

УДК 004.3

**МНОГОУРОВНЕВАЯ СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
НЕОДНОРОДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ****Б.И. Борде***

Рассматриваются задачи моделирования, проектирования и оптимизации неоднородных вычислительных систем. Для задач параметрической оптимизации созданы математические методы и алгоритмы. Задачи структурной оптимизации недостаточно формализованы, и необходимо их исследование. Многоуровневые модели позволяют свести решение сложной задачи оптимизации к решению последовательности задач меньшей сложности. Созданы инструментальные средства автоматической оценки критериев оптимальности, позволяющие решать задачи синтеза второго уровня сложности.

Описание неоднородных вычислительных систем (НВС)

Проектные решения являются моделями объектов на различных уровнях абстракции. Начальные этапы проектирования [1,2] отличаются высоким уровнем абстракции, который снижается с конкретизацией структуры и параметров объектов.

Известны следующие этапы проектирования и жизненного цикла объектов: цель создания и оценки эффективности, эскизного, функционального, конструкторского, технологического, испытаний, сопровождения и утилизации объектов [1,2]. Разным этапам проектирования соответствуют различные описания объектов. Отличают содержание и синтаксис описаний. Содержание описаний определяется предметной областью и этапом проектирования. Разнообразие описаний объясняется синтаксисом, а не содержанием.

Проектные решения вычислительных устройств и систем на разных этапах проектирования представляют собой множество отношений. Отношения могут быть типа принадлежности, соответствующие перечню элементов, входящих в устройство. Отношения различаются содержанием и формой представления. Основным является содержание отношений, а форма представления допускает множество реализаций, ограниченных отраслевыми стандартами и конкретными САПР. Международные стандарты ISO 10303 и EDIF, PDIF определяют протокол и структуры обмена данными между различными САПР [1,2].

Различают задачи параметрической и структурной оптимизации [1-5]. При параметрической оптимизации оцениваются управляемые параметры, соответствующие экстремальной области значений выходного параметра. При структурной оптимизации синтезируется множество структур, из которых выбираются лучшие по критерию качества [1-4]. Структуры отличаются компонентами или отношениями компонент. Для вычислительных систем отношение может представляться общим каналом передачи данных в виде соединения для стационарных компонент и возможностью обмена сообщениями для мобильных компонент.

Параметрическая оптимизация может привести к выводу о необходимости структурных изменений. Например, при параметрической оптимизации погрешности цифроаналогового преобразования в интегральном исполнении сделан вывод о структурных изменениях в форме выравнивания весовых разрядных компонент и получено авторское свидетельство [7].

В табл. 1 приведены уровни абстракции неоднородных вычислительных систем и критерии эффективности соответствующего уровня. Модели для каждого уровня независимы, однако при переходе к нанотехнологиям [5] уровни логический, физический и пространственный зависимы и влияют на результат, и необходим ряд итераций с учетом зависимых уровней.

На системном комплексном уровне (7) оценивается эффективность преобразования энергии или вещества при наличии структуры, обрабатывающей информацию, или без нее. На уровне конечного результата (6) оценивается совершенство структуры обработки информации. На системном информационном уровне (5) оценивается совершенство системы преобразования обработки информации при абстракции ее внутренней структуры. Структурный уровень (4) оценивается по числу тактов на обработку заявки на элемент.

Для логического уровня (3) характерны абстракции пространственного размещения компонент и их физической реализации. Однако при согласовании ВС с внешними устройствами необходима конкретизация физической реализации компонент. На физическом уровне (2) оценивается энергия изменения состояния для

* Б.И. Борде, Красноярский государственный технический университет; 2006; E-mail: borde@kgtu.runnet.ru

двоичного компонента энергия переключения. Энергия переключения определяет рассеиваемую объектом мощность для конкретной частоты и ограничивает степень интеграции компонент [9,10]. На пространственном уровне (1) размещения элементов стремятся к максимальной объемной или поверхностной плотности компонент, ограниченной технологическими нормами и допустимой рассеиваемой мощностью. Пространственное размещение учитывается только при конструкторском проектировании объектов со стационарными компонентами [1, 2, 3]. Уровень неоднородной физической среды (0) обеспечивает устойчивую обработку информации при возможных внешних воздействиях [1,9].

Таблица 1

Уровни абстракции НВС

Номер уровня	Абстракции	Уровень	Наименование критериев эффективности
7	Способа обработки информации	Системный комплексный	Совершенство системы преобразования энергии или вещества в нестационарной внешней среде
6	Структуры системы обработки информации	Конечного результата	Эффективность преобразования энергии или вещества при обработке информации
5	Внутренней структуры	Системный информационный	Совершенство системы преобразования информации
4	Логической реализации преобразователей информации	Структурный	Совершенство структуры - число тактов на обработку заявки на элемент
3	Физической реализуемости	Логический	Совершенство логических преобразователей информации
2	Пространственного размещения	Физический	Работа переключения полная
1	Процессов в неоднородной среде	Пространственный	Объемная (поверхностная) плотность
0		Неоднородной физической среды	

Появление компонент со средней и большой степенью интеграции привело к необходимости создания моделей вычислительных систем (ВС), неоднородных по уровням абстракции. Например, в модели ВС на базе микроЭВМ для обработки сигналов внешние цифровые или аналоговые сигналы должны представляться в многозначном алфавите. Аналогичен и уровень представления внутренних обрабатывающих компонент, вплоть до интерфейсных узлов, выполняющих роль преобразователей уровней абстракции представления сигналов [4,5]. Если протоколы преобразований сигналов внутри микроЭВМ стандартны, то нет смысла в их детальном анализе и можно перейти к более высокому уровню абстракции. Поэтому необходимы модели ВС, неоднородные по уровням абстракции.

Задачи проектирования различают по уровням сложности [1]. К первому уровню сложности относятся задачи, в которых технические решения заданы и синтез отсутствует. Второй уровень сложности отличается множеством возможных технических решений при наличии ресурсов для анализа, оценки и выбора лучшего варианта по критерию эффективности. К третьему уровню [1] относят задачи с множеством возможных технических решений при дефиците ресурсов для анализа и оценки всех возможных вариантов, и часть вариантов приходится исключать без детального анализа. Таким образом, задачи третьего уровня сложности преобразуются ко второму.

Описание вычислительных систем состоит из компонент и соединений между ними. Описание может быть представлено различным образом. При описании системы в виде формализованного задания достаточно разделов компонент и соединений. Описание может быть представлено таблицей схемы или множеством таблиц как в САПР PCAD [4].

Вычислительная система как объект проектирования представляется множеством взаимодействующих компонент, каждый из которых можно рассмотреть как составной объект. Модель абстрактного объекта представляется структурой данных, значение которой отражает его состояние, методами или операциями, преобразующими состояния объектов в соответствии с воспринимаемыми входными сообщениями. Модель объекта формирует выходные сообщения или значения параметров процедур для других объектов. Важным для восприятия человеком является представление объектов и учет исключительных ситуаций. Известны символьное, табличное и графическое представления. Поведение и взаимодействие объектов воспринимается лучше в графической форме временных диаграмм и принципиальных схем, а оценка ресурсов и степень соответствия предполагаемых и фактических результатов – в табличной форме.

Методы структурного синтеза и анализа неоднородных вычислительных систем

Процедуры синтеза позволяют получить описание объекта, а процедуры анализа – оценить свойства объекта и его поведение [1]. Для простых объектов трудоемкость анализа меньше трудоемкости описания, но с увеличением сложности объектов она значительно возрастает. Поэтому автоматизация анализа сложных объектов повышает эффективность проектирования. Процедуры структурного анализа позволяют оценить функции и поведение объекта, состав, соответствие компонент и связей, параметры связей. Процедуры параметрического анализа обеспечивают получение информации о статике и динамике объекта во временной или частотной области, анализ чувствительности.

Наряду с процедурами основного анализа необходимы новые процедуры дифференциального анализа для оценки отличий структуры или параметров объектов. Примером является процедура сравнения группы сигналов или сравнение вариантов структур системы.

Описание структуры объекта относят к результатам внутреннего проектирования, которое может выполняться различными методами. Если проектное решение, соответствующее требованиям задания, неизвестно, то выполняется основная процедура синтеза описания нового объекта. При наличии требуемого или близкого к нему проектного решения либо множества решений производят его выбор и путем внесения изменений в структуру объекта добиваются удовлетворения требований технического задания. Способы синтеза решений приведены на рис. 1.

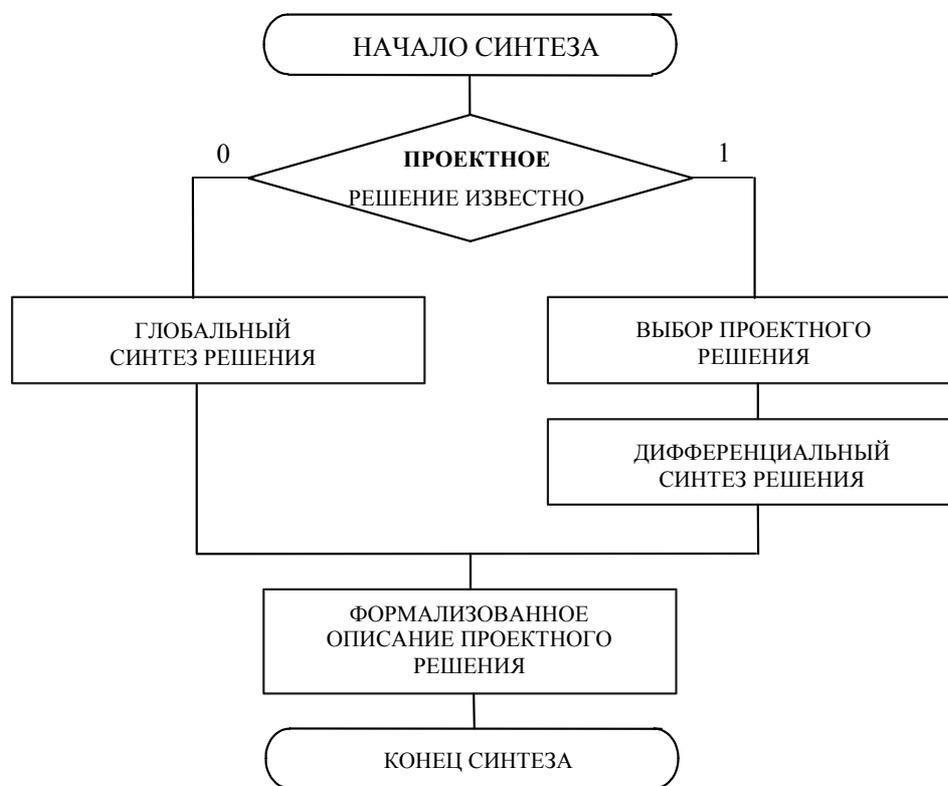


Рис. 1. Схема синтеза проектного решения

Процедуры экспертизы технических решений на новизну требуют выявления аналогичных решений и доказательства существенности отличий, что подтверждает необходимость отмеченного направления дифференциального синтеза и анализа.

При описании множества решений на языке низкого уровня количество описаний равно мощности множества решений, а при описании на языках высокого уровня в одном описании может быть множество вариантов решений [4]. Рациональным является описание на языке высокого уровня множества решений для одного класса вычислительных систем или устройств [4].

Для структурной оптимизации необходимы критерии эффективности [1-4]. Для стационарных вычислительных систем критерием является стоимость единицы производительности. Для мобильных объектов критерием может быть масса единицы производительности или масса вычислительной системы и источника энергии на единицу производительности. Подобные оценки для множества решений представляют сложную и трудоемкую задачу, для реального решения которой требуются инструментальные средства и информационное обеспечение.

Программно-методический комплекс автоматизации синтеза и анализа НВС

Многоуровневая САПР COD (Conceptual Object Design) служит для синтеза и анализа множества вариантов структур и автоматического их преобразования во множество проектных решений для промышленных САПР. COD состоит из множества подсистем:

$$\text{COD} = \langle \text{HSC}, \text{COMM}, \text{SAT}, \text{AAT} \rangle,$$

где **HSC** (Human Control) – подсистема управления проектированием, служит для снижения нагрузки на человека при переходе на второй уровень сложности задач проектирования;

COMM – коммуникационная подсистема проектирования. Обеспечивает возможность проектирования объектов в сети Интернет;

SAT (Synthesis Automation Tools) – инструментальные средства автоматизированного синтеза объектов;

AAT (Analysis Automation Tools) – инструментальные средства автоматического анализа поведения, оценки ресурсов и сравнения объектов.

Подсистема управления проектированием HSC состоит из множества подсистем

$$\text{HSC} = \langle \text{SETSEL}, \text{PRJSEL}, \text{RESSEL}, \text{RPRJ} \rangle,$$

где **SETSEL** – подсистема выбора формализованного задания, языков описания проекта, выбора САПР и типа описания для импорта, выбора САПР и типа интерфейса для экспорта, языка сообщений и сервера в сети;

PRJSEL – подсистема выбора результатов проектирования;

RESSEL – подсистема выбора представления результатов;

RPRJ – правила, соответствующие маршрутам проектирования, определяющие выбор последовательности проектных процедур и операций для получения результатов проектирования и анализа. По мере развития комплекса увеличивается доля правил, реализуемая в подсистемах синтеза и анализа. Например, в подсистеме анализа автоматически сравниваются предполагаемые и фактические результаты, а также описания объектов и требуемые ресурсы.

Пользователь САПР COD выбирает требуемый результат проектирования или анализа, а не последовательность проектных процедур и операций для достижения цели. Таким образом, снижается нагрузка на пользователя и повышается уровень интеллекта комплекса. Формализуемая часть подсистемы управления проектированием представлена в форме оболочки САПР COD, которая может быть реализована различными средствами. Представлены реализации оболочки для различных операционных систем на базе многофункционального редактора, входящего в инструментальные средства IBM Visual Age или Eclipse, и сетевых программ просмотра (Microsoft Internet Explorer, Mozilla FireFox).

Информационное обеспечение для оценки критериев эффективности с учетом расходуемой на обработку данных энергии находится в таблицах URPCAD.dbm, PAC.dbt. В таблицах содержится информация о свойствах конкретных компонент (табл. 1). Абстрактные компоненты могут выполнять заданные функции, но не имеют конкретных свойств, типа корпуса. Поэтому структурная оптимизация с абстрактными компонентами требует дальнейших исследований. Аддитивные параметры для вычисления критериев эффективности оцениваются автоматически для конкретных компонент.

Таблица 2

Словарь процедур оценки производительности

Номер	Имя	Назначение	Тип данных	Размерность
1	PPA	Производительность аналогового сигнала	float	Mbit/s
2	PPDAC	Производительность цифроаналогового преобразователя	float	Mbit/s
3	PPD	Производительность цифрового сигнала	float	Mbit/s
4	KDOUT	Количество изменений цифрового сигнала за время анализа	int	s ⁻¹
5	SPPA	Сумма изменений аналогового сигнала за время анализа	float	s ⁻¹
6	TDAC	Время преобразования сигнала	float	ns
7	DELT	Длительность такта	float	ns
8	F	Тактовая частота основная	float	Mhz
9	Fl	Тактовая частота работы DAC	float	Mhz
10	δUst	Относительная статическая погрешность DAC	float	%
11	δUdin	Относительная динамическая погрешность DAC	float	%
12	δU	Относительная полная погрешность DAC	float	%

Оценка производительности должна производиться экспертом-пользователем системы. В простых случаях автоматически может быть оценена производительность на уровне сигналов. Например, для цифровых сигналов можно оценить количество изменений в единицу времени по результатам анализа. Алгоритмы ав-

томатизированного анализа рассмотрены в работе [6]. Более сложной является оценка производительности аналоговых сигналов.

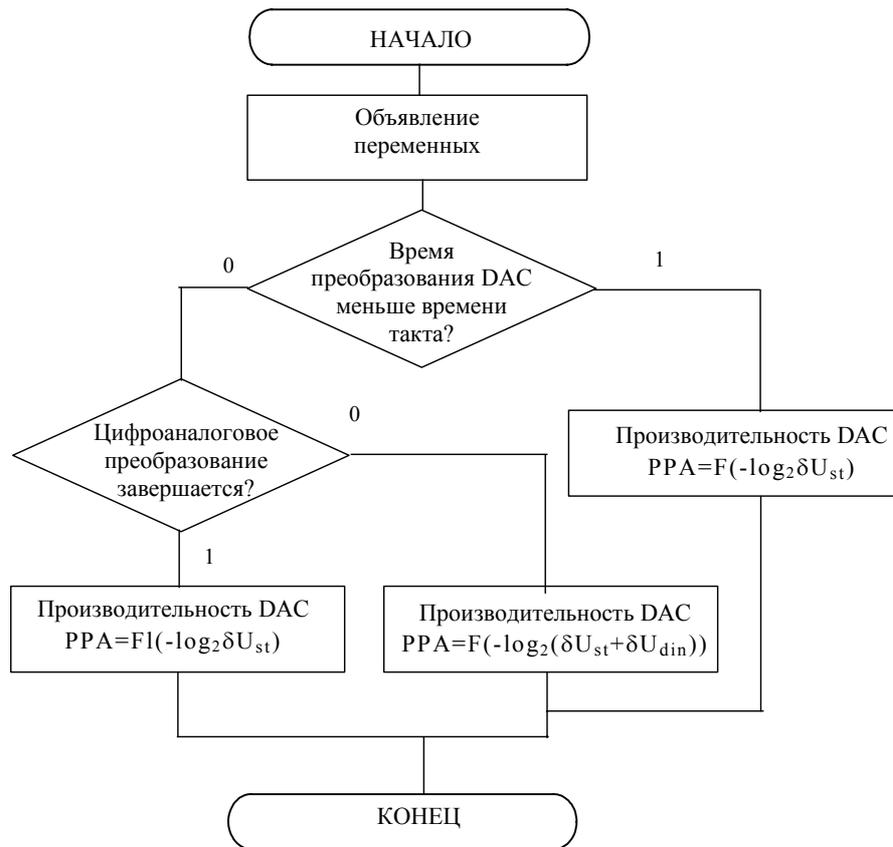


Рис. 2. Схема алгоритма оценки производительности выходного сигнала цифроаналогового преобразователя (DAC)

Начальные значения производительности равны -1, реальные же значения могут быть только положительными, отрицательные значения производительности соответствуют ошибке. Для множества вариантов структуры устройства в одном формализованном задании результаты анализа всех вариантов представляются в файле типа .lsg, а результаты автоматического сравнения сигналов и оценки критериев эффективности для каждого варианта находятся в файле сообщений типа .msg. В качестве примера рассмотрим множество структур следящих аналогоцифровых преобразователей (АЦП) [4]. Модель простого следящего АЦП приведена в файле fr06r для описания на разных языках программирования в каталогах FA\CPP, FA\JAV, FA\PLI и FA\ADA. Модель модифицированного груботочного (двухступенчатого) АЦП fr06rgt содержит больше структурных компонент, но имеет меньшее время преобразования и стоимость единицы производительности. Дальнейший синтез многоступенчатых следящих АЦП не позволяют снизить стоимость единицы производительности. Формализованное задание с четырьмя вариантами следящих АЦП позволяет получить временные диаграммы и критерии эффективности. Формализованное задание с пятнадцатью вариантами устройств этого класса позволяют оценить критерии эффективности для всего множества устройств.

При синтезе и анализе вычислительных систем рассматриваются структуры с различной степенью аппаратной поддержки. Первый вариант характеризуется наличием регистров ввода-вывода и программной обработкой данных. Второй вариант с общим операционным автоматом и мультиплексором для подключения входных сигналов ориентирован на относительно медленно изменяющиеся сигналы. Третий вариант содержит операционные автоматы аппаратной обработки сигналов на каждый канал и позволяет обрабатывать быстро изменяющиеся сигналы. Самым производительным является вариант с аппаратными обрабатывающими конвейерами на каждый канал. Решение о выборе варианта принимается по минимуму стоимости единицы производительности. Оптимальным может оказаться более дорогой вариант системы [4].

Полученная в результате синтеза и анализа оптимальная структура вычислительной системы или устройства с помощью программно-методического комплекса [8], приведенного на рис.3, может быть передана в промышленную САПР или преобразована в стандартную структуру обмена данных по Р ИСО 10303 (ISO 10303).

	1. Формализованное задание (ФЗ)	
2. Модели поиска путей и имен ФЗ (CodRead)	Модели компонент (Comp)	Модели управляющих процедур и функций генерации сигналов (Control)
3. Структура данных варианта схемы (TSCH)		
4. Методы чтения библиотеки компонент добавления и записи структуры данных схемы или файла макрокоманд	Методы чтения, записи, поиска в таблице данных варианта схемы (TSCH)	Методы чтения, записи и поиска компонента в таблице соответствия (Table)
5. Методы чтения, добавления и записи структуры данных компонента, его выводов и цепей	Методы чтения, добавления и записи таблиц символов и конструктивов	Методы поиска, чтения и записи информации о контактах компонента и подключенных цепях
Файл проекта конкретной САПР или стандартная структура обмена данными		

Рис. 3. Обобщенная структура многоуровневой САПР

Процесс преобразования формализованного задания в описание для конкретной промышленной САПР с помощью программно-методического комплекса COD происходит следующим образом. Для каждого варианта описания формируется таблица TSCH (см. рис. 4). Формализованное задание транслируется и редактируется с соответствующими моделями процедур, объединенными в библиотеку. При выполнении формализованного задания модель конкретного компонента вызывает обращение к информационной таблице и помещению информации о компоненте в таблицу варианта схемы. Связи или соединения заполняются в таблице TSCH из формализованного задания. Таким образом в таблице варианта схемы оказывается вся информация о компонентах, выводах компонент и связях с другими компонентами. После формирования TSCH включаются функции формирования описания варианта схемы для конкретной САПР. Функции четвертого уровня (см. рис. 3) обеспечивают обработку компонент, а функции пятого уровня обеспечивают преобразование информации о выводах компонент.

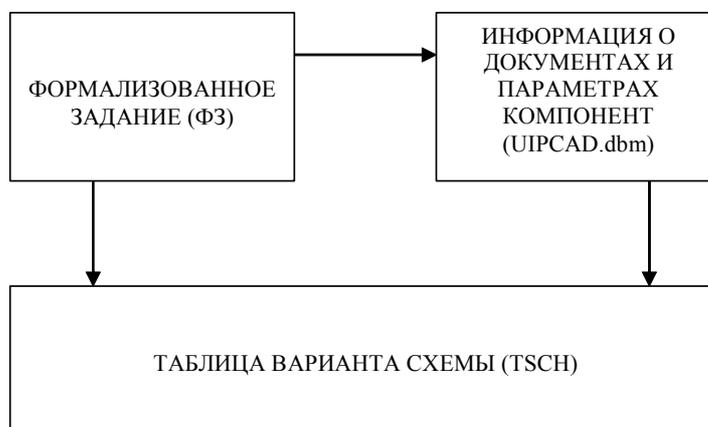


Рис. 4. Формирование варианта схемы

Программно-методический комплекс COD позволяет автоматизировать синтез и анализ неоднородных вычислительных систем, устройств и фрагментов сетей со стационарными и мобильными компонентами. Основным назначением являются начальные этапы проектирования и обучения синтезу и анализу вычислительных систем. Инструментальные средства позволяют получить из текста формализованного задания с одним или множеством вариантов оценки структур и их представление в виде схемы в САПР PCAD, ORCAD, CATIA и в среде виртуальной реальности с изменением сигналов.

Выводы

Неоднородные вычислительные системы являются сочетанием средств обработки и передачи информации с различными формами представления и носителями. Автоматизация синтеза и анализа неоднородных вычислительных систем обеспечивает решение задач проектирования второго уровня сложности [1]. Про-

граммно-методический комплекс COD снижает трудоемкость начальных этапов проектирования вычислительных систем, устройств и фрагментов сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 360 с.
2. Рубан, А.И. Методы оптимизации: учеб. пособие / А.И. Рубан. – Красноярск: НИИ ИПУ, 2001. – 528 с.
3. Моисеев, Н.Н. и др. Методы оптимизации / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
4. Борде, Б.И. Основы САПР неоднородных вычислительных устройств и систем: учеб. пособие / Б.И. Борде. – Красноярск: КГТУ, 2001. – 351 с.
5. Борде, Б.И. Развитие структур аналого-цифровых подсистем автоматизации испытаний. Сб. Автоматизация инженерных исследований и эксперимента / Б.И. Борде. – М. МДНТП, 1978, с.56-61.
6. Борде, Б.И. Моделирование неоднородных вычислительных систем / Б.И. Борде. – Вестник Красноярского гос. ун-та. Вып. 4. – Красноярск, 2005. – с.197-202.
7. Борде, Б.И. Цифроаналоговый преобразователь: АС 902242, ИПОТЗ 6, 1982.
8. Борде, Б.И. Программно-методический комплекс «Основы САПР неоднородных вычислительных устройств и систем», гос. рег. номер информрегистра 0320000143, 2002.
9. Венгер, О.В. Изменение маршрута проектирования БИС при переходе к нанотехнологиям / О.В. Венгер, А.В. Жмурин, Д.А. Рыбин – «Информационные технологии», 5, 2005. Приложение, с. 2-4.
10. Стемповский, А.Л. Система разработки макромоделей аналоговых и цифроаналоговых узлов для САПР БИС / А.Л. Стемповский, Ю.Б. Егоров, А.А. Лялинский // Информационные технологии. 2000. № 2. с. 31-33.

MULTILEVEL STRUCTURAL OPTIMIZATION OF HETEROGENEOUS COMPUTING SYSTEMS

B. Borde

The article considers the problems of modelling, design and optimisation of heterogeneous computing systems. The problem of parametric optimisation has been solved by mathematical methods and algorithms. The problems of structural optimisation are not enough formalized and require careful examination. Multilevel models allow to reduce one complex problem, that is optimization, to a series of simple tasks. The up-to-date instrumental means allow to estimate the criterions of optimality automatically and thus to decide the problems of synthesis on the second level of complexity.