

УДК 681.3.01:51.681.3.001

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МИКРОСТРУКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В.А.Скоробогатов

Интенсивное развитие технологии создания электронных приборов и растущая необходимость повышения производительности вычислительных машин **выдвинули в 1960-х годах** проблему поиска новых принципов построения цифровых устройств с максимальным учетом особенностей технологии их изготовления.

Один из путей решения этой задачи был предложен в ИМ СО АН СССР в 1962 году Э.В.Евреиновым и Ю.Г.Косаревым [1]. В основу создания вычислительных устройств ими были положены следующие принципы:

- параллельность выполнения большого числа операций, которая дает возможность наращивать производительность путем увеличения числа элементов и позволяет, когда это необходимо, избежать применения сложных быстродействующих элементов;
- конструктивная однородность - однотипность элементов и связей между ними, сводящая технологию изготовления к многократному повторению одного и того же элемента вместе с его связями;
- программная изменяемость структуры, которая позволяет, оставаясь в рамках конструктивной однородности (что особенно важно для технологии), создавать схемы, наилучшим образом соответствующие решаемой задаче. Этим достигается высокая эффективность вычислительных устройств при решении различных классов задач.

Соблюдение этих принципов привело к идее создания вычислительных сред [2] - совокупности простейших одинаковых автоматов, одинаковым образом соединенных между собой, программно настраиваемых на выполнение некоторой функции из автоматически полного набора. Кроме того, каждый автомат настраивается на выполнение соединительной функции, что обеспечивает за счет программной настройки реализацию в среде любого автомата.

Вычислительная среда в отличие от итеративных сетей и ключевых автоматов [3,4] обладает принципиальным свойством - возможностью программного изменения структуры.

В практическом плане среда позволяет повышать производительность вычислительных устройств путем увеличения её размеров без изменения математического обеспечения, а также увеличить надежность и живучесть за счет специального резервирования и перестройки.

В 1966-1967 гг. проблема создания вычислительных сред получила всеобщее признание как в СССР, так и за рубежом. К работе подключился ряд научных и технических организаций в СССР. В США ведущим центром исследования в этой области стал Стэнфордский научно-исследовательский институт.

В Институте математики СО АН СССР в 1962-1971 гг. под руководством Э.В.Евреинова были разработаны теоретические основы и намечены пути практической реализации вычислительных сред.

Начиная с 1971 года, основное внимание уделяется задачам автоматизированного проектирования больших интегральных схем. Опыт коллектива при проведении прежних работ оказался полезным для решения задач автопроектирования, он создал предпосылки для развития оригинального направления в автоматизированном проектировании больших интегральных схем (БИС). Проведены работы по проектированию ЭВМ для параллельной обработки данных в реальном времени. На этапе логического проектирования разработанные ранее методы логического синтеза удалось распространить на проектирование автоматов управления, реализуемых способами МОП-технологии больших интегральных схем. Развиваются эффективные теоретико-графовые методы для решения задач проектирования топологии БИС.

Настоящая статья представляет собой обзор работ по теории, проектированию вычислительных сред и по проектированию больших интегральных схем. Результаты исследований по физическому моделированию элементов сред в работе не рассматриваются.

Одно из основных мест в теории вычислительных сред занимают вопросы изучения моделей сред, методы их представления и разработка методов синтеза.

Для исследования функциональных, вычислительных возможностей и структурных особенностей ВСр применяются соответствующие модели.

В [5,6,7] используется автоматная модель, в которой ВСр рассматривается как сложный автомат, состоящий из множества одинаковых элементарных автоматов (элементов), одинаковым образом соединенных со своими ближайшими соседями. Элемент имеет два типа входов: информационные и настроечные. Каждому состоянию множества настроечных входов (состоянию реализации элемента [5]) соответствует одна функция из автомато-соединительного базиса. Функция, выполняемая средой, определяется программой настройки. Эта модель позволила достаточно полно исследовать возможности дискретной ВСр с индивидуальным поведением элементов как "универсального конструктора", позволяющего реализовать любой конечный автомат. Исходя из этого требования, для указанной модели получены [6] условия полноты автомато-соединительного базиса и определен его минимальный состав ($|F|_{\min} = 3$ для двумерной и $|F|_{\min} = 2$ для трехмерной среды). Эта модель использована во многих как теоретических, так и прикладных работах по синтезу автоматов и проектированию вычислительных устройств в средах.

Основу теории ВСр составляют результаты, рассмотренные в [5,7]. Наиболее существенные из них следующие: доказана универсальность вычислительной среды (при неограниченном числе элементов) путем конструктивного построения машины Тьюринга; доказано, что в вычислительной среде может конечное число раз моделироваться сама вычислительная среда без растяжения во времени. Это принципиально отличает вычислительную среду от обычных универсальных автоматов; доказано, что в вычислительной среде можно моделировать любой автомат Неймана-Черча и не существует такого автомата Неймана-Черча, в котором можно было

бы моделировать вычислительную среду; доказано, что в вычислительной среде можно реализовать как универсальный, так и проблемно-ориентированный автомат; доказано, что среди всевозможных автоматов с программируемой структурой вычислительные среды имеют наименьшую сложность, определяемую числом состояний настройки, числом вводов-выводов и рядом других параметров.

Оформулированы необходимые и достаточные условия полноты системы элементов среды, что позволяет строить максимально простые элементы среды.

Однородность структуры, допустимость некоторого процента брака, уменьшение общего числа соединений и отсутствие сборки позволяет ослабить требования к технологии изготовления вычислительных сред.

Для изучения более тонких структурных свойств сред использовалась теоретико-множественная модель [8,9]. Она получается как совокупность двух конструкций: пространства и модели элемента среды, которая понимается как некоторое множество покрытия пространства.

При описании соединений элементов предполагается, что элемент есть некоторое подпространство, при этом соединение двух или большего числа элементов представляется непустыми пересечениями соответствующих подпространств. В этом случае оказывается, что изучение множества всевозможных соединений элементов в пространстве сводится к изучению множества всех покрытий данного пространства. Эта модель позволила составить общую картину классификации дискретных сред и понять, какие структурные особенности могут иметь среды при обобщении понятия близкодействия, размерности и т.д. Перспективы использования свойства однородности совместно с перестройкой исследованы на основе групп-графовой модели ВСр [10]. Эта модель позволила внести ясность в вопрос о вложимости сред и использовать этот факт для обеспечения преемственности программ настройки разных вариантов сред. В [11] исследуется возможность составления программ настройки вариантов сред по программам настройки вариантов, вложимых в исходные. Среде ставится в соответствие граф, в котором ребрам у каждой вершины приписаны индексы из заданного множества. Определяется класс правильных графов, соответствующих структуре соединений элементов ВСр, и исследуются их свойства.

На основе понятия вложимости элементов и графов дается определение вложимости вариантов сред. Получен алгоритм распознавания вложимости. Дальнейшие исследования в этой области были продолжены в [11].

Одно из центральных мест в теории сред занимают работы в области синтеза автоматов. В этой области можно выделить три основных направления: технический синтез, синтез по абстрактному описанию, вложение алгоритмических языков.

Технический синтез. В [2,5] задача синтеза поставлена как задача перехода от логической сети, полученной на этапе структурного проектирования автоматов [15], к настройке среды на выполнение функций этой логической сети, при этом среда могла иметь любой функционально-соединительный базис. Такая постановка предполагает, что "верхние" этапы проектирования выполняются независимо от того, на какой конструктивной основе производится реализация схемы. И только на этапе технического синтеза учитываются особенности реализации в среде. Этот подход позволяет использовать одни и те же системы автоматизированного проектирования ЦВМ как при проектировании схем с произвольной структурой, так и при проектировании их в вычислительной среде. В [9, 19-22] подробно исследуется основная задача технического синтеза логических сетей в вычислительных средах, которая заключается в отображении логической сети в среду. При этом образ сети в среде называется программой настройки среды. Разработан ряд методов синтеза для двумерных сред и для n -мерных евклидовых сред. В [9] показано, что сложность программ настройки для большинства сетей с ростом сложности сети стремится к квадрату порядка сети.

Рассмотрены вопросы оптимизации программ на основе анализа, при котором используются специальные характеристики сетей, позволяющие на ЭВМ оценить предварительную сложность программы без отображения её в среду. Позже некоторые результаты удалось использовать для создания эффективной методики распознавания изоморфизма графа, анализа графа на связность и для решения ряда других задач. Машинный эксперимент подтвердил эффективность разработанных методов оптимизации. Достаточная общность этих методов позволяет надеяться на их применение при решении задач проектирования топологии больших интегральных схем и др.

Методы синтеза автоматов по абстрактному представлению, а также способы отображения булевых выражений, на которые эти методы опираются, разрабатывались для класса сред, ориентированных на криотронную реализацию [23-26]. При этом была поставлена задача создать комплекс методов, который позволял бы получать программы настройки, исходя из различных форм представления автоматов: таблиц переходов, граф-схем алгоритмов, канонических уравнений. В основу методов положен принцип реализации логических функций параллельно-последовательными схемами. Это дало возможность найти удобные формы отображения в вычислительной среде общепринятых форм выражения булевых функций в классическом базисе И, ИЛИ, НЕ [23,24]. Задача оптимизации сформулирована как задача поиска выражения булевой функции, соответствующего программе настройки с наименьшей площадью среды [25].

Позже, при разработке вычислительной среды на сверхпроводящих элементах, был выдвинут несколько другой подход, основная идея которого заключается в том, что особенности среды (базис, способы соединения элементов) следует учитывать на более ранних этапах проектирования [16]. В связи с этим был разработан ряд методов непосредственного перехода от разных способов задания автоматов к отображению реализующих их схем в решетку среды. Эти методы, разработанные для класса вычислительных сред на криотронных элементах с двухсторонней проводимостью, затем были распространены на универсальные вычислительные среды [17].

Особое внимание уделено так называемому "каскадному методу" синтеза автоматов с памятью, который позволяет получить программу настройки путем преобразования представления алгоритма функционирования автомата [24,25,26]. Метод разработан как для синхронных, так и для асинхронных автоматов.

Способы оптимизации программ [25] и оптимального кодирования состояний [26] используют аппарат алгебры разбиений и представления кода в виде алгебраической структуры на множестве разбиений множества состояний автоматов. Аппарат позволяет исследовать свойства подмножеств внутренних состояний с точки зрения кодирования их интервалами в пространстве внутренних переменных. Это соответствует критерию минимизации программы настройки по числу строк, а также даёт возможность выразить в

этих же терминах условия отсутствия критических состязаний. Алгоритм заключается в последовательном построении дистрибутивной структуры, причем на каждом шаге максимизируется число полных состояний, реализуемых в одной строке программы настройки.

Разработаны методы [27-29] формального перехода от логического описания автомата к дифференциальным уравнениям, описывающим динамику их работы. Эти методы позволили с помощью цифрового [28] и аналогового [27] моделирования исследовать области устойчивости стационарных состояний асинхронных автоматов, реализованных с применением "каскадного метода", и определить допустимые отклонения параметров переключающих элементов.

Простота и регулярность логической структуры программ настройки при использовании этих методов позволили разработать эффективные алгоритмы тестового контроля и диагностики схем, реализованных в среде [30].

К теоретическим работам, имеющим также непосредственное отношение к проблеме синтеза, следует отнести работы по **в л о ж е н и ю я з ы к о в** [13,14,18], результаты которых позволяют надеяться на осуществление возможности прямого перехода от алгоритмов решения некоторого класса задач, записанных на языке обобщенных подстановок [31], к определению структуры параллельных машин в классе вычислительных сред путем отображения в неё сети однородных автоматов, интерпретирующей язык.

Этот язык позволяет любому алгоритму, однозначно сопоставить однородную сеть из автоматов. Предполагается, что язык такого типа может служить основой для общего подхода к разработке математического обеспечения однородных машин. Это позволяет надеяться на эффективную формализацию этапа системного проектирования ЦВМ. Более детально с этой точки зрения исследован [31] класс сетей однородных автоматов, названный "однородными машинами". Показана [32] целесообразность их использования для решения задач с хорошо распараллеливаемыми алгоритмами (задачи линейной алгебры, задачи обработки сигналов). Выполнен эскизный проект "однородной машины" в виде специализированного вычислителя для обработки сигналов, использующий язык подстановок.

К исследованиям теоретического характера относятся работы [9, 33-35] по исследованию надежности реализации устройств в ВСр, вызывающие и дополняющие работы по техническому синтезу сетей в среде.

В [10] исследуются вопросы повышения надежности ВСр за счет локального резервирования и перестройки. Разработан метод локального регулярного резервирования, позволяющий при перестройке применять алгоритмы, не зависящие от положения отказавшего элемента и выполняемой им функции. Использовано свойство вложимости сред для создания метода синтеза, не требующего учета резервных элементов.

Разработаны методы определения надежности перестройки среды.

Предложена методика ускоренного статистического моделирования на ЭВМ для расчета надежности перестройки, которая для ряда вариантов резервирования и перестройки в зависимости от размеров среды и надежности её элементов позволяет получить зависимость вероятности появления в среде совокупности отказов, не устранимых применяемыми алгоритмами. Исследована зависимость надежности перестройки от сложности применяемых алгоритмов.

В [34,35,36] исследуются вопросы синтеза надежных автоматов в вычислительных средах.

Разработан [35] метод анализа надежности истинностных логических сетей в среде, который сводит анализ надежности программ ВСр к анализу надежности эквивалентных логических сетей, получающихся путем замены каждого элемента программы некоторой фиктивной идеальной схемой. Эта схема имеет дополнительные входы, позволяющие имитировать отказы реального элемента. Для решения этой задачи разработан приближенный вычислительный метод, который дает возможность учитывать только наиболее вероятные состояния среды. На основе разработанного в [36] метода предлагается приближенный метод расчета надежности комбинационных схем в среде в предположении абсолютной надежности настройки элементов среды. Получены выражения для надежности последовательных цепочек соединительных элементов и надежности программ для случая одиночных отказов элементов среды.

В [34] исследованы особенности активного и пассивного блочного резервирования. Разработаны методы глобальной перестройки, а также программирования в среде с неисправными элементами. Получены оценки надежности программ среды с глобальной перестройкой и нагруженным резервом. Разработаны машинные методы синтеза и перестройки сетей в среде, а также оценки их надежности.

Одной из наиболее значительных комплексных работ прикладного характера является создание системы автоматизированного проектирования (пакета прикладных программ) устройств логического управления в одномерной вычислительной среде [37].

Показано, что применение вычислительной среды для реализации систем управления позволяет понизить требования к технологии изготовления элементов системы, при этом не возникает необходимости для каждого нового проекта системы управления повторять проектирование и изготовление элементов, а также решены задачи обеспечения необходимой надежности и ресурса.

Устройство логического управления данного класса является частью сложной управляющей системы. Роль такого устройства состоит в переработке информации, поступающей на его входы от датчиков, и выработке управляющих сигналов, которые управляют комплексом исполнительных механизмов.

Разработана [38] схема элемента и структура среды, которая состоит из элементов (объединенных определенным образом в группы), обеспечивающих необходимую надежность путем использования группового резервирования в сочетании с непрерывным контролем и перестройкой. Разработан комплекс программ (25 000 команд), с помощью которых решаются следующие задачи:

- выбор базиса и синтез функций в среде [39,40], т.е. определение оптимального набора функций, которые должны выполнять элементы среды, и автоматическое получение программы настройки среды;

- рациональное размещение сети, т.е. распределение устройства логического управления в одномерном пространстве, и оптимизация числа соединений, пересекающих границы зон пространства;

- обеспечение заданной надежности [41] устройства, т.е. вычисление значения надежности системы при заданном диапазоне значений надежностных характеристик компонентов выбранной схемы элемента и группы. Комплекс обеспечения надежности позволяет получить общую характеристику надежности системы, если выбрана схема элемента, и кроме того, существенно облегчает процесс оценки степени пригодности тех или иных компонент для использования их в проектируемом устройстве.

В связи с развитием технологии изготовления больших интегральных схем проблема проектирования средств вычислительной техники и особенно самих БИС приобрела новые черты. Специфика интеграции естественным образом отражается на особенностях постановок традиционных задач проектирования, которые усложняются как по своей природе, так и по объектам, с которыми приходится иметь дело. В этом плане особенно важное значение приобретает системный подход на базе комплексного использования ЭВМ для проектирования [42] и совершенствование алгоритмов решения задач и методы их вычислений.

Учитывая сложность решения традиционных задач и некоторую их избыточность на различных этапах проектирования, наряду с развитием системного подхода, по-прежнему, целесообразно также искать пути, позволяющие упростить проектирование путем применения унифицированных логических структур БИС на основе вычислительных сред. Однако поскольку развитие технологии еще не достигло достаточно высокого уровня, а традиционный подход к проектированию в определенном смысле предопределяет естественную инертность в создании вычислительных сред на основе новых принципов, то при достигнутом уровне интеграции основные достоинства сред реализовать затруднительно.

Тем не менее некоторые свойства сред могут быть уже сейчас успешно использованы для разработки БИС на практике. Так, например, в [43,44,45,46] использовано свойство программируемости структуры для изготовления БИС: матриц с программируемой логикой; в [47,48,49] используется принцип однородности и параллельности вычислений для реализации микроэлектронных процессов различного назначения. Поэтому, учитывая тенденции развития вычислительной техники, кажется перспективным развитие методологии проектирования БИС с использованием принципов вычислительных сред и опыта, приобретенного в их исследовании.

В области структурного проектирования этот подход позволяет надеяться на практическое осуществление возможности прямого перехода от алгоритмов решения некоторого класса задач, записанных на специальном языке, к определению структуры машин, реализованных на программируемых БИС.

В связи с этим подходом проводятся работы по построению вычислительных устройств с параллельной обработкой информации: исследуются алгоритмы обобщенных подстановок, которые дают возможность построить язык, приспособленный как для описания алгоритмов решения широкого круга задач, так и для описания вычислительных устройств, выполняющих алгоритмы этого класса [31]. В том случае, когда очерчен класс задач, на который ориентировано проектируемое устройство, вопрос получения функциональной и логической схемы устройства сводится к вопросу конкретизации некоторой одной схемы [32]. Целесообразным здесь считается развитие формальных методов отображения алгоритмов решения классов задач и структуры специализированных вычислительных устройств.

В области логического проектирования особенности БИС указанного типа внесли определенную новизну в постановки задач. В этой связи можно отметить, что результатом синтеза является отображение логической сети на плоскость кристалла БИС с минимальной сложностью (а не минимизированная по числу элементов логическая сеть), которая учитывает площадь кристалла, в том числе площадь, которая требуется на соединения.

В этом направлении сначала разрабатывались методы [9, 34] проектирования логических сетей, реализуемых на однородных решетках с наименьшей сложностью, которую они допускают. Методы основаны на применении специального анализа графов логических сетей [50]. Эти методы относятся к этапу технического проектирования и по своей природе имеют много общего с традиционными задачами размещения и трассировки, которые решаются в этом случае для различных решеток.

Стремление учесть особенности критериев сложности реализации на более ранних этапах синтеза привело к непосредственному переходу от абстрактного представления автомата к отображению реализующей его схемы в виде её топологии [51]. Успехи в развитии такого подхода позволяют надеяться, что в перспективе ряд этапов проектирования БИС можно будет рассматривать как единую "логико-топологическую" задачу, в которой по заданному алгоритму функционирования должна определяться топология схемы. Здесь разработан метод "матричного" синтеза автоматов с

применением оптимального кодирования внутренних состояний по критерию минимальной площади кристалла [52]. Помимо очевидного выигрыша в уменьшении сложности реализации этого метода, существенно упрощаются и алгоритмы проектирования, так как можно исключить трудоемкие этапы размещения элементов и трассировки соединений.

В области теории моделирования рассмотрены различные аспекты физического моделирования процессов в БИС с целью анализа закономерностей распространения сигналов в регулярных двумерных решетках [53]. Полученные методы расчета электрических процессов и параметров БИС на практике позволяют исследовать влияния различных паразитных параметров схемы на возникновение и распределение помех.

Разработаны машинные методы электрического анализа для класса интегральных схем на МДП-транзисторах с одинаковыми или дополняющими типами проводимостей каналов.

Имеются программы, в которых по исходному описанию формируется описание цели для заданной схемы размещения транзисторов и сопоставляется система уравнений для переменных состояний. Программы могут быть использованы для решения статических задач, получения характеристики переключения и анализа переходных процессов. Интегрирование выполняется неявным методом; решение систем нелинейных алгебраических уравнений производится модифицированным методом Ньютона-Рафсона (без вычисления и обращения якобиана). Для вычисления токов эквивалентных источников в схемах замещения транзисторов используется модель Фромана-Бентчковского, несколько измененная для ускорения вычислений и улучшения соответствия характеристикам реальных транзисторов.

Комплекс программ практически опробован при разработке интегральных схем.

Дальнейшая ориентация работ в области электрического анализа определяется необходимостью ускорения этапа выбора параметров транзисторов при проектировании топологии БИС.

Основные задачи: повышение эффективности анализа схем с нелинейными параметрами, автоматический выбор фрагментов больших схем, ускоренное моделирование больших схем.

В области технического проектирования БИС работа сводится к решению задач размещения и трассировки. Схема представляется таблицей соединений, которая преобразуется в мультиграф. По некоторому критерию вершины мультиграфа упорядочиваются и в соответствии с этим порядком размещаются в клетках прямоугольной решетки. При этом очередная размещаемая вершина ставится в клетку, ближайшую к "центру тяжести" размещенных вершин, смежных с данной. Объем памяти ЭВМ и время её работы пропорциональны квадрату порядка мультиграфа.

Задача трассировки решается как задача Штейнера для плоской прямоугольной решетки с использованием алгоритма Прима для определения кратчайшей связывающей сети между фиксированными позициями. На каждом шаге используется принцип наибольшего совмещения нового пути с уже построенными. Объем памяти и время счета для одного соединения пропорциональны квадрату числа элементов в одном соединении.

Учитывая неадекватность топологии реальных устройств и их математических моделей и, кроме того, сложность решения указанных задач, можно считать желательной разработку достаточно большого числа приближенных быстродействующих алгоритмов, использующих множество различных критериев, включенных в систему проектирования ИС.

В области автоматизации проектирования фотошаблонов разработаны программирующие системы для фотонаборной и режущей установок.

Еще одно направление работ, которое имеет важное значение для эффективного решения задач проектирования, касается разработки системы методов решения некоторых задач на графах. Делается попытка создать единый подход к решению достаточно широкого круга задач прикладного характера на графах. Этот подход состоит в том, чтобы любая задача из выбранного класса решалась с максимальной простотой, которую допускает объект исследования, т.е. граф. Для этого необходимо

построение алгоритмов, адаптирующихся к некоторым параметрам графов. Это, по-видимому, позволит создать единую методологию —ческую основу для решения на ЭВМ указанных задач на графах достаточно большого порядка.

Перспектива практического использования этих работ определяется созданием специальной подсистемы САПр.

В области комплексной автоматизации проектирования на базе использования мощной вычислительной техники разработан проект САПр. Намечившаяся тенденция в разработках больших систем математического обеспечения [54], в частности САПр [42], а также желание реализовать в полном объеме преимущества, даваемые некоторым вариантом технологии, с учетом особенностей организации современных вычислительных устройств и того, что сейчас системы проектирования еще не прошли все стадии совершенствования и полностью не сформировались, привела к тому, что на первом этапе работы над САПр большое внимание было уделено формулированию требований, предъявляемых к системе, и принципов её построения.

Совокупность требований вытекает из рассмотрения САПр как инструмента инженера-проектировщика, цель создания которого состоит в попытке объединения в одном цикле всех этапов проектирования, начиная с определения класса задач и методов их решения, определения оптимальной структуры устройства, ориентированного на этот класс задач, разработки методик и способов проектирования и кончая выдачей технической документации.

Ниже перечислены основные требования и принципы построения системы, изложенные более подробно с пояснением путей их реализации в [55].

Требование первого уровня:

- инвариантность структуры системы к изменениям технологии производства и способов проектирования;
- совместимость ручного, автоматизированного и автоматического способов проектирования;
- удобство взаимодействия (interaction);
- накопление опыта проектирования в системе (адаптивность).

Требования второго уровня:

- инвариантность системы к изменениям средств проектирования в рамках некоторого класса технических средств;
- независимость ввода в действие и использования отдельных частей системы;
- перестраиваемость системы - программное управление набором рабочих этапов и связей между ними;
- выбор пользователем формы представления информации;
- одновременное ведение нескольких проектов;
- выбор пользователем алгоритмических средств обработки информации.

Перечисленные требования определяют следующие принципы построения САПр:

- стандартное оформление документации;
- иерархичность построения САПр;
- общий банк данных;
- наращиваемость;
- режим диалога;
- ведение архива системы;
- мультидоступ.

С точки зрения сформулированных требований и принципов САПр является специализированной операционной системой. Основу любой операционной системы составляет комплекс языков управления потоком задач, языков обработки и описания информации. Специализация определяется подбором конкретных языков. Поэтому основным при создании САПр является разработка набора проблемно-ориентированных языков для решения задач проектирования. При этом основное внимание должно быть уделено механизмам наращивания систем и подсистем и вопросам максимального сопряжения САПр с операционными системами общего назначения.

Создание САПр, предназначенной для большого числа пользователей, при эксплуатации её в рамках специализированной организации, которая обязана выполнять заказы на проектирование, предоставлять возможности "заказчику" на проведение самостоятельных работ на всех этапах проектирования, осуществлять внедрение и служить банком рабочих программ проектирования, является важной и сложной задачей.

Примерный объем САПр можно оценить в (300 - 500) к слов. Сравнительно небольшой коллектив специалистов способен осуществить детальную разработку технического проекта и его реализацию примерно за 5 - 6 лет.

Л и т е р а т у р а

1. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. О возможности построения вычислительных систем высокой производительности. Новосибирск, Изд-во сибирского отделения АН СССР, 1962.

2. ЕВРЕЙНОВ Э.В. О микроструктуре элементарных машин вычислительной системы. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 4. Новосибирск, 1962, с. 3-28.

3. HENNIE F.C. Iterative arrays of logical circuits. N.Y., 1961. 242 p.

4. Von NEUMANN J. Theory of automata: construction, reproduction, Homogeneity. Part of "Theory of Self-Reproducing Automata", ed. A.W.Burks. University of Illinois Press, Urbana Illinois, 1966.

5. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, "Наука", 1966.

6. ЕВРЕЙНОВ Э.В. Теоретические основы построения вычислительных сред. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 16. Новосибирск, 1965, с. 3-72.

7. ЕВРЕЙНОВ Э.В. Однородные цифровые автоматы с программируемой структурой. Дисс. на соискание учен. степени доктора техн. наук. Новосибирск, 1969.

8. СКОРОБОГАТОВ В.А. Модели вычислительных сред и некоторые принципы их классификации. - В кн.: Вычислительные системы. Программирование на вычислительных средах. (Труды I-й Всесоюзной конференции по вычислительным системам, Новосибирск, июнь, 1967). Вып. 3. Новосибирск, 1968, с. 35-69.

9. СКОРОБОГАТОВ В.А. Некоторые вопросы технического синтеза логических сетей в вычислительных средах. Дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук. Новосибирск, 1969.

10. КОЙФМАН А.А. Локальное регулярное резервирование и перестройка в вычислительных средах. Дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук. Новосибирск, 1970.

11. КОЙФМАН А.А. Вложимость вычислительных сред. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 33. Новосибирск, 1969, с. 10-25.

12. АБРАМОВА Н.А. Однородные логические сети и их группы автоморфизмов. - "Автоматика и телемеханика", 1970, №1, с.120-129.

13. КОРНЕВ Ю.Н., ПИСКУНОВ С.В., СЕРГЕЕВ С.Н. Модель линейной среды. - В кн.: Вычислительные системы. (Материалы ко 2-й Всесоюзной конф. по однородным вычислительным системам и средам. Секция У.), Новосибирск, 1969, с. 115.

14. КОРНЕВ Ю.Н., ПИСКУНОВ С.А., СЕРГЕЕВ С.Н. Алгоритмы обобщенных подстановок и вопросы их интерпретации. - В кн.: Теоретическая кибернетика. Вып. 4. Киев, 1970, с. 3-28.

15. ГЛУШКОВ В.М., КАПИТОНОВА Ю.В., ЛЕТИЧЕВСКИЙ А.А. О методе проектирования вычислительных машин в системе ПРОЕКТ. - "Кибернетика", 1972, № 2, с. 3-8.

16. БАНДИМАН О.Л. Реализация автоматов в криотронной вычислительной среде по заданному графу состояний. - В кн.: Вычислительные системы. Вып.33.Новосибирск, "Наука", 1969, с. 44-56.

17. МЕЛИХОВ А.Н., ТОПОЛЬСКИЙ Н.Г. Об одном методе синтеза автоматов в вычислительной среде. - В кн.: Цифровые модели и интегрирующие структуры. (Труды межвузовской научн. конф. по теории и принципам построения цифровых моделей и цифровых интегрирующих машин. Таганрог, сент., 1968 г.), Таганрог, 1970, с. 265-275.

18. КОРНЕВ Ю.Н., ПИСКУНОВ С.В., СЕРГЕЕВ С.Н. Об одном подходе к построению и использованию однородных вычислительных устройств. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с. 130-134.

19. КОИФМАН А.А., СКОРОБОГАТОВ В.А. Об одном способе составления программ для вычислительной среды. - В кн.: Тезисы докладов IX областной конф., посвященной Дню радио. Новосибирск, 1966, с.11-13.

20. СИДРИСТЫЙ Б.А., МИШИН А.И. Об одном методе реализации автоматов в вычислительной среде. - В кн.: Вычислительные системы (Труды симпозиума. Новосибирск, 1966 г.). Новосибирск, 1967, с. 209-214.

21. МАКАРОВ Л.И., СКОРОБОГАТОВ В.А. Некоторые алгоритмы отображения логических сетей в вычислительные среды. - В кн.: Вычислительные системы. Программирование на вычислительных средах. (Труды I-й Всесоюзной конф. по вычислительным системам. Новосибирск, июнь, 1967 г.). Вып. 3.Новосибирск, 1968, с. 95-114.

22. СКОРОБОГАТОВ В.А., КОИФМАН А.А. Об одном способе составления программ для вычислительной среды. - В кн.: Вычислительные системы. (Труды симпозиума). Новосибирск, 1967, с. 134-137.

23. БАНДИМАН О.Л. Реализация автоматов в криотронной вычислительной среде. - В кн.: Вычислительные системы. Программирование на вычислительных средах. (Труды I-й Всесоюзной конф. по вычислительным системам. Новосибирск, июнь, 1967). Вып.3. Новосибирск, 1968, с. 126-147.

24. БАНДИМАН О.Л. Методы реализации автоматов в криотронной вычислительной среде. - В кн.: Цифровые модели и интегрирующие структуры. (Труды межвузовской научн. конф. по теории и принципам построения цифровых моделей и цифровых интегрирующих машин. Таганрог, сент., 1968 г.). Таганрог, 1970, с.354-365.

25. БАНДИМАН О.Л. Реализация автоматов в криотронной вычислительной среде по заданному графу состояний. - В кн.: Вычислительные системы. Вып.33.Новосибирск, "Наука", 1969, с.44-56.

26. БАНДИМАН О.Л. Синтез автоматов в криотронной вычислительной среде. - "Автоматика и вычислительная техника", 1972, № 5, с. 20-30.

27. АЧАСОВА С.М. Исследование устойчивости криотронного автомата на ЦВМ. - В кн.: Вычислительные системы. Вып.33. Новосибирск, "Наука", 1969, с. 74-85.

28. АЧАСОВА С.М. Формальный метод записи системы дифференциальных уравнений для криотронных автоматов по их логическому описанию. - В кн.: Вычислительные системы. Вып.40. Новосибирск, 1970, с. 149-161.

29. АЧАСОВА С.М., ФОМЕЛЬ Б.М. Алгоритм исследования устойчивости синхронных автоматов на криотронах. - В кн.: Вычислительные системы. (Материалы ко 2-й Всесоюзной конф. по однородным вычислительным системам и средам. Москва, Секция У). Новосибирск, 1969, с. 110-112.

30. ГУРКО В.Ф. Диагностика неисправности логических схем, реализованных в вычислительной среде. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 47. Новосибирск, 1971, с. 45-56.

31. КОРНЕВ Ю.Н., ПИСКУНОВ С.В., СЕРГЕЕВ С.Н. Алгоритмы обобщенных подстановок и вопросы их интерпретации сетями автоматов и однородными машинами. - "Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика", 1971, № 6. с. 131-142.

32. КОРНЕВ Ю.Н., ПИСКУНОВ С.В., СЕРГЕЕВ С.Н. Микропрограммный однородный процессор, ориентированный на задачи линейной алгебры. - В кн.: Оптимизация. №6 (23). Новосибирск, 1972.

33. СЕРГЕЕВ С.Н. Однородный процессор для обработки сигналов в реальном масштабе времени. - В кн.: Вычислительные системы и среды. (Материалы Третьей всесоюзной конф. по проблеме "Однородные вычислительные системы и среды" 5-8 сентября, 1972 г.). Таганрог, 1972.

34. МАКАРОВ Л.И. Некоторые вопросы синтеза и надежности логических сетей в вычислительной среде. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Новосибирск, 1970, 221 с.

35. МАКАРОВ Л.И., МЕРЕКИН Ю.В. Анализ надежности истинностных логических сетей, реализованных в вычислительной среде. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 33. Новосибирск, 1969, с. 3-9.

36. МАКАРОВ Л.И., МЕРЕКИН Ю.В. Расчет надежности комбинационных схем, реализованных в вычислительной среде. - В кн.: Цифровые модели и интегрирующие структуры. Таганрог, 1970, с. 302-306.

37. КОЛЫМАН А.А., КУЛИН Г.Н., МАКАРОВ Л.И., СКОРОБОГАТОВ В.А. Автоматизированное проектирование устройств логического управления в одномерной вычислительной среде. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 54. Новосибирск, 1973, с.90-111.

38. КОЛЫМАН А.А., МАКАРОВ Л.И., МОСКОВ Б.А., СКОРОБОГАТОВ В.А. Решение о выдаче авторского свидетельства от 15/XI.72 на заявку № 1696388/18-24.

39. КОЛЫМАН А.А., МОСКОВ Б.А., ПАНКОВ А.В., ПОПКОВ В.К., СКОРОБОГАТОВ В.А. Выбор базиса элемента одномерной вычислительной среды. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 54. Новосибирск, 1973, с. 112-118.

40. КОЛЫМАН А.А., МАКАРОВ Л.И., ПАНКОВ А.В., ПОПКОВ В.К., СКОРОБОГАТОВ В.А. Синтез устройств логического управления в одномерной вычислительной среде. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 54. Новосибирск, 1973, с. 119-123.

41. КОЛЫМАН А.А., МАКАРОВ Л.И., МОСКОВ Б.А., НАЗАРОВ Н.И., СКОРОБОГАТОВ В.А. Надежность устройств логического управления в одномерной вычислительной среде. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 54. Новосибирск, 1973, с. 129-138.

42. ГЛУШКОВ В.М., КАПИТОНОВА Ю.В., ЛЕТИЧЕВСКИЙ А.А. Методика проектирования вычислительных машин четвертого и следующих поколений. - "Кибернетика", 1973, №1, с. 1-8.

43. Programmable MOS ROM comes to market. - "Electronics", 1972, vol.45, N 5, p.8E.

44. TUSZYNSKI A. Logic design with programmable arrays. - "EDN", 1972, vol.17, 15 March, N 6, p.46,47.

45. National Announces a Programmable Logic Array. - "Computer", 1973, August, p.38.

46. GORMAN K., KAUFMAN Ph. Low-cost minicomputer opens up many new system opportunities. - "Electronics", 1973, N 12, p.109.

47. ПОПОВ Г.М., ПРАНГИШВИЛИ И.В. Ассоциативный процессор для групповой обработки данных. - "Автоматика и телемеханика", 1972, №1, с. 171-184.

48. КАЛЫНОВ А.В., НИКОЛАЕВ И.А. Однородные цифровые интегрирующие структуры для решения задач математической физики. - "Кибернетика", 1972, №6, с. 1 - 3.

49. BEIL C.G., CHEN R., REGE S. Effect of technology of near term computer structures. - "Computer", 1972, vol.5, III - IV, N 2, p.20-28.

50. СКОРОБОГАТОВ В.А. О распознавании изоморфизма неориентированных графов. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 33. Новосибирск, "Наука", 1969, с. 34-36.

51. АЧАСОВА С.М., БАНДМАН О.Л. Матричные методы синтеза автоматов в универсальных вычислительных средах. - В кн.: Логический синтез в дискретных однородных средах (III Всесоюз. совещание, февраль, 1974 г.). Рязань, 1974, с. 66-69.

52. БАНДМАН О.Л. Алгоритмы оптимального кодирования состояний для матричных методов синтеза автоматов. - В кн.: Логический синтез в дискретных однородных средах. (III Всесоюз. совещание, февраль, 1974 г.). Рязань, 1974, с.69-71.

53. ДЯТЛОВ В.И., БЕЛИН В.И., ШАМАНОВ Ю.М. Оценка схемотехнических параметров элементов вычислительных систем. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 49, Новосибирск, 1972, с. 114-118.

54. ЕРШОВ А.И. Математическое обеспечение четвертого поколения. "Кибернетика", 1973, № 1.

55. АЛЕШЕВ П.А., ПИСКУНОВ С.В., СЕРГЕЕВ С.Н. О проекте системы автоматизированного проектирования в микроэлектронике. "Управляющие системы и машины", 1974, № 2.

Поступила в ред.-изд.отд.

21 марта 1974 года