

УДК 004.94

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СТРУКТУР ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Кулагин В.П., д.т.н., профессор, МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, Россия
E-mail: kvp@miem.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности в развитии сложных вычислительных систем (СВС). Дается анализ современного состояния исследований в области проектирования параллельных структур. Рассмотрены методы формализованного построения структур СВС. Рассмотрены методы формализованного описания структур вычислительных систем. Обосновывается перспективность тензорных методов проектирования СВС в сочетании с аппаратом сетей Петри, используемых в качестве формальных средств для описания параллельных вычислительных систем.

Ключевые слова. Вычислительные системы, параллельные вычисления, сложные вычислительные системы, сети Петри, структуры вычислительных систем

PROBLEMS OF ANALYSIS AND SYNTHESIS OF STRUCTURES OF PARALLEL COMPUTING SYSTEMS

Kulagin V.P., D.of Sci., professor, MIEM of HSE, Moscow, Russia
E-mail: kvp@miem.ru

Abstract. The features in the development of complex computer systems (CCS). Analyzes the current state of research in the design of parallel structures. The methods of constructing formalized structures CCS. The methods of formalized description of the structures of computing systems. Proves promising tensor methods CCS design combined with Petri nets that are used as a formal means for the description of parallel computing systems

Keywords. Computing systems, parallel computing, complex computing systems, Petri nets, the structure of computer systems

Введение

Возрастающие требования к скорости решения современных задач, ограниченность последовательных систем обработки информации, доступность дешевых высокоскоростных СБИС обуславливают необходимость технологий проектирования параллельных вычислительных систем. Например, решение задач, возникающих в таких областях, как обработка космических изображений, машинное зрение, ядерная физика, структурный анализ, обработка речевых, радиолокационных, сейсмических, метеорологических, медицинских и других данных, требует от современных вычислительных систем производительности от 25 млрд. до 1000 трлн. операций/секунду [1].

Пределная производительность одного процессора на элементной базе с фон-неймановской архитектурой не превышает 100 млн. операций/секунду при скалярных вычислениях. На основе этого можно заключить, что последовательные системы не позволяют строить перспективные обрабатывающие системы реального времени и необходимо привлечение дополнительных мощностей в виде параллельных вычислительных структур. В связи с этим объектом исследования современной науки становятся все более сложные системы. Однако противоречия между усложнением создаваемых систем и традиционными подходами к их проектированию определяют одну из центральных проблем теории систем - *синтез эффективных структур сложных систем*.

Сложной вычислительной системой (СВС) называют вычислительную систему, закон функционирования которой допускает ее декомпозицию на отдельные составляющие, сохраняющие свойство эмерджентности. Под структурой СВС понимается структура из отдельных элементов, для которых указываются, способ соединения между собой и с окружающей средой. А также распределение функций, выполняемых системой. Таким образом, отличие структуры СВС от структуры обычной сложной системы заключается в дополнительном описании типов связей и распределении функций, что подчеркивает гетерогенность СВС и ее структуры.

Отличительными особенностями СВС являются параллелизм, недетерминированность, наличие взаимодействующих процессов, сочетание синхронного и асинхронного управления и др. Поэтому фундаментальный вопрос, требующий решения, заключается в *формализации параллельных алгоритмов и структур параллельных вычислительных систем* таким образом, чтобы они были доступны для понимания разработчиком и имели возможность эффективной реализации в компьютере. Проблемы анализа и синтеза структур сложных ВС тесно взаимосвязаны и образуют в совокупности проблему, которая в полном объеме не решена и в настоящее время интенсивно разрабатывается многими исследователями.

1. Основные тенденции в развитии современных вычислительных систем.

Недостатки архитектуры фон Неймана заключаются не только в ограниченной производительности соответствующих ЭВМ. Существует ряд недостатков, которые определяют как семантический разрыв между архитектурой

ЭВМ и средой, в которую ее помещают для использования. Семантический разрыв обуславливает возникновение ряда проблем, к которым относятся высокая стоимость разработки программного обеспечения, его ненадежность и эксплуатационная неэффективность, чрезмерный объем программ, сложность компиляторов и операционных систем, и др. [2].

Семантический разрыв оказывает косвенное влияние и на понятие производительность ЭВМ, которое разные разработчики понимают по-разному. Основная причина разной интерпретации производительности заключается в том, что ее можно определять как на макро-, так и на микроуровне. Другими словами, при решении задач существует цепочка действий, которая включает человеческий фактор, как компонент общего решения.

«ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ → ЗАДАЧА → ВЫЧИСЛЕНИЕ → РЕШЕНИЕ»

Общая цепочка представляет собой макроуровень, компоненты цепочки «вычисление → решение» определяют микроуровень.

Многие разработчики, используя традиционный подход к проектированию "снизу-вверх" [3] и стремясь минимизировать стоимость аппаратных средств, концентрируют свое внимание только на микроуровне (вычисление) и возлагают на плечи аналитиков и программистов решение всех остальных трудных проблем.

В качестве примера подобного несоответствия возьмем данные из работы [4]. Какая ВС имеет более высокую производительность: система, выполняющая программу X за 1 минуту, но требующая 10 человеко-недель для программирования, или система Y, выполняющая ту же программу X за 2 минуты при затратах на программирование 2 человеко-недели?

С позиций микроуровня быстродействие первой системы по сравнению со второй в два раза выше, с позиций макроуровня - в пять раз ниже. Если же исходить из известных статистических данных о том, что 85% всех программ выполняется только один раз, то такая характеристика архитектуры ЭВМ, как простота программирования, является не менее важной, чем скорость выполнения команд.

Изложенное выше не означает, что скорость выполнения программы является несущественным фактором. Важно понимать, что быстродействие ВС зависит как от структурных особенностей, так и от вида представления выполняемой программы.

В работах [3-6] и многих других рассмотрены основные вопросы проектирования современных параллельных ЭВМ и дан анализ новых подходов и

достижений в данной области. В данных работах показывается, что, во-первых, традиционная технология проектирования универсальных ЭВМ снизу-вверх, т.е. от архитектуры к численным методам и программам решения задач, неэффективна при разработке параллельных ВС; во-вторых, на заданном наборе алгоритмов максимальная производительность может быть гарантирована только в проблемно-ориентированной ВС и только при проектировании ее сверху-вниз; в-третьих, для эффективного проектирования параллельных ВС необходима единая форма описания как алгоритмов, так и структур ВС. Как решение подобной проблемы в настоящее время практикуется метод «встречных потоков» [7], который синтезирует методы «сверху вниз» и «снизу-вверх»

В настоящее время применяют специальные современные подходы к построению параллельных СВС.

Локальность связей. Традиционный способ построения параллельных ВС и языков программирования не подходит для системы обработки данных в реальном масштабе времени из-за большого числа вспомогательных операций, связанных с распределением вычислительных ресурсов и препятствующих повышению производительности [1]. Поэтому в многопроцессорных системах стало целесообразно использовать локальные связи, что позволяет уменьшить взаимную зависимость процессоров и задержки, вносимые длинными соединениями. Такой подход привел к разработке нескольких специализированных устройств обработки данных с локальными связями и с архитектурой, ориентированной на исполнение в виде СБИС: трансверсальная фильтрация, систолические матрицы, потоковые процессорные матрицы [3, 4, 6].

Использование локальных связей существенно упрощает процесс проектирования архитектуры ВС и взаимодействия между ПЭ. Однако данное преимущество достигается за счет ограничения области применения ВС.

Программируемая архитектура и динамическая реконфигурация вычислительных систем. Из многочисленных архитектур построения суперЭВМ необходимо отметить как одно из весьма перспективных направлений создание многопроцессорных систем (МПС). Начало работам в данном направлении положено отечественными разработками ВС с перестраиваемой архитектурой [1]. Поиск путей совершенствования процесса проектирования ЭВМ привели к созданию фирмой MEIKO Ltd. (Великобритания) новой технологии разработки суперЭВМ, опирающейся на "бесшовную" архитектуру, позволяющую плавно наращивать вычислительную мощность системы для точного соответствия

требованиям заказчика ("обычные" суперЭВМ допускают расширение только модулями, причем довольно большими и дорогими).

"Линейность, бесшовность" архитектуры позволяет фирме создавать ВС семейства CS (Computing Surface - вычислительная среда) в любой конфигурации из готовых процессорных и периферийных схемных плат, благодаря чему, сокращаются сроки проектирования разработки, изготовления и поставок.

МПС с перестраиваемой архитектурой можно разделить на два основных класса: МПС с программируемой архитектурой и МПС с динамической реконфигурацией. В МПС с программируемой архитектурой [8] нужная конфигурация определяется программным путем, когда пользователь, например, может создавать необходимую группу процессоров с требуемой длиной слова. Передача и распределение информации между множествами процессоров и комплексов памяти происходит через программируемый параллельный коммутатор, называемый иногда коммутационной структурой (КС) [9].

Однако на настоящий момент реализация программируемых коммутаторов сопряжена с определенными трудностями, основная из которых заключается в том, что время передачи данных от одного микропроцессора (МП) к другому через КС существенно больше времени обработки информации в самом МП [9]. Предлагаемые приемы для уменьшения времени передачи данных связаны либо с изменением, либо с поиском более эффективного алгоритма, что приводит к достижению поставленной цели, но либо за счет повышения трудоемкости программирования, либо за счет увеличения времени построения алгоритма, что не является удовлетворительным.

Под динамической реконфигурацией МПС [10] понимается способность системы к динамическому перераспределению параллельных ресурсов каждого типа (памяти, центральных процессоров, однородных решающих полей из одностипных ПЭ и др.) между задачами и их параллельными ветвями. Данное перераспределение осуществляется автоматически путем анализа процесса выполнения программ аппаратными средствами в соответствии с текущими, заранее непредсказуемыми требованиями задач на вычислительные ресурсы. Средства реконфигурации необходимы в больших распределенных системах, в которых не всегда может существовать возможность или экономическая оправданность останова всей системы с целью внесения модификаций в часть ее аппаратного либо программного обеспечения. Кроме того, в процессе производства систем удобно иметь средства наращивания и интерпретации ее

компонент, и в процессе функционирования и эксплуатации - средства, способствующие эволюции системы.

Особую группу реконфигурируемых систем составляют вычислительные структуры с параллельной архитектурой, построенные на основе клеточных автоматов и искусственных нейронных сетей [11]. Клеточные автоматы рассматриваются как сложные динамические системы самоорганизующиеся из достаточно простых дискретных компонентов и характеризующиеся дискретностью, однородностью структуры, детерминированностью. В работе [12] сравниваются три модели компьютеров с параллельной архитектурой, построенных на основе клеточных структур: процессорные матрицы типа MIMD (множественный поток команд - множественный поток данных), матрицы передачи команд и систолические матрицы. На основе анализа предпочтение отдается систолическим матрицам, что объясняется гибкостью параллельной архитектуры и хорошей реализацией в технологии СБИС.

Основным преимуществом искусственных нейронных сетей является обладание свойством адаптивного самообучения.

Основными достоинствами подобных ЭВМ являются: наилучшее соотношение производительность/стоимость среди различных классов ЭВМ; малые габариты; широкий диапазон производительности (от 50 млн.оп./с до 1 млрд.оп./с), достигаемый за счет различной компоновки модулей; дешевизна в эксплуатации.

Основной проблемой в производстве отечественных МПС является, во-первых, слабая технологическая база, из-за чего задерживается изготовление соответствующей элементной базы; во-вторых, отсутствие контрольно-диагностического оборудования отечественного производства; в-третьих, сложность аппаратной реализации цепей коммутации процессов с ОП, которая не должна существенно понижать производительность процессоров.

Пространственно-временное распределение данных. В каждом алгоритме, реализованном на параллельной ВС, важно точно определить момент времени, когда данные достигают ПЭ. В программе, написанной на обычном языке высокого уровня, нет взаимодействия пространства и времени, так как в ней рассматривается только одно действие в единицу времени и отсутствует информация, где физически расположены данные. Иначе обстоит дело при разработке систем на процессорных и волновых матрицах. Данные, которые расположены далеко от ПЭ, требуют больших энергетических затрат и имеют

большее время доступа. Поэтому алгоритм, считающийся хорошим для традиционного языка программирования, не обязательно хорош, когда в расчет принимаются явления, происходящие на физическом уровне. Таким образом, при проектировании параллельных систем на матричных структурах необходимо учитывать пространственное и временное распределение данных [1, 3, 5].

Декомпозиция вычислительных структур и данных. При обработке данных на параллельных ВС часто возникают вопросы отображения вычислительных задач большой размерности на ограниченные структуры ПЭ. Поэтому необходимо проектировать только такие специализированные устройства, которые могут быть использованы для решения задачи произвольного размера и делать это не хуже, чем программные средства универсальных компьютеров. Для решения данных вопросов часто используются аддитивное разбиение и тензорное исчисление [1].

Параллельное представление алгоритмов. Многие важные алгоритмы обработки данных имеют очень специализированные структуры или совсем не структурированы. Вопросы реализации таких алгоритмов на параллельных и конвейерных устройствах достаточно сложны. Поэтому для достижения желаемой скорости обработки необходимы средства, позволяющие максимально использовать возможности параллелизма и конвейерной организации. Иначе говоря, задача нахождения отношения параллельности реализуемых алгоритмов на множестве ПЭ весьма актуальна.

Аппаратные средства параллельной обработки. Из числа новых разработок элементной базы для высокопроизводительных ЭВМ следует отметить создание СБИС центральных процессоров с высоким быстродействием, создание высокопроизводительных МПС с ограниченным набором команд (RISC-процессоров), реализация параллельных процессоров в виде одной СБИС и появление транспьютеров - нового мощного направления развития элементной базы.

Современный уровень развития технологий БИС, используемых при построении суперкомпьютеров, уже сейчас позволяет получать СБИС на основе арсенида галлия, ячейки НЕМТ, ИС с переходами Джозефсона с быстродействием свыше одного млрд.оп./с. Завершена разработка машины типа Сгау-3, имеющей 16 процессоров. Период тактовых импульсов системы 2 нс и производительность от 20 до 25 млрд.оп./с.

Термин "транспьютер" в настоящее время используется в двух значениях: 1) как наименование программируемых СБИС, разработанных фирмой INMOS и предназначенных в качестве вычислительных модулей для создания сверхпроизводительных параллельных систем; 2) как наименование любых подобных транспьютерам вычислительных модулей. Основное назначение транспьютеров заключается в построении параллельных вычислительных систем высокой производительности. Транспьютерную систему можно использовать для организации конвейерных вычислений, систолической обработки, векторной и матричной обработки, обработки методом потока данных.

Обобщая результаты анализа основных тенденций в развитии современных ВС, следует отметить, что наиболее перспективным способом достижения высокой производительности является построение ВС на основе большого числа однородных ЭВМ. Данные системы привлекательны из-за локальности линий связи, что обеспечивает большую пропускную способность. Стремление эффективно решать задачи на таких системах должно обязательно сопровождаться согласованием структуры численных методов и архитектуры ВС.

2. Современное состояние исследований

В настоящее время известны различные подходы к анализу и синтезу структур СВС. К ним относятся методы декомпозиции, координации и агрегации, развиваемые в работах [1,3], методы агрегативного описания сложных систем [5], логико-комбинаторный подход [6], структурный подход [13], подход, основанный на теории сложности [14].

Современные потребности науки и техники, которые выражаются: во-первых, в требовании все более совершенных средств проектирования; во-вторых, в необходимости принятия во внимание эффектов, которыми раньше пренебрегали, привели к возникновению и развитию системного подхода к проектированию сложных систем.

Под системным подходом, реализуемым в автоматизированных системах проектирования ЭВМ, подразумевается интегрированное рассмотрение и представление в системе объектов и операций проектирования на различных стадиях процесса проектирования. Такой подход идеологически близок возникшей много позже концепции IDEF – технологий, что подтверждает его состоятельность и актуальность

Органически вписывается в концепцию системного подхода структурный подход, который приобретает еще большее значение на современном этапе проектирования параллельных СВС. В соответствии со структурным подходом к проектированию действия разработчика включают следующие этапы:

- выработка ряда гипотез, касающихся структур подсистем, из которых будет состоять проектируемая ВС;
- формирование из полученных подсистем альтернативных структур-кандидатов;
- анализ каждой структуры с целью определения характеристик и выбора окончательной структуры.

Одним из новых подходов к синтезу структур ВС является логико-комбинаторный подход [1,6]. В ходе проектирования перед разработчиком структуры сложного объекта встают следующие задачи.

1. Каким образом построить множество альтернативных вариантов структуры проектируемого объекта и в какой форме представить это множество?
2. Какую степень детализации модели выбрать для анализа каждого альтернативного варианта с целью выбора наилучшего?
3. Какие методы использовать для уменьшения трудоемкости перебора и сравнения вариантов?

Представление о множестве альтернативных вариантов структуры формируется у проектировщика на основании опыта проектирования, научных законов, известных прототипов и близких решений, интуиции. С ростом числа альтернативных вариантов задача синтеза наилучшего варианта может быть практически неразрешимой, если ориентироваться на явное представление всего множества вариантов. Выходом является переход к неявному представлению.

В качестве неявного рабочего представления множества альтернативных вариантов при логико-комбинаторном подходе предлагается использовать особые скобочные нормальные формы (о.ск.н.ф.) булевых функций и контекстно-свободные плекс-грамматики.

Представление множества альтернативных вариантов в виде о.ск.н.ф. обладает следующими достоинствами: 1) позволяет уменьшить трудоемкость выбора оптимального варианта структуры; 2) наглядно представляет систему блоков, подблоков, из которых строятся варианты структуры; 3) достаточно легко может быть преобразовано в другие формы представления.

В то же время описание вариантов структур в виде о.ск.н.ф. имеет и ряд недостатков, к которым можно отнести: 1) ограниченность выразительных возможностей булевых функций, например, по сравнению с теорией графов; 2) определенная трудоемкость идентификации специальной скобочной записи альтернативного варианта, что отрицательно сказывается при решении комбинаторных задач близких к NP-сложным.

В связи с этим логико-комбинаторный подход имеет ограниченную форму применимости и не является эффективным при проектировании структур параллельных ВС.

Поиск наилучшего варианта структуры ВС сопряжен с необходимостью количественной оценки каждой структуры, а это в свою очередь требует наличие соответствующих математических теорий и методов.

В этом плане особый интерес представляют теория структур [13] и теория сложности [14]. Использование данных теорий при проектировании позволяет управлять процессом поиска и значительно уменьшить сложность решаемых задач.

В рамках описанных подходов к проектированию структур ВС предложено достаточно большое число методов проектирования, среди которых можно выделить следующие: декомпозиция и агрегатирование, формальный синтез [1, 3], синтез на основе эвристических приемов [15], синтез по обобщенной модели [16].

Преимуществом методов декомпозиции и агрегатирования является упрощение процедуры исследования сложной системы путем ввода процесса декомпозиции. Однако, проблема отображения результатов исследования отдельных подсистем на общую систему в данном методе не рассматривается, что является недостатком данного метода, т.к. задача получения характеристик общей системы на базе результатов исследования подсистем является достаточно сложной и требует дальнейшего изучения.

Недостатком формального синтеза сложных ВС являются достаточно жесткие условия для математического описания исследуемого объекта и законов композиции целого из частей. Методы синтеза на основе эвристических приемов применяют, в основном, для решения изобретательских задач. Данные методы не могут быть формализованы и поэтому сфера их использования ориентирована в основном на интеллектуальные САПР. Методы синтеза по обобщенной модели основаны на комбинировании различными элементами обобщенной структуры, для получения новых технических решений. Методы данной группы весьма

перспективны, т.к. всегда могут дать искомое решение, если оно существует. Однако, в силу NP-сложности решаемых задач, практическое использование данных методов затруднено.

Описанные выше подходы и методы проектирования сложных ВС характеризуются многими положительными свойствами. Среди них, в первую очередь, необходимо выделить следующие.

1. Структурный подход к проектированию и построение альтернативных вариантов на основе обобщенной модели позволяет проектировщику получить все множество возможных вариантов, из которых выбираются оптимальные структуры. Однако, как было уже отмечено, NP-сложность задачи получения множества альтернативных вариантов не позволяет широко использовать данный подход на практике.

2. В силу возрастающей сложности проектируемых структур ВС широкие возможности предоставляют методы декомпозиции и агрегатирования, которые позволяют проводить анализ и синтез моделей по частям. Однако, существенным моментом, ограничивающим применение данных методов, является способ объединения результатов исследования подмоделей сложной ВС.

3. Важным преимуществом описанных методов является способность исследовать подмодели сложных ВС, представленных с различной степенью детализации. Данный подход позволяет сокращать размерность общей модели ВС и проводить исследования с помощью ПЭВМ, широко доступных пользователям. При использовании данного метода в настоящее время выделяют два направления: первое состоит в сочетании различных способов описания и алгоритмов моделирования, применяемых на тех уровнях описания, для которых они реализуются наиболее эффективно; второе направление поддерживает общую концепцию описания и моделирования для всех уровней представления. В связи с использованием указанных направлений, каждое из которых имеет определенные преимущества по сравнению с другим, необходимы либо такой математический аппарат, который позволял бы поддерживать и обобщать результаты, полученные разными методами, либо такой формальный язык описания, который позволил бы описывать многоуровневые модели ВС с различной степенью детализации.

4. Одним из преимуществ, например, логико-комбинаторного подхода, является простота получения альтернативных вариантов. Однако, данный подход не предназначен для описания параллельных многоуровневых структур.

На основе сделанного анализа можно заключить, что очень важным и актуальным является разработка такого подхода к проектированию структур параллельных ВС, который позволял бы:

- обобщать результаты, полученные как с помощью разных методов исследования отдельных уровней описания модели, так и с помощью единого формализма;

- строить простые методы отображения результатов исследования отдельных подсистем на общую модель ВС;

- сочетать простоту получения альтернативных вариантов с возможностью описания многоуровневых моделей параллельных ВС с различной степенью детализации.

Одним из таких подходов к проектированию сложных ВС является подход, основанный на тензорных методах. Впервые систематически идею использования тензорного подхода изложил американский инженер Г.Крон, который использовал тензорные методы при анализе электрических машин [27, 28]. В дальнейшем тензорные методы развивались как в работах отечественных, так и в работах зарубежных ученых. Вопросы использования тензорного исчисления при проектировании параллельных структур ВС впервые были рассмотрены в работах [19, 20, 24].

Рассмотрим основные достоинства тензорного исчисления.

Преобразование систем координат. Тензорное исчисление, как математический аппарат, позволяет осуществлять преобразование одной системы координат в другую, переход между пространствами. На практике данное свойство позволяет анализ сложных ВС проводить в такой системе координат, в которой исследуемая система будет иметь наименьшую сложность.

Диакоптика. Диакоптика или метод расчленений является теорией, объединяющей два источника информации: уравнения и графы или матрицы и графы, связанные с некоторой экономической или физической системой [17, 28]. Диакоптика представляет собой попытку объединить непрерывный анализ с дискретным. Иначе говоря, метод решения по частям позволяет объединить возможности теоретико-множественной топологии (дифференциальные уравнения, теории функций и т.д.) с возможностями комбинаторной топологии (теория графов) в единый инженерный метод анализа и расчета сложных систем.

Унификация процесса проектирования. В настоящее время многие ученые отмечают, что для проектирования современных систем нужны не новые

математические теории, а правильное использование уже известных [1, 3, 6]. Важная роль в "организации" существующих методов решения вопросов проектирования сложных систем принадлежит тензорному исчислению, которое "предназначено" как раз для того, чтобы получить единый подход к исследованию сложных систем различной природы" [18].

Простота генерации альтернативных вариантов. Выше было отмечено, что тензорное исчисление позволяет одну и ту же систему представлять в различных системах координат [19, 20]. Связь между различными "проекциями" системы осуществляется с помощью тензоров преобразования. На этом свойстве основан метод генерации альтернативных вариантов. В соответствии с данным методом в качестве исходных данных берется такая "проекция" некоторой сложной системы, в которой существует минимальное число связей. В некоторых источниках такая система называется примитивной. Поочередно, в соответствии с некоторым правилом, устанавливая в примитивной системе связи между элементами и умножая на тензор преобразования, можно получать все множество альтернативных структур в исходной системе координат.

Простота отображения результатов исследования отдельных подсистем на общую систему. Простота получения общих результатов исследования сложных систем объясняется свойствами тензоров преобразования. Если существует тензор преобразования, связывающий две проекции одной и той же системы в разных системах координат, то данный тензор преобразования связывает и характеристики системы, представленные в тех же системах координат [1]. Во многих работах, посвященных исследованию сложных систем тензорными методами, эталонным языком описания является язык электротехники [18]. Этому явлению соответствуют объективные предпосылки. Теория расчета электрических цепей одновременно рассматривает как уравнения процессов, описываемых законом Ома, так и уравнения структуры, описываемых законом Кирхгофа. Поэтому постановку задачи расчета некоторой системы, которая может быть и не электрической, удобно формулировать в терминах источников тока и ЭДС, расчета напряжений и величины токов. Однако, язык электротехники имеет существенный недостаток, который выражается в неспособности данного языка описывать недетерминированные и параллельные процессы. В связи с этим, для более эффективного использования тензорного подхода к проектированию параллельных ВС необходимы иные средства описания, способные отображать параллельное развитие процессов.

3. Методы формализованного описания структур вычислительных систем

Целью формализованного описания структур ВС является представление имеющихся данных и параллельных процессов в виде специальных формальных объектов, удобных для проведения над ними вычислительных и имитационных экспериментов на ЭВМ. Поэтому выбор формализованного языка, в наибольшей степени учитывающего особенности параллельных ВС, является основной задачей начального этапа проектирования.

Решение таких задач связано с применением специальных методов построения синхронных и асинхронных моделей дискретных систем. Среди этих методов наибольшую известность получили методы алгоритмизации систем массового обслуживания, автоматного и агрегативного моделирования, расширения известных языков программирования [21], структурные нотации [22], сетевой и алгебраический подходы [23, 24], графовые модели [24, 25].

Подход, предложенный в работах [5] для формализации анализа сложной системы и состоящий из трех шагов: структуризации объекта, формализации элементов сложной системы и взаимодействия между этими объектами, обладает существенным недостатком. Данный недостаток заключается в том, что такая формализация элементов системы и взаимодействия между ними обладает "неформульным" заданием схемы сопряжения (в виде рисунков) и операторов сопряжения (в виде таблиц).

Подобная формализация не представляет возможность формализовать область эквивалентных структурных преобразований схемы сопряжения. Этих недостатков лишена формализация элементов сложной системы и взаимодействия между ними с помощью так называемых R-модулей [26], которые используются не только при описании детерминированных динамических систем, функционирующих в дискретном времени, но и при описании стохастических систем, представляемых вероятностными автоматами. Однако, подобные автоматные модели не перекрывают все возникающие задачи.

Использование параллельных языков программирования и структурных нотаций для формализованного описания структур ВС эффективно лишь для анализа одной структуры ВС, так как данные описания громоздки и не приспособлены для поддержки процедур синтеза новых структур ВС. Если ВС рассматривать только как множество взаимодействующих функциональных блоков (объектов), а не как вычислительную сеть или многопроцессорную систему, то для исследования процессов, протекающих в ВС, может быть использован сетевой

подход [23,24]. В работе [6] для описания параллельных процессов с синхронизацией описаны предложены OS-сети. Потребляемые ресурсы в этой модели явно не задаются, повторно используемые ресурсы используются самые простые. Предложенные OS-сети используются, в основном, для анализа тупиковых ситуаций, которые могут возникнуть в параллельных ВС.

Эффективным средством анализа и синтеза параллельных ВС и процессов является алгебраический подход [23], который основан на формульном выражении сетевых моделей. Использование алгебраического подхода позволяет аналитическими методами путем проведения эквивалентных преобразований формул получать оптимальные структуры ВС [6]. Недостатками данного подхода являются: во-первых, ограниченность, т.к. не все сетевые структуры могут быть описаны алгебраически; во-вторых, сложность, т.к. процесс построения алгебраического описания сложной сетевой структуры требует определенных навыков и умения.

В последнее время во многих работах отмечается тот факт, что графовые модели являются наиболее удобными и эффективными средствами описания и исследования параллельных структур и процессов. К настоящему времени существует несколько формализмов, основанных на графовых моделях и служащих для описания параллельных процессов. Наиболее общими из них являются [24]:

- схемы параллельных программ Карпа-Милнера;
- А-программы Котова-Нариньяни ;
- биологические графы ;
- вычислительные модели;
- операторы Хоара .

К концу 70-х годов указанные модели были практически вытеснены сетями Петри (СП) [24, 25] - формализмом, описывающим структуру и взаимодействие параллельных процессов. Широкое распространение СП обусловлено рядом преимуществ, среди которых можно выделить следующие.

1. СП позволяют моделировать асинхронность и недетерминизм параллельных независимых процессов, параллелизм конвейерного типа, конфликтные взаимодействия между процессами.

2. СП включают в себя возможности ряда других моделей, предложенных для описания и исследования параллельных ВС (семафоры Дейкстры, системы

векторного сложения, вычислительные сети, сетевые структуры, модели повторно используемых ресурсов и др.).

3. СП, расширенные такими обобщениями, как ингибиторные дуги, приоритетность и время срабатывания переходов, цветные метки и др., позволяют моделировать сложные ВС с учетом таких факторов, как приоритетность процессов, временные параметры событий, совместное отображение структуры управления и потоков данных.

4. В отличие от других формализмов (таких, как А-программы, схемы Карпа-Милнера и др.) СП допускают произвольную интерпретацию элементов модели как в смысле выполняемого фрагмента (выражения, операторы, подпрограммы, аппаратные преобразования информации), так и по уровню абстракции. Это позволяет с помощью СП производить иерархическое построение аппаратных и программных модулей ВС.

5. Эффективность представления знаний в ЭС. Современные языки программирования имеют существенные ограничения, которые связаны с выполнением действий в определенном порядке. Исследование в этой области, направленные на устранение указанного ограничения путем ввода новых примитивов, привели к использованию СП. Между СП и представлением знаний в ЭС существует глубокая связь. В частности, предикатные СП являются продукционными системами, основанными на логике первого порядка. Кроме того, модульность системы правил является существенным показателем производительности ЭС. С этой точки зрения СП имеют преимущества, так как активизация правил, представленных в терминах СП, происходит ассоциативным образом, а не в порядке, строго заданном процедурой.

6. СП, обладая однородностью и аналитическими зависимостями, которые описывают функционирование переходов, удовлетворяют необходимым условиям для использования в тензорной методологии.

7. Для СП, которые являются двудольным ориентированным динамическим помеченным мультиграфом, справедливы все положения теории графов.

Заключение

На основе проведенного исследования проблем анализа и синтеза структур параллельных ВС можно сделать следующие выводы.

1. Большинство современных вычислительных структур характеризуются такими свойствами, как параллелизм, недетерминированность, многоуровневость

представления, сочетание синхронных и асинхронных процессов, однородность и др. Эффективное решение задач на таких структурах должно обязательно сопровождаться согласованием структуры численных методов и архитектуры ВС.

2. При решении проблемы синтеза эффективных вычислительных структур основополагающим вопросом является выбор математического фундамента, на котором может строиться изучение таких разнородных компонент, как численные методы, алгоритмы, структуры ВС и их математические модели. В качестве подобного математического фундамента предлагается использовать тензорное исчисление.

3. Из проведенного анализа следует, что реализация современных проектов ВС должна вестись при поддержке эффективных средств автоматизации проектирования, моделирования и верификации. В силу NP-сложности задач синтеза альтернативных вариантов проектируемой ВС, автоматизация структурного и параметрического синтеза является трудно реализуемой даже с использованием САПР, реализованных на высокопроизводительных ЭВМ. Поэтому большинство из существующих подходов к решению данной задачи носят эвристический характер и предусматривают включение в контур машинного проектирования человека. На основе этого можно заключить, что современные САПР параллельных ВС должны иметь интеллектуальную составляющую.

4. Анализ методов формализованного описания современных структур ВС и их особенностей, параллельных процессов и алгоритмов, интеллектуальных САПР позволил остановиться на аппарате СП, который в рамках единого формализма не только дает возможность описывать указанные разнообразные объекты, но, кроме того, предоставляет развитые методы анализа параллельных процессов и, обладая однородностью и аналитическими зависимостями, удовлетворяет условиям для использования в тензорной методологии.

Список литературы

1. Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности / Под редакцией: академика В. А. Садовниченко, академика Г. И. Савина, чл.-корр. РАН Вл. В. Воеводина.-М.: Издательство Московского университета, 2009.-232 с.
2. Dorai C, Venkatesh S. Bridging the Semantic Gap with Computational Media Aesthetics.
3. Цапко И. В., Цапко С. Г. Архитектура вычислительных систем. – Томск, Из-во Томского политехнического университета, 2011. -168с.

4. Майерс Г. Архитектура современных ЭВМ: В 2-кн. Кн.1. - М.: Мир, 1985. - 364 с.
5. Букатов А. А., Дацюк В. Н., Жегуло А. И. Программирование многопроцессорных вычислительных систем. Ростов-на-Дону. Издательство ООО «ЦВВР», 2003, 208 с.
6. Воеводин В.В. Параллельные структуры алгоритмов и программ. - М.: ОВМ АН СССР, 1987. - 148с
7. Цветков В.Я., Вознесенская М.Е. Метод встречных потоков при проектировании программных продуктов // Успехи современного естествознания. - №3. - 2010. - с.138-139.
8. Митропольский Ю.И. Концепции иерархического построения высокопроизводительных вычислительных систем. // Кибернетика и вычислительная техника (Москва). - 1991. - N5. - С.7-14
9. Мальцева Н.С., Коммутационная структура с параллельной идентификацией для многопроцессорных вычислительных систем /дис. К.т.н., специальность 05.13.05- Астрахань , 2008, 140с.
10. Kramer J., Magee J. Dynamic configuration for distributed systems.//IEEE Trans. Software Eng., 1985, 11, N4. - P.424-436
11. Цой Ю.Р. К применению нейронных сетей для аппроксимации таблицы правил клеточного автомата // Нейроинформатика и ее приложения: Материалы XIV Всероссийского семинара, 6-8 октября 2006 г. / Под ред. А.Н. Горбаня, Е.М. Миркеса. - ИВМ СО РАН, Красноярск, 2006. - С. 129-130.
12. Kunde M., Lang H.-W., Schimmler M., Schmeek H., Schroder H. The instruction systolic array and its relation to other models of parallel computers./Parallel comput. Proc. 2 Int. Conf., Berlin, 23-25 Sept.,1985. Amsterdam e.a., 1986. - P.49-497.
13. Вашкевич Н.П., Зинкин С.А., Кулагин В.П. Структурный подход к проектированию мультипроцессорной вычислительной системы управления базой данных.// Известия ВУЗов. Приборостроение. - Т.24. - N 9. - 1983. - С.15-24.
14. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. - М.: Наука, 1990. - 166 с
15. Цыканова М. А. Разработка метода синтеза эвристических приемов. /автореферат к.т.н. 05.13.12. –Волгоград 2013.- 21с.
16. Одрин В.М., Картавов С.С. Морфологический анализ систем. - Киев: Наукова думка, 1977. - 83 с
17. Курганов С. А. Символьный анализ и диакоптика линейных электрических цепей/ дис. Д.т.н. 05.09.05- Ульяновск, 2006 - 331с.

18. Арменский А.Е. Тензорные методы построения информационных систем. - М.: Наука, 1989. - 149 с.
19. Кулагин В.П. Тензорные методы проектирования структур вычислительных систем.//АВТ. - 1989. - N2. - С.64-71.
20. Кулагин В.П. Исследование моделей вычислительных систем методом преобразования координат. // Вычислительная техника в автоматизированных системах контроля и управления: Межвуз. сб. научн. тр. - Вып.20. / Пенза: Пенз. политехн. ин-т. - 1990. - С.4-7
21. Армстронг Дж.Р. Моделирование цифровых схем на языке VHDL: концепция моделирования на уровне интегральных схем. - М.: Мир, 1992. - 174 с
22. Гергель В.П., Стронгин Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем. - Н.Новгород, ННГУ, 2001
23. Кулагин В.П. Алгебра сетевых моделей для описания параллельных вычислительных систем.// Автоматизация и современные технологии. - 1993. - N2. - С.25-30
24. Кулагин В.П. Моделирование структур параллельных ВС на основе сетевых моделей. – М.: МИЭМ, 1998 - .102с
25. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. - М.: Мир, 1984. - 264
26. Иванов П.М. Формализация анализа сложных систем.//Кибернетика и системный анализ. - 1992. - N4. - С.87-92.
27. Крон Г. Тензорный анализ сетей. - М.:Сов. радио, 1978. - 720 с.
28. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). - М.: Наука, 1972. - 544 с.