказанных особых свойств R -выражений. Состоятельность подтверждена программной реализацией.
3. Проведено сравнение методов построения разбиений, в ходе которого подтверждено высокое качество разбиений, получаемых модифицированным параллельно-последовательным методом, выраженное минимальным числом блоков в 85–99% случаев, уменьшением среднего числа блоков до 13%, сложности сети межблочных связей до 22% и интенсивности межблочных взаимодействий до 20% по сравнению с известными аналогами. Оценена асимптотическая временная сложность метода, получена практическая оценка его трудоемкости при построении разбиений алгоритмов размером 10000 вершин и более, составляющая величину порядка нескольких лет.
4. С целью снижения временной сложности преобразований разработан акселератор, позволяющий снизить время обработки R -выражений за счет использования параллелизма как при действиях с множествами (наборами листьев деревьев), так и при выполнении отдельных операций преобразования в N раз (с 2,8 года до 2,4 часа при $N = 10000$).
5. Разработан программно-аппаратный комплекс для автоматизированного формирования разбиений параллельных алгоритмов логического управления, позволяющий проводить оценку качества разбиений и трудоемкости декомпозиции на выборках параллельных управляющих алгоритмов.
6. Получены оценки выигрыша в скорости обработки с использованием разработанного акселератора (составляющего по меньшей мере N раз при обработке R -выражений) и его аппаратной сложности (порядка 60 млн. ЭВ), подтверждающие возможность практического воплощения аппаратного разбиения алгоритмов на современной элементной базе. Использование акселератора в составе программно-аппаратного комплекса позволяет сокращение времени поиска разбиений в 2,7 раза.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях по перечню ВАК Минобрнауки РФ

1. Ватутин, Э.И. Построение множества сечений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов, В.С. Титов // Известия ТулГУ. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Тула: ТулГУ, 2003. Т. 1. Вып. 2. С. 70–77.
2. Борзов, Д.Б. К задаче субоптимального разбиения параллельных алгоритмов [Текст] / Д.Б. Борзов, Э.И. Ватутин, И.В. Зотов, В.С. Титов // Известия вузов. Приборостроение. Вып. 12, 2004. С. 34–39.
3. Ватутин, Э.И. Идентификация и разрыв последовательных циклов в задаче субоптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин,

И.В. Зотов // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Т. 1. Вып. 3. Вычислительная техника. Тула: ТулГУ, 2004. С. 51–55.

4. Ватутин, Э.И. Аппаратная модель для определения минимального числа блоков при декомпозиции параллельных алгоритмов логического управления [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Известия вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 39–43.

5. Ватутин, Э.И. Анализ качества блочных разбиений при синтезе логических мультиконтроллеров [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Информационно-измерительные и управляющие системы. № 10, Т. 6. М.: «Радиотехника», 2008. С. 32–38.

6. Ватутин, Э.И. Выявление изоморфных вхождений R-выражений при построении множества сечений параллельных алгоритмов логического управления [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов И.В., В.С. Титов // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 2. С. 37–45.

Статьи

7. Ватутин, Э.И. Поиск базового сечения в задаче разбиения параллельных алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Деп. в ВИНТИ 24.11.03 № 2036-B2003. 30 с.

8. Ватутин, Э.И. Построение матрицы отношений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Известия КурскГТУ. Курск, 2004. № 2. С. 85–89.

9. Ватутин, Э.И. Параллельно-последовательный метод формирования субоптимальных разбиений [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Информационные технологии моделирования и управления. Воронеж: «Научная книга», 2004. Вып. 12. С. 64–71.

10. Ватутин, Э.И. Использование схемных формирователей и преобразователей двоичных последовательностей при построении комбинаторно-логических акселераторов [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов, В.С. Титов // Известия КурскГТУ, 2008. № 4 (25). С. 32–39.

Тезисы докладов и материалы конференций

11. Ватутин, Э.И. Построение блоков разбиения в задаче декомпозиции параллельных управляющих алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Материалы и упрочняющие технологии – 2003. Курск: КурскГТУ, 2003. Т. 2. С. 38–42.

12. Ватутин, Э.И. Метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'04). М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. С. 884–917.

13. Ватутин, Э.И. Объединение линейных участков в задаче нахождения субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин // Молодежь и XXI век. Курск: изд-во КурскГТУ, 2004. Ч. 1. С. 22–23.

14. Ватутин, Э.И. Оценка качества разбиений параллельных управляющих алгоритмов на последовательные подалгоритмы с использованием весовой функции [Текст] / Э.И. Ватутин // Интеллектуальные и информационные системы (Интеллект – 2005). Тула: ТулГУ, 2005. С. 29–30.

15. Ватутин, Э.И. Программная система для построения разбиений параллельных управляющих алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'06). М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2006. С. 2239–2250.

16. Vatutin, E.I. Constructing Random Sample Parallel Logic Control Algorithms [Текст] / E.I. Vatutin // 11th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad BOAC'06). Saint-Petersburg: IFMO, 2006. PP. 162–166.
17. Vatutin, E.I. Comparison of Methods for Getting Separation of Parallel Logic Control Algorithms [Текст] / E.I. Vatutin, J.N. Abdel-Jalil, M.H. Najajra, I.V. Zotov // Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems (ITT IS'06). Katania, Italy, 2006. PP. 92–94.
18. Ватутин, Э.И. Комплексная сравнительная оценка методов выбора разбиений при проектировании логических мультиконтроллеров [Текст] / Э.И. Ватутин, С.В. Волобуев, И.В. Зотов // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'08). М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. С. 1917–1940.
19. Ватутин, Э.И. Однородная среда электронной модели дерева для аппаратно-ориентированной обработки R -выражений [Текст] / Э.И. Ватутин // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Распознавание – 2008). Ч. 1. Курск: КурскГТУ, 2008. С. 90–92.
20. Ватутин, Э.И. Повышение качества разбиения алгоритмов при синтезе логических мультиконтроллеров с использованием метода параллельно-последовательной декомпозиции [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов // Перспективы развития систем управления оружием. М.: Изд-во «Бедретдинов и Ко», 2007. С. 84–92.
21. Ватутин, Комплексный сравнительный анализ качества разбиений при синтезе логических мультиконтроллеров в условиях присутствия технологических ограничений [Текст] / Э.И. Ватутин, С.В. Волобуев, И.В. Зотов // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'08). М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. С. 643–685.

Патент

22. Патент № 2336556. Российская федерация. Микроконтроллерная сеть [Текст] / Э.И. Ватутин и др.; заявка 2007114559/09; опубл. 20.10.2008, бюл. № 29.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

23. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2005613091. Параллельно-последовательный метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов (РФ). М.: РосПатент; заявлено 03.10.05; дата регистрации 28.11.05.
24. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2007613222. Визуальная среда синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления [Текст] / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов (РФ). М.: РосПатент; заявлено 04.06.07; дата регистрации 30.07.07.

Соискатель

Э.И. Ватутин

Подписано в печать _____. Формат 60×84 1/16 .

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Курский государственный технический университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.