

УДК 681.31:323

ОДНОРОДНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Э.В.Еврейнов, В.Г.Хорошевский

Авторы ставили целью — отразить состояние работ в теории структур, теории функционирования, моделировании, логическом проектировании, построении и применении однородных вычислительных систем (ОВС) [1,2].

Введение

Развитие средств вычислительной техники диктуется необходимостью решения сложных задач науки, техники, экономики, обороны страны и т.д., а также создания больших автоматизированных систем различного назначения. Ясно, что требования (повышения производительности, надежности, живучести, экономической эффективности и т.д.), которые в настоящее время предъявляются к вычислительным средствам, в полной мере не могут быть удовлетворены, если использовать классические принципы построения электронных вычислительных машин (ЭВМ): последовательное выполнение операций, жесткость и неоднородность структуры.

В начале шестидесятых годов в Институте математики СО АН СССР были начаты исследования в области построения высокоэффективных средств вычислительной техники. В 1962 году формулируется концепция однородных вычислительных систем (ОВС), в основе которой лежат три принципа: параллельность выполнения операций, программируемость структуры и конструктивная однородность.

В настоящее время в разработке проблем построения ОВС участвуют многие коллективы как у нас в стране, так и за рубежом. Работы по созданию ОВС распространились из сферы академических

исследований в промышленность. Так, в 1966 г. вступил в эксплуатацию первый образец одномерной ОВС "Минск-222", в 1971-1973 гг. разработаны двумерные системы "МИНИМАКС" и "СУММА", выпуск которых осваивается промышленностью.

Анализ зарубежных проектов многомашинных вычислительных систем убедительно показывает справедливость принципов, предложенных Институтом математики СО АН СССР. Например, структуры самых мощных в мире систем "СТАР-100" и "ИЛИАК-1У" [3,4] основаны на принципах параллельности и однородности.

Целью данной работы является суммирование результатов исследований по теории и практике построения ОВС по состоянию на начало 1974 года.

§ 1. Функциональные структуры однородных вычислительных систем

ОВС представляет собой совокупность регулярно соединенных друг с другом одинаковых ЭВМ, обладающую возможностью программного изменения своей структуры.

Связь между машинами осуществляется через каналы и систему коммутаций (рис.1 и 2). Система коммутаций образуется из коммутаторов (К), распределенных по машинам ОВС. Коммутатор реализует такой набор соединительных функций, который позволяет организовать связь данной машины по крайней мере с ближайшими соседними. Вид соединительной функции определяется содержанием регистра настройки (РН).

Коммутатор и вычислительная машина, дополненная блоком реализации системных операций (БСО), составляют элементарную машину (ЭМ).

Системные операции позволяют организовать взаимодействие машин в процессе функционирования ОВС. К системным операциям относятся [5]:

- настройка, позволяющая из данной машины изменять содержание регистров настройки любых ЭМ ОВС;
- обмен, с помощью которого осуществляется передача в канал и прием из него необходимого количества слов;

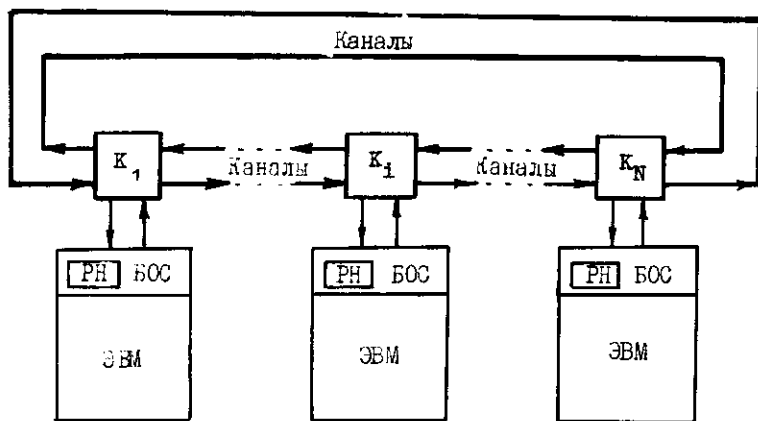


Рис. 1. Одномерная ОВС

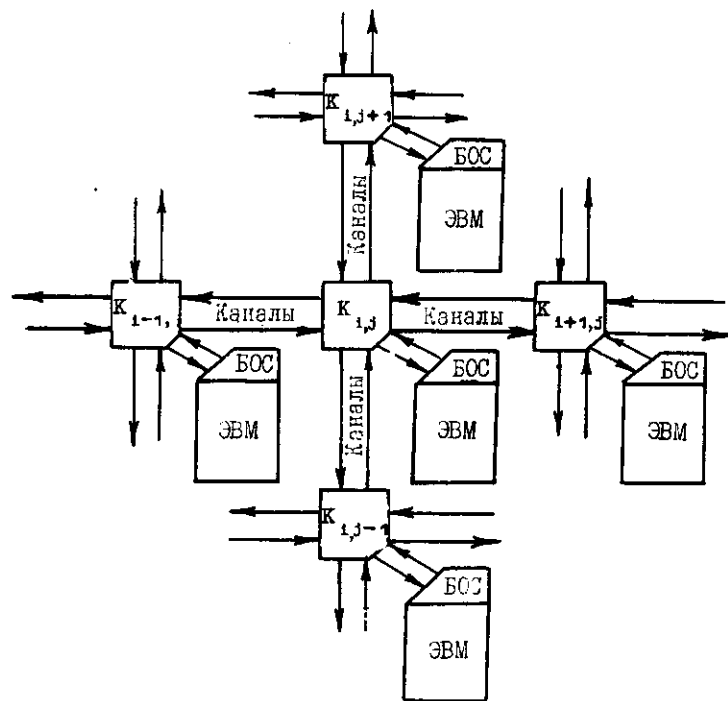


Рис. 2. Фрагмент двумерной ОВС

- обобщенный условный переход, предназначенный для изменения хода вычислительного процесса в зависимости от логического условия, вырабатываемого в заданных ЭМ;

- обобщенный безусловный переход, при помощи которого из любой ЭМ может быть передана любая команда любой ЭМ системы.

§ 2. Свойства ОВС

Однородные вычислительные системы строятся на новых принципах, следствием воплощения которых является следующая совокупность практически важных свойств.

2.1. Параллельность выполнения операций позволяет достичь практически сколь угодно высокой производительности как при решении набора задач произвольной сложности, так и при решении одной задачи с большим числом операций. Задачи представляются параллельными программами с различным числом ветвей в зависимости от их сложности. Значения производительности, емкости памяти, скорости ввода/вывода информации и т.д. определяются числом ЭМ ОВС.

2.2. Переменность структуры означает, что программным способом могут быть организованы такие структуры, которые наиболее адекватны решаемым задачам. Следовательно, переменность структуры приводит к высокой универсальности, при которой достигается заданный уровень производительности при решении широкого класса задач.

Программируемость структуры позволяет реализовать все известные в вычислительной технике режимы функционирования (коллективное пользование, пакетную обработку и др.), способы управления вычислительным процессом (централизованное и децентрализованное и др.) и структурные схемы (изолированные вычислительные машины, системы из нескольких процессоров и одной ЭМ, системы из одной ЭМ и нескольких устройств памяти и т.д.).

Переменность структуры позволяет достичь и заданных значений показателей надежности и живучести. Под надежностью понимается способность программной организации таких структур, которые могут безотказно функционировать в течение заданного времени. Под живучестью понимается свойство программной организации структур, в которых отказы и восстановления любых элемен-

тарных машин не нарушают процесс выполнения параллельных программ сложных задач, а могут лишь изменить время их выполнения. Программируемость структуры существенно расширяет возможность самоконтроля и самодиагностики.

2.3. Конструктивная однородность позволяет резко сократить сроки разработки и изготовления систем, облегчает её техническую эксплуатацию, приводит к высокой технологичности производства и резкому снижению стоимости. Это существенно упрощает процесс взаимодействия машин в системе и позволяет облегчить решение проблемы создания математического (программного) обеспечения ОВС [6].

В силу однородности наращиваемость ОВС осуществляется посредством подключением дополнительных ЭМ без конструктивных изменений в первоначальном ее составе. При этом математическое обеспечение настраивается (программно) на заданное число ЭМ в системе. Благодаря этому обеспечивается совместимость вычислительных средств для различных уровней большой системы.

Указанные принципы позволяют заметно ослабить зависимость между ростом производительности ОВС и увеличением трудностей их проектирования и изготовления и в особенности создания математического обеспечения. При этом открывается возможность построения мощных вычислительных систем при существующей физико-технологической базе (включая ОВС из серийных ЭМ).

Мы привели далеко не полный перечень свойств ОВС. Однако и эти свойства уже позволяют отнести последние к вычислительным средствам четвертого поколения.

§3. Теория структур

Основные результаты в области теории структур ОВС (включая синтез на макроструктурном [5] и микроструктурном [7,8] уровнях) относятся к 1965 году и содержатся в [2].

Дальнейшее развитие теории структур ОВС потребовало математически формализовать понятие однородная макро-структура. Конкретизировать понятие однородности можно, задав некоторые условия и потребовав, чтобы какие-либо свойства макроструктуры при этих преобразованиях не изменились. Так, в [9] предлагается считать K -однородными такие макроструктуры, в которых множество элементов (в частности, ЭМ) может быть разбито на непересекающиеся классы, а связи меж-

ду ЭМ описываются некоторыми отображениями одних классов в другие, так что соединение двух ЭМ разных классов влечет соединение других двух ЭМ тех же классов. Далее, требуя сохранения свойства K -однородности при удалении отдельных элементов структуры, можно сформулировать понятие устойчивой K -однородности и рассматривать различные структуры с точки зрения близости к этому идеалу [9].

В работе [10] потребована независимость параллельной программы от места ее расположения в системе. Отсюда, как и в теории вычислительных сред [8,11], немедленно вытекает, что однородной может считаться макроструктура, обладающая транзитивной группой автоморфизмов, сохраняющей от-метки (качественные характеристики) линий связей между ЭМ. Образующие группы χ автоморфизмов макроструктуры могут быть выбраны так, что диаграмма Кэли для этой группы будет в точности соответствовать информационному графу. При этом условия группы χ является математической моделью графа связей ОВС, а макро-структура называется структурой χ . Ясно, что предложенное в [12] понятие однородной эквипотенциальной сети вкладывается в эту модель.

Рассмотрен специальный класс структур (КАИС-структуры), обладающий:

- 1) конечной абелевой группой автоморфизмов;
- 2) изотропностью (неразличимостью) связей, дающей возможность пропускать одну и ту же информацию по любым направлениям;
- 3) симметричностью (двунаправленностью) линий связи.

Эти свойства обеспечивают функциональную гибкость структуры и несложность ее настройки на конкретные виды соединений. Алгоритм прокладки путей, предложенный в [13], пригоден для любой КАИС-структуры.

Выделены [14] простейшие КАИС-структуры, которые могут быть описаны параметрически и обладают особенно удобными для управления и программирования свойствами. К простейшим относятся E_n -графы (и в частности, P_n -графы, исследованные еще в [15,16]), задаваемые прямыми произведениями циклических групп, и D_n -графы, группы автоморфизмов которых изоморфны циклической группе. Примером D_n -графа является структура квадранта "ИЛИАК-1У" [3], которую можно параметрически описать систе-

мой чисел $\{64; I; 8\}$, где 64 – число элементов обработки информации, I и 8 – расстояние между соединенными элементами в некоторой наперед заданной нумерации.

Предложен простой способ перебора всех классов изоморфизма двумерных D_n -графов, применимый вручную при числе ЭМ до 10^2 . Исследованы [13] свойства абсолютной и относительной агрегации элементов в простейших КАИС-структурах.

С целью выявления критериев отбора лучших КАИС-структур были исследованы характеристики структурной живучести: функция структурной живучести и добротность. Функцией структурной живучести [10] называется вероятность $P(v, r, p_k, p_c)$ того, что в структуре v существует подсистема ранга (мощности) r при коэффициентах готовности p_k и p_c соответственно коммутаторов и линий связи. Добротность есть вероятность $Q\{P(v, r) \geq P_{\min}\}$ при произвольных p_k и p_c , где $P_{\min}$ – порог осуществимости подсистемы ранга r . Моделирование [10] показало, что наибольшей живучестью при заданной размерности обладают структуры минимального диаметра (диаметр – максимальная длина кратчайшего пути, соединяющего любые два элемента структуры). Небезынтересно отметить, что с этой точки зрения для одного квадранта "ИЛИАК-IV" лучшим является D_n -граф $\{64, 3, 8\}$, имеющий меньший диаметр и почти не отличающийся от принятого по другим свойствам.

Естественно обобщается на КАИС-структуры и введенное в [15] понятие m -коммутируемости ОВС. Структура m -коммутируема, если вероятность $K(m)$ одновременного соединения m непересекающихся подсистем не меньше некоторого порога осуществимости $K_{\min}$. При $K_{\min} = 1$ получается мера, предложенная в [15], а структура называется строго m -коммутируемой.

В [17] разработана программа перебора всех классов изоморфизма КАИС-структур и выбора оптимальных структур произвольной размерности. Составлен каталог оптимальных структур.

Результаты теории структур оказали сильное влияние на выбор топологии вычислительных систем, осваиваемых в настоящее время промышленностью.

Использование потенциальных возможностей однородных вычислительных систем в значительной мере зависит от того, как организовано их функционирование, то есть как осуществляется процесс решения задач. Следовательно, наряду с монопрограммным режимом [6] требовалось рассмотреть мультипрограммные и для них предложить эффективные алгоритмы функционирования ОВС [18].

В зависимости от характера поступления задач выделяются два мультипрограммных режима [19]: решение набора задач и обслуживание потока задач. "Аналогами" данных режимов являются режимы пакетной обработки и разделения времени мощных ЭВМ третьего поколения. Однако режимы работы ОВС можно назвать "аналогами" лишь условно.

В самом деле, если пакетная обработка организует совмещения на уровне операций, принадлежащих различным программам задач и реализуемых несколькими устройствами одной ЭВМ, то режим решения набора задач осуществляет совмещения и на уровне целых программ, которые выполняются программно настроенными подсистемами, состоящими из различного числа ЭМ ОВС.

Режим разделения времени, как правило, используется в ЭВМ коллективного пользования. В этом режиме каждому пользователю отводится квант машинного времени в соответствии с принятыми (и обычно детерминированными) правилами. Режим обслуживания потока задач является основным для ОВС коллективного пользования. Однако, в отличие от ЭВМ коллективного пользования, в ОВС должно быть использовано не только разделение времени, но и "разделение машин" в соответствии со стохастическими правилами, обеспечивающими оптимальное функционирование. (Характер поступления задач и их параметры случайны, следовательно, и спрос на различные мощности и конфигурации подсистем ОВС также случаен.)

4.1. Решение набора задач. Имеется множество $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ элементарных машин, образующих ОВС, и множество $I = \{I_1, I_2, \dots, I_L\}$ независимых задач. Каждая задача характеризуется рангом (т.е. числом параллельных ветвей в ее программе), временем решения и величиной штрафа за задержку ее решения на единицу времени. Требуется построить алгоритмы

функционирования ОВС, при помощи которых можно было бы получить (суб)оптимальные значения целевых функций: времени решения задач на ОВС или штрафа за задержку их решения.

Показано, что данная задача принципиально может быть решена методом математического программирования [20]. Практическое применение полученных алгоритмов ограничено из-за их трудоемкости. Эти алгоритмы могут найти применение лишь там, где не требуется оперативного диспетчирования [21].

Было разработано семейство [18-27] точных, эвристических и стохастических алгоритмов функционирования ОВС. В результате статистической обработки информации, полученной при машинном моделировании алгоритмов, установлено, что они в отличие от алгоритмов математического программирования, эффективно реализуются на ОВС и ЭВМ. Разработанные алгоритмы обеспечивают удовлетворительное для практики качество распределения задач и используются при построении операционных систем создаваемых ОВС.

4.2. Обслуживание потока задач. Анализ эффективности функционирования ОВС, в частности, может быть выполнен при помощи методов теории массового обслуживания. В результате анализа вырабатываются рекомендации [28] по организации работы ОВС. Ясно, что такой подход тесно связан с проблемой осуществимости решения задач на ОВС [29-31].

Показано [19, 32, 33], что для организации стохастически оптимального функционирования ОВС при обслуживании потока задач целесообразно применять методы теории игр и стохастического программирования.

Игровые методы используются тогда, когда поток задач управляем (когда допустимы его преобразования). Решены четыре игровых задачи.

Игра I формулируется следующим образом. Имеется вычислительный центр (ВЦ), который эксплуатирует ОВС из n ЭМ. Считается, что ВЦ использует чистую стратегию с номером $i \in E_0 = \{0, 1, \dots, n\}$, если он для решения задач отводит i машин.

На ВЦ поступает поток задач различных рангов. Предполагается, что интенсивность потока такова, что имеется конечная очередь задач. Путем применения соответствующего алгоритма из задач очереди формируются пакеты рангов $j \in E_0$ с суммарным временем решения, равным единице. В дальнейшем под задачами подразумеваются такие пакеты.

Существует диспетчер, который в дискретные моменты времени назначает на ОВС задачи различных рангов. Считается, что диспетчер применил чистую стратегию $j \in E$, если для решения назначена задача ранга j .

Найдены формулы для элементов матрицы платежей $\|c_{ij}\|$, где i, j — чистые стратегии соответственно ВЦ и диспетчера. Сформулировано [32] необходимое и достаточное условие того, что $\|c_{ij}\|$ не имеет седловых точек.

Оптимальные смешанные стратегии ВЦ и диспетчера отыскиваются стандартно. Алгоритм функционирования ОВС содержит два случайных "механизма", которые обеспечивают выполнение оптимальных смешанных стратегий.

В игре I предполагается, что надежность ОВС позволяет ВЦ назначать для решения задач столько ЭМ, сколько их требуется в соответствии с оптимальной смешанной стратегией. В игре II это ограничение снято, т.е. считается, что задано распределение вероятностей состояний $P = \{P_k\}$ (P_k — вероятность того, что в стационарном режиме в системе имеется $k \in E_0$ исправных ЭМ). Допускается также, что если ОВС находится в состоянии $k \in E_0$, то ВЦ в соответствии с некоторым законом может отвести для решения задач $0 \leq i \leq k$ машин. Остальные условия игр I и II совпадают. Доказаны теоремы, устанавливающие взаимосвязь между ними игр I и II.

Третья и четвертая игровые задачи обратны первой и второй. В третьей по заданной смешанной стратегии ВЦ и матрице платежей отыскивается оптимальная смешанная стратегия диспетчера. В четвертой строится такая матрица платежей, для которой любые смешанные стратегии ВЦ и диспетчера превращаются в оптимальные.

В случае неуправляемого потока задач (когда диспетчер не может влиять на поток) проблема организации функционирования ОВС решается при помощи стохастического программирования.

Поставлены стохастические задачи распределения сервисных программ между оперативной и внешней памятью и разбиения сосредоточенной ОВС на подсистемы в зависимости от спросов, задачи организации функционирования как сосредоточенных, так и распределенных ОВС коллективного пользования (с произвольным числом терминалов).

Вычислительные трудности при решении теоретико-игровых задач и задач стохастического программирования несущественны, так как последние для заданной ОВС и статистики спросов решаются только один раз. Кроме того, решения могут быть найдены при помощи исследуемой ОВС.

Полученные результаты позволяют оптимизировать использование ресурсов ОВС. Кроме того, они доказывают, что проблема создания операционных систем для ОВС не сложнее, чем для мощных ЭВМ третьего поколения, работающих в мультипрограммных режимах.

§ 5. Надежность и живучесть ОВС

Специфичность понятий "надежность" и "живучесть" ОВС потребовала их детальных исследований [34-42]. Предстояло разработать набор показателей надежности и живучести [34], который бы достаточно полно характеризовал качество функционирования ОВС в переходном и стационарном режимах, а также нетрудоемкие методы их расчета. Нужно было ответить на вопрос: могут ли при современной технической базе системы, состоящие из $10-10^3$ машин, иметь высокий уровень надежности и живучести?

Трудности исследования обусловлены тем, что не существует достаточно полного и обоснованного набора показателей надежности и живучести как для больших систем вообще, так и для вычислительных машин в частности. Кроме того, методы, используемые в теории надежности систем, достаточно трудоемки. Как правило, они практически позволяют анализировать при помощи вычислительной машины системы, состоящие из незначительного количества элементов. Трудности еще более увеличиваются при расчете вероятностных характеристик для переходного режима функционирования систем.

5.1. Ж и в у ч и м и [35] называются такие однородные вычислительные системы, производительность которых для каждого состояния $k \in E = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ определяется по формуле

$$\Omega(k) = A_k \Delta(k-n) \varphi(k, \omega), \quad (5.1)$$

где A_k - коэффициент; N - число ЭМ ОВС; n - значение нижней границы (минимальное число исправных ЭМ в системе, при котором ее производительность не менее заданной, $n \neq 0, n \in E$);

$\Delta(k-n)=1$ при $k \geq n$ и $\Delta(k-n)=0$ при $k < n$; ω - быстродействие одной ЭМ (номинальное, или эффективное, или среднее эффективное [2]); $\varphi(k, \omega)$ - неубывающая функция от k и ω .

Живучие ОВС предназначены для решения таких сложных задач, для которых составлены универсальные программы. (Эти программы могут автоматически настраиваться на число исправных ЭМ ОВС.) Показано [33], что для переходного режима достаточно полный набор показателей качества функционирования живучих ОВС образуют: вектор-функция $\vec{N}(t)$ живучести ОВС, вектор-функция $\vec{M}(t)$ занятости восстанавливающей системы (ВС), вектор-функция готовности $\vec{S}(t)$, надежности $\vec{R}(t)$ и восстанавливаемости $\vec{U}(t)$ ОВС, вектор-функция $\vec{F}(t)$ осуществимости решения задач на ОВС.

По определению [36],

$$\vec{N}(t) = \{N_i(t)\}, \quad N_i(t) = \mathcal{N}_i(t)/N, \quad i \in E, \quad (5.2)$$

где $\mathcal{N}_i(t)$ - математическое ожидание числа исправных ЭМ в момент времени $t \geq 0$ при условии $\mathcal{N}_i(0) = 1$.

$$\vec{M}(t) = \{M_i(t)\}, \quad M_i(t) = \mathcal{M}_i(t)/m, \quad i \in E, \quad (5.3)$$

где m - число восстанавливающих устройств (ВУ); $\mathcal{M}_i(t)$ - среднее число занятых ВУ в момент времени $t \geq 0$ при условии, что $\mathcal{M}_i(0) = 1$.

$$\vec{S}(t) = \{S_k(t)\}, \quad S_k(t) = P\{\Omega(t) \geq A_k \cdot \varphi(k, \omega)\}, \quad (5.4)$$

$$k \in E_1 = \{n, n+1, \dots, N\}, \quad E_1 \subset E,$$

где $P\{\Omega(t) \geq A_k \cdot \varphi(k, \omega)\}$ - вероятность того, что при условии $\mathcal{N}_i(0) = 1, i \in E$, производительность $\Omega(t)$ системы в момент времени $t \geq 0$ не менее $A_k \cdot \varphi(k, \omega)$.

Вектор-функция надежности ОВС

$$\vec{R}(t) = \{R_k(t)\}, \quad R_k(t) = P\{\Omega(\tau) \geq A_k \cdot \varphi(k, \omega)\}, \quad k \in E_1, \quad (5.5)$$

при условии, что $\mathcal{N}_i(0) = 1 \geq k$, а вектор-функция восстанавливаемости

$$\vec{U}(t) = \{U_k(t)\}, \quad U_k(t) = 1 - P\{\Omega(\tau) < A_k \cdot \varphi(k, \omega)\} \quad (5.6)$$

при условии $\mathcal{N}(0) = 1 < k$; τ - любой момент времени, принадлежащий промежутку времени $[0, t)$.

Итак, показатели (5.4)-(5.6) устанавливают взаимосвязь между надежностью и потенциально возможной производительностью ОВС.

Далее, вектор-функция осуществимости решения задач на ОВС определяется [31] как

$$\vec{F}(t) = \{F_k(t)\}, F_k(t) = 1 - P\{\xi_k > t\}, k \in E_1, \quad (5.7)$$

где ξ_k — случайная величина, являющаяся моментом решения сложной задачи на k не абсолютно надежных ЭМ ОВС. Вектор-функция $\vec{F}(t)$ позволяет оценить качество функционирования ОВС с учетом её надежности и вероятностных свойств решаемых задач.

Предельные значения показателей (5.2) — (5.7) при $t \rightarrow \infty$ характеризуют надежность ОВС в стационарном режиме.

Доказано [36], что существуют предельные значения показателей (5.2), (5.3) при $t \rightarrow \infty$, и они отличны от нуля для восстанавливаемых систем. Однако самым распространенным показателем для стационарного режима функционирования систем является вектор-коэффициент готовности [37-39]

$$\vec{S} = \{S_k\}, S_k = \lim_{t \rightarrow \infty} S_k(t), k \in E_1, \quad (5.8)$$

компоненты которого не зависят от начального состояния системы, то есть от числа исправных ЭМ в момент времени $t = 0$.

Поскольку справедливо *

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R_k(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} U_k(t) = 1, k \in E_1,$$

то для получения более полной информации о функционировании ОВС используются [41] стационарные вектор-функции надежности $R^*(t)$ и восстановимости $U^*(t)$. При определении стационарных вектор-функций учитывается, что стационарный режим характеризуется распределением вероятностей состояний системы $\{P_j\}$, $P_j \neq 0, j \in E$, тогда как переходный — фиксированным начальным состоянием ОВС.

Таким образом, живучие ОВС имеют переменную структурную избыточность, а программы задач, предназначенные для выполнения на данных системах, — информационную избыточность. При скачкообразном изменении структурной избыточности задачу удается решить благодаря информационной избыточности ее программы. Это сокращает время решения сложной задачи.

* Следует заметить, что условием, при котором величина $R_k(t)$, $k \in E_1$, при $t \rightarrow \infty$ будет сколь угодно близка к единице, является логарифмический во времени рост числа N [40].

5.2. В классе систем со структурной избыточностью может быть достигнут практически любой уровень надежности.

Однородные вычислительные системы, производительность которых для каждого состояния $k \in E$ определяется по формуле

$$\Omega(k) = A_n \cdot \Delta(k - n) \cdot \varphi(n, n), \quad (5.9)$$

называются системами со структурной избыточностью [34]; в общем случае $A_n \neq A_k$ при $n \neq k$.

В такой системе имеются программно организованные основная подсистема из n машин и подсистемы, подчиненные основной, из $(N - n)$ ЭМ. На последние возлагается выполнение вспомогательных функций по переработке информации. Функции отказавшей элементарной машины основной подсистемы может взять не себя любая исправная ЭМ любой подчиненной подсистемы.

Системы со структурной избыточностью предназначены для выполнения программ, рассчитанных на фиксированное число машин.

Следует заметить, что в класс ОВС со структурной избыточностью, по-видимому, могут быть вложены известные схемы резервирования (на уровне основных элементов). Ближе всего к рассматриваемым находятся системы с нагруженным (горячим) резервом. Поэтому ряд результатов по теории резервирования может быть перенесен на системы со структурной избыточностью. Однако при этом необходимо, чтобы используемые стохастические модели были достаточно адекватны системам со структурной избыточностью. Кроме того, методы расчета показателей надежности не должны быть трудоемкими и должны допускать анализ ОВС, состоящих из большого числа ЭМ.

Видно, что (5.9) является частным случаем (5.1). Следовательно, системы со структурной избыточностью можно рассматривать как подкласс живучих ОВС. Если это так, то определения показателей надежности вычислительных систем со структурной избыточностью очевидны: вместо вектор-функций готовности, надежности, восстановимости и осуществимости должны быть взяты соответствующие функции.

Количество машин структурной избыточности для рассматриваемого подкласса ОВС изменяется программно, но для каждой сложной задачи оно постоянно. Программа задачи имеет фиксированный объем информационной избыточности, которая используется для того, чтобы исправная ЭМ структурной избыточности мог-

ла взять на себя функции отказавшей ЭМ основной подсистемы. Информационная и структурная избыточности, не уменьшая времени решения задачи на основной подсистеме, увеличивают надежность ОВС.

5.3. При расчете показателей качества функционирования ОВС (5.2) – (5.8) строятся стохастические модели. Для построения достаточно адекватных моделей необходимо знать законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления элементарной машины. С этой целью был собран статистический материал по эксплуатации ЭВМ (в том числе и ЭМ системы "Минск-222"). В результате статистической обработки было установлено, что для элементарной машины гипотезы об экспоненциальных законах распределения времени безотказной работы и времени восстановления ЭМ не противоречат опытным данным [37].

Стохастические модели [40] функционирования ОВС не должны приводить к сложным методам расчета показателей, поэтому используются:

1) новые достаточно адекватные стохастические модели, которые приводят к простым расчетным формулам [36];

2) классические модели систем в совокупности с методами приближенных вычислений [42].

Первый подход достаточно эффективен при расчете математических ожиданий различных случайных функций, например (5.2), (5.3). Он заключается в составлении, как правило, систем линейных дифференциальных уравнений первого порядка непосредственно для математических ожиданий. Решение таких систем уравнений при заданных начальных условиях не представляет особого труда. Числовые значения показателей могут быть получены по выведенным формулам даже вручную.

Второй подход достаточно эффективен при расчете координат вектор-функций (5.4) – (5.7) и позволяет исследовать ОВС, состоящие из $N \leq 10^3$ ЭМ, даже при помощи ЭВМ малой производительности. Он заключается в следующем [40]. Составляются дифференциальные уравнения для вероятностей состояний системы с учетом подмножества поглощающих состояний; задаются начальные условия; система дифференциальных уравнений при помощи преобразования Лапласа сводится к алгебраической; по правилу Крамера определяется решение алгебраической системы уравнений, причем решение выражается через полиномы, вычисляемые рекуррентно;

доказываются свойства корней полиномов, позволяющие приближенно вычислять их значения; после обращения преобразования Лапласа выписываются формулы для показателей качества функционирования ОВС; для получения числовых значений показателей составляются программы на одном из алгоритмических языков.

Исследование показателей надежности и производительности ОВС, проведенное с учетом методов программирования и физико-технологической базы, показало, что заданный уровень надежности ОВС высокой производительности может быть достигнут, в частности, если их программно организовывать по принципам либо живучих систем, либо систем со структурной избыточностью. Структурная избыточность (в первом случае переменная, а во втором постоянная) не превышает десятой части числа ЭМ в системе ($N - n \leq 0,1N$). Рассматриваемые принципы организации ОВС не допускают простаивания исправных ЭМ.

Итак, полученные результаты решают проблему оценки качества функционирования ОВС с точки зрения надежности (живучести) и производительности (осуществимости), а также позволяют организовать стохастически оптимальную эксплуатацию ОВС. Результаты работ [20–31, 33–42] составляют основу таких разделов теории функционирования, как потенциальная надежность и живучесть ОВС, осуществимость решения задач на ОВС.

§6. Экономическая эффективность функционирования ОВС

Экономическая эффективность [43] является одним из разделов теории функционирования ОВС. Здесь изучается взаимосвязь между показателями стоимости и производительности [44] или надежности ОВС [45].

Результаты по "экономичности" ОВС, содержащиеся в [44], основываются на технологических кривых для ЭВМ. В частности, в [44] выведены условия, при которых ОВС всегда экономичнее ЭВМ в диапазоне высокой производительности ($10^7 - 10^9$ опер/сек).

В [36, 46, 47] в качестве показателей, характеризующих экономическую эффективность функционирования ОВС, предлагается использовать вектор-функции:

$$\vec{\Gamma}(t) = \{\Gamma_i(t)\}, \quad \vec{D}(t) = \{D_i(t)\}, \quad i \in N.$$

Координатой $\Gamma_i(t)$, $i \in E$, является математическое ожидание потерь к моменту времени $t \geq 0$ из-за простоев отказавших ЭМ ОВС и восстанавливаемых устройств при условии, что в начальный момент времени было исправно i машин, т.е. $\Gamma_i(0) = 1$. Компонентой $D_i(t)$, $i \in E$, является математическое ожидание дохода, приносимого системой к моменту времени $t \geq 0$, если $\Gamma_i(0) = 1$.

Выведены расчетные формулы [36,46] для координат $\vec{\Gamma}(t)$, как функций N, m , а также λ — интенсивности потока отказов в машине, μ — интенсивности восстановления отказавших ЭМ одним ВУ, c_1 — стоимости эксплуатации ЭМ, c_2 — стоимости содержания одного ВУ в единицу времени. Получены формулы [36,47] для расчета компонент вектор-функции $\vec{D}(t)$, учитывающие $N, m, \lambda, \mu, c_1, c_2$; c'_2 — себестоимость содержания одного восстанавливающего устройства, c_3 — стоимость запасных деталей, расходуемых при однократном восстановлении ЭМ, c_4 — стоимость, характеризующую постоянные издержки эксплуатации ЭМ в единицу времени. Приведены числовые значения для $\vec{\Gamma}(t)$ и $\vec{D}(t)$, отражающие временное состояние вычислительной техники.

Изучено поведение $\vec{\Gamma}(t)$ и $\vec{D}(t)$ при $t \rightarrow \infty$. При этом решены задачи о минимизации эксплуатационных расходов и максимизации прибыли (среднего дохода, приносимого в единицу времени при длительной работе ОВС).

Установлено, что для ОВС средней и высокой производительности при расчете значений m , близких к оптимальным, достаточно воспользоваться формулой:

$$m = \left\lfloor \frac{N\lambda}{\lambda + \mu} \left[+ \right] 0,01 \cdot N \right\rfloor ,$$

где $\lfloor x \rfloor$ — ближайшее к x целое число, $\lfloor x \rfloor \geq x$.

Доказано, что для ОВС доход существенно превышает эксплуатационные расходы. Это остается справедливым и для ОВС, построенных на базе ЭВМ второго поколения, надежность которых низка.

Результаты работ [36, 43 — 47] дают возможность анализировать экономическую эффективность функционирования ОВС с произвольно большим числом элементарных машин. Они позволяют также организовать экономически эффективную эксплуатацию ОВС.

§7. Моделирование ОВС

Одновременно с разработкой теории структур, теории функционирования ОВС осуществлялась программа создания средств моделирования систем. Цель программы — создание эффективного инструмента анализа структур и характеристик потенциальной эффективности ОВС, имитации алгоритмов функционирования ОВС, обработки программного обеспечения и проектов ОВС и т.п.

В [48] предложен базовый (растущий) язык моделирования Р-ЛЯПАС, который позволяет наращивать возможности моделирующей системы и накапливать опыт моделирования. Р-ЛЯПАС является двухуровневым языком. Первый уровень есть расширение соответствующего уровня ЛЯПАСа, которое обеспечивает естественную запись операций над булевыми векторами произвольной размерности (в пределах разрядности ЭВМ) и над их частями, а также описание коммутаторов ЭМ. Второй уровень предназначен для расширения системы моделирования методом блочно-иерархического программирования и содержит, в частности, изобразительные средства описания параллельных процессов [49].

Разработана и внедрена [50] моделирующая система ПС-Р-ЛЯПАС для ЭВМ "Минск-22". Она состоит из операционной, сервисной частей и архивов: оперативного — для входных заказов и постоянного — для накопления подпрограмм. Операционная часть обеспечивает реализацию заказов программиста, а сервисная — его манипуляции с системой в период отладки программ и при расширении программирующей системы. Большая часть ПС-Р-ЛЯПАС написана на языках ЛЯПАС и Р-ЛЯПАС и параметрически настраивается на конкретную ЭВМ или ОВС. Следовательно, для развертывания системы требуется только транслятор с первого уровня ЛЯПАСа (2000-3000 команд) и программа загрузки.

Описанные средства моделирования использованы для решения конкретных проблем. Так, например, автоматизирован перебор групп автоморфизмов КАИС-структур и синтез оптимальных структур ОВС [17]. Модифицированным методом Монте-Карло [51] исследованы характеристики живучести различных структур ОВС [10]; детально изучена модель ОВС, являющаяся замкнутой системой массового обслуживания со взаимодействием между абонентами (машинами) [52].

§ 8. Логическое проектирование ОВС

Логическое проектирование ОВС, предшествующее техническому, основывается на работах [2,5,8] и результатах теории структур. Однако для обеспечения функциональной гибкости создаваемой ОВС важную роль играют результаты работ [13,53 - 55], относящиеся к логическому проектированию.

Так, в работе [13] рассматривается организация относительной адресации ЭМ в ОВС. При этом способе адресации физическая конфигурация пути связи между двумя ЭМ определяется в процессе его формирования, причем если имеется хотя бы одна возможность связи этих ЭМ, то она обязательно реализуется.

Работы [13,53,54] посвящены синхроннопрограммному режиму функционирования ОВС. Особенностью этого режима является то, что программа, хранимая и выдаваемая покомандно в каналы связи одной машиной, выполняется одновременно множеством ЭМ. Оцениваются [54] возникающие при этом потери времени, и предлагаются решения для осуществления циклических участков программ.

Реализация мультипрограммных режимов потребовала разработки устройства для синхронизации работы различных пересекающихся в пространстве подсистем и устройств прерывания [55].

Ясно, что вычислительная среда [8] является весьма гибким вычислительным средством. Однако для ее практического применения необходимо "обрамление", которое обеспечило бы ввод/вывод в нее настроечной и логической информации. Поэтому были предложены структуры систем на основе вычислительных сред и ОВС. Рассмотрена система из вычислительной среды и памяти, в которой достигается высокая степень специализации функций основных компонентов (вычислительная среда служит для построения обрабатываемых структур, а память - для хранения информации и связи с внешним миром).

Результаты работ по логическому проектированию нашли воплощение в нескольких реализованных проектах ОВС.

§ 9. Проекты ОВС

При создании высокоэффективных ОВС исключительно важным этапом является построение вычислительных систем на базе серийно выпускаемых ЭВМ.

ОВС из серийных ЭВМ, как правило, относятся к системам малой и средней производительности [56] и позволяют достичь достаточно высоких значений показателей надежности и живучести [40], которые не доступны современным вычислительным средствам третьего поколения.

Такие ОВС могут рассматриваться как физические модели вычислительных систем высокой производительности. Они позволяют отработать математические и инженерные методы функциональной организации ОВС, установить эффективность функционирования ОВС при решении задач, накопить опыт по параллельному программированию и построению математического обеспечения ОВС и т.д.

Кратко опишем следующие проекты:

- ОВС "Минск-222";
- управляющей линейной однородной вычислительной системы;
- ОВС на основе единой системы (ЕС) ЭВМ;
- распределенной вычислительной системы на базе ЭВМ "Минск-32";
- вычислительных систем "МИНИМАКС" и "СУММА".

9.1. "Минск-222" [57-60] является первой однородной вычислительной системой (с программируемой структурой). Эта система была разработана Институтом математики СО АН СССР совместно с конструкторским бюро завода им. Г.К.Орджоникидзе (г. Минск). Работы по проектированию ОВС "Минск-222" были начаты в 1965 году, а первый образец был установлен в апреле 1966 года в Институте математики АН БССР.

По своей структуре ОВС "Минск-222" относится к одномерным (рис.1). Элементарная машина строится на основе ЭВМ "Минск-2/22". Число ЭМ в системе - произвольное в пределах от 1 до 16. Стоимость системных устройств не превышает 1% стоимости группы объединяемых ЭВМ. В качестве входных языков для ОВС "Минск-222" использованы АКИ, ЛЯПАС и АЛГОЛ, которые расширены средствами для описания взаимодействий между параллельными ветвями вычислений. Отношение объема добавляемой системной части к общему для трансляторов с АКИ и ЛЯПАС составляет 0,1, а для транслятора с АЛГОЛа (ТАМ-2/22) - всего лишь 0,025. Экспертные оценки показали, что сложность программирования для ОВС "Минск-222" (по сравнению со сложностью программирования для одной ЭВМ) возрастает на 10-20%, а при развитой библиотеке стандартных параллельных программ - на 5-10%.

Вычислительные системы "Минск-222" в течение многолетней эксплуатации в различных организациях показали высокую эффективность [61] при решении широкого круга задач средней сложности. Экспериментально доказано, что доля затрат времени на системные взаимодействия (включая и синхронизацию [62]) составляет несколько процентов. Кроме того, выяснилось, что за счет больших объемов оперативной памяти в "Минск-222" по сравнению с "Минск-32" и за счет высокого быстродействия каналов связи получается дополнительный значительный выигрыш во времени решения задач на ОВС.

Опыт проектирования, математической и технической эксплуатации "Минск-222" был использован в последующих проектах ОВС.

9.2. Однородная вычислительная система для управления научно-техническими экспериментами [55, 63, 64] спроектирована в 1964-1968 гг. в Институте математики СО АН СССР. Эта система относится к одномерным и имеет программно изменяемую структуру. Она может состоять из 18 ЭМ, каждая из которых имеет быстродействие 4500 опер/сек, емкость памяти до 32000 24-разрядных слов, коммутатор связи с внешними объектами, устройство прерывания, часы и др. Элементарные машины, реализованные на пороговых элементах, не являются серийными, однако они обладают многими свойствами современных мини-машин. Система из двух машин эксплуатируется в Алтайском политехническом институте.

9.3. ОВС на основе технических и программных средств ЭВМ "ЕС-1060" создается промышленностью при участии Института математики СО АН СССР. Структура ОВС - одномерная (рис. 1), число машин в системе не фиксировано. Работы выполняются с 1972 года; в 1975 году планируется построить опытный образец системы, имеющий развитое программное обеспечение.

9.4. Распределенная ОВС [65-67] на базе ЭВМ "Минск-32" разработана Новосибирским электротехническим институтом МВ и ССО РСФСР, Институтом математики СО АН СССР и промышленными организациями.

Данная ОВС, в отличие от рассмотренных ранее, использует "длинные", одномерные и двунаправленные каналы связи между ЭМ. Задержки в каналах связи существенны, так как ЭМ могут находиться на значительных расстояниях друг от друга.

Работы по созданию ОВС начаты в 1970 году. Экспериментальная система, использующая некоммутируемые двухпроводные каналы связи длиной до 7 км., успешно прошла испытания в 1972 году. Система с коммутируемыми телефонными каналами связи, образуемая из машин г. Москвы и г. Новосибирска, принята в 1973 году. Время решения на системе сложных задач, представленных параллельными программами, не более $n^{-1} \cdot T$, где T - время решения на одной ЭВМ, n - число машин в ОВС.

Логические основы, развитые при создании одномерных ОВС, позволяют строить из произвольного и переменного числа серийных ЭВМ как сосредоточенные, так и распределенные вычислительные системы с программируемой системой коммутаций. Показано, что стоимость системных устройств не превышает 1% стоимости группы объединяемых ЭВМ.

9.5. ОВС "МИНИМАКС" [68, 69] создается Институтом математики СО АН СССР и Научно-производственным объединением "Импульс" (г. Северодонецк). Работы ведутся с 1971 года и находятся в стадии экспериментального производства.

ОВС "МИНИМАКС" строится на основе технических и программных средств АСВТ-М. Число ЭМ в системе - произвольное и неограниченное. В системе имеются как одномерные (рис. 1), так и двумерные (рис. 2) каналы связи между ЭМ. Системное устройство оформляется в виде отдельного модуля и является расширением канала прямого доступа к памяти.

Система программирования включает в себя трансляторы с ОВС-языков (с языков МНЕМОКОД, АЛГОЛ, ФОРТРАН, расширенных операторами системных взаимодействий), системные драйверы, средства сегментации, библиотеку стандартных параллельных подпрограмм, компоненты стандартного программного обеспечения мини-машин и т.д.

9.6. Система "СУММА" [70] создается Институтом математики и одним из машиностроительных заводов. Работы начаты в 1972 году и находятся в стадии экспериментального производства.

ОВС "СУММА" относится к двумерным (рис. 2). Элементарные машины строятся на основе мини-ЭВМ "Электроника-100 (100И)". Число ЭМ в системе - переменное и практически неограниченное. Системное устройство оформляется в виде отдельного модуля.

Программное обеспечение (ПО) создается на базе ПО мини-ЭВМ "Электроника-100" и состоит из системы программирования (ОБС-ассемблеров PAL - III, MACRO - 8, ОБС-языка ФОРТРАН) и операционной системы. Операционная система включает блок для работы в реальном масштабе времени (например, при управлении станков с программным управлением).

Вычислительные системы "МИНИМАКС" и "СУММА" могут обеспечить быстросдействие порядка 10^7 опер/сек и емкость памяти порядка 10^6 байт.

Показано, что принципы, положенные в основу разработок "МИНИМАКС" и "СУММА", позволяют ценой относительно небольших затрат строить двумерные вычислительные системы с программируемой системой коммутаций между машинами. Это обеспечивает, в частности, высокую надежность и живучесть ОБС.

§ 10. Области применения ОБС

Области применения ЭВМ, объединенных в ОБС, существенно расширяются. Это является следствием свойств, перечисленных в §2.

Области применения рассмотренных вычислительных систем конкретизируются составом элементарных машин и возможностями программного обеспечения. Уникальной областью является решение трудоемких задач, т.е. таких задач, которые не могут быть решены (из-за ограничений по времени, емкости памяти и т.д.) на одной ЭВМ, составляющей ядро элементарной машины конкретной ОБС. Трудоемкая задача представляется параллельной программой, получаемой на основе методики крупноблочного распараллеливания [71].

Установлено [2, 61, 72], что для достаточно широкого круга задач существуют параллельные алгоритмы, эффективно реализуемые на ОБС. Здесь следует назвать алгебраические задачи (системы линейных или нелинейных уравнений, операции над матрицами); математическое программирование; обыкновенные дифференциальные уравнения (задачи Коши, граничные задачи для систем линейных или нелинейных уравнений); дифференциальные уравнения в частных производных; численное интегрирование и дифференцирование; статистическое моделирование; информационно-логические задачи; распознавание образов [73, 74]; сложные задачи проектирования в машиностроении (методы машинного представления поверхностей

сложных деталей и агрегатов: интерполирование и сглаживание сплайн-функциями многих переменных) [75-77] и др.

Вычислительные системы из мини-машин "МИНИМАКС" и "СУММА" имеют специфичные области применения: управление научными экспериментами [78]; управление технологическим производством, автоматизация проектных работ, управление станками с программным управлением, работа в составе большой вычислительной системы или сети, реализация функций любой большой (автоматизированной) системы.

Заключение

Итак, в результате исследований, проведенных в 1960-1973 гг. по проблеме "Однородные вычислительные системы":

1) сформулирована концепция ОБС, основанная на принципах параллельности выполнения операций, программируемости структуры, конструктивной и программной однородности;

2) разработаны логические основы построения многомашинных ОБС и элементы теории структур;

3) созданы методы управления вычислительным процессом, обеспечивающие (стохастически) оптимальное функционирование ОБС при обработке наборов задач и обслуживании потока задач;

4) решены проблемы надежности и живучести, осуществимости решения задач, экономической эффективности функционирования многомашинных ОБС;

5) создана программирующая система Р-ЛЯПАС как средство моделирования ОБС;

6) разработаны основы построения ОБС из серийных ЭВМ; показано, что предложенные методы построения одномерных и двумерных ОБС с программно настраиваемой структурой предъявляют минимальные требования к технической реализации и математическому обеспечению и позволяют достичь высоких показателей эффективности;

7) разработаны и внедрены проекты: ОБС "Минск-222", управляющей ОБС, ОБС на основе ЕС ЭВМ, распределенной ОБС из ЭВМ "Минск-32", систем "МИНИМАКС" и "СУММА", komponуемых из мини-машин.

Полученные теоретические и практические результаты убеждают в том, что однородные вычислительные системы являются перспективным направлением построения высокоэффективных средств переработки информации.

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 СО АН СССР, 1962.
2. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, "Наука", 1966.
3. БОУНАЙТ, СЛОТНИК и др. Система "ИЛИАК-IV". - ТИЭР, 1972, т. 60, № 4, с. 36-62.
4. GRANAM W.R. The parallel and the pipeline computers. - "Datamation", 1970, April, p. 68-71.
5. ЕВРЕЙНОВ Э.В. Универсальные вычислительные системы с частично переменной структурой. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 17. Новосибирск, 1965, с. 3-60.
6. КОСАРЕВ Ю.Г., МИРЕНКОВ Н.Н. Математическое обеспечение однородных вычислительных систем. - Настоящий сборник. с. 61-79.
7. ЕВРЕЙНОВ Э.В. О микроструктуре элементарных машин вычислительной системы. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 4. Новосибирск, с. 5-28.
8. ЕВРЕЙНОВ Э.В. Теоретические основы построения универсальных вычислительных сред. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 16. Новосибирск, 1965, с. 3-72.
9. КОСАРЕВ Ю.Г. О структурах вычислительных систем, устойчивых к изменению числа машин. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 42. Новосибирск, 1970, с. 59-73.
10. ВОРОБЬЕВ В.А., КОРНЕЕВ В.В. Некоторые вопросы теории структур однородных вычислительных систем. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.
11. АБРАМОВА Н.А. Однородные логические сети и их группы автоморфизмов. - "Автоматика и телемеханика", 1970, № 11, с. 120-129.
12. АРТАМОНОВ Г.Т. Об одном способе построения однородных эквипотенциальных сетей. - "Техническая кибернетика", 1970, № 6, с. 106-109.
13. ШУМ Л.С. О функциональной организации однородных вычислительных систем. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с. 81-88.
14. ВОРОБЬЕВ В.А. Простейшие структуры однородных вычислительных систем. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.
15. РЕШЕТИЯК Ю.Г. О задаче соединения элементов вычислительной системы. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 3. Новосибирск, 1972, с. 17-30.
16. КРАТКО М.И. Информационные графы. - "Сибирский математический журнал", 1970, т. 11, № 5, с. 1093-1106.
17. КОРНЕЕВ В.В. О макроструктуре однородных вычислительных систем. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.

18. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Алгоритмы функционирования однородных вычислительных систем. - В кн.: Материалы Третьей всесоюзной конференции по проблеме "Однородные вычислительные системы и среды". Таганрог, 1972, с. 17-19.
19. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Об алгоритмах функционирования однородных универсальных вычислительных систем. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с. 3-14.
20. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Об алгоритмах распределения задач по ЭВМ. - В кн.: Труды СФТИ. Вып. 47. Томск, 1965, с. 29-34.
21. МИРЕНКОВ Н.Н. Алгоритмы планирования для диспетчера однородной вычислительной системы. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 42. Новосибирск, 1970, с. 34-46.
22. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Алгоритмы функционирования однородных универсальных вычислительных систем. - "Автоматика и вычислительная техника", 1972, № 3, с. 35-41.
23. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г., ГОЛОСКОКОВА Т.М. Алгоритмы функционирования однородных универсальных вычислительных систем в простейших ситуациях. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с. 15-28.
24. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г., СЕДУХИНА Л.А. Стохастические алгоритмы функционирования однородных вычислительных систем. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 51. Новосибирск, 1972, с. 3-19.
25. СЕДУХИНА Л.А., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Стохастические алгоритмы функционирования однородных вычислительных систем. - "Автоматика и телемеханика", 1973, № 3, с. 121-128.
26. МИРЕНКОВ Н.Н., КРЫЛОВ Э.Г. Алгоритмы планирования функциональных состояний однородной вычислительной системы. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.
27. МИРЕНКОВ Н.Н., ФИШЕРМАН С.Б. Алгоритмы распознавания подсистем заданных структур. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.
28. КОНСТАНТИНОВ В.И., МИРЕНКОВ Н.Н. Функционирование однородной вычислительной системы при наличии приоритетного потока больших задач. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 42. Новосибирск, 1970, с. 47-58.
29. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Об осуществимости решения задач на однородных вычислительных системах. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 51. Новосибирск, 1972, с. 38-47.
30. ПАВСКИЙ В.А. Об осуществимости решения потока простых задач на однородных вычислительных системах. - Там же, с. 48-59.
31. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Показатели осуществимости решения сложных задач на живучих однородных вычислительных системах. - В кн.: Повышение качества, надежности и долговечности промышленных изделий. Материалы семинара и конференции. Л., 1973, с. 23-25.
32. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г., ТАЛДЫНИН Э.А. Теоретико-игровой подход к проблеме функционирования однородных вычислительных систем. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 51. Новосибирск, 1972, с. 20-37.

33. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Исследование функционирования однородных вычислительных систем. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Л., 1973. (ЛЭТИ).

34. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. О двух классах однородных универсальных вычислительных систем. -В кн.: Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Вып. I. Новосибирск, "Наука", 1968, с. 70-84.

35. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Живучие однородные универсальные вычислительные системы. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 34. Новосибирск, "Наука", 1969, с. 71-89.

36. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г., ХОРОШЕВСКАЯ Э.Г., ГОЛОСКОКОВА Т.М. Расчет технико-экономических показателей однородных универсальных вычислительных систем высокой производительности. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с. 36-60.

37. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Некоторые вопросы надежности однородных универсальных вычислительных систем. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 23. Новосибирск, 1966, с. 69-89.

38. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. О надежности однородных универсальных вычислительных систем высокой производительности. -В кн.: Труды симпозиума "Вычислительные системы". Новосибирск, "Наука", 1967, с. 24-31.

39. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Оценка надежности однородных универсальных вычислительных систем с учетом времени переключения. -Там же, с. 13-23.

40. ИГНАТЬЕВ М.Б., ФЛЕЙШМАН Б.С., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г., ШЕРБАКОВ О.Г. Надежность однородных вычислительных систем. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 48. Новосибирск, 1972, с. 16-47.

41. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Надежность однородных универсальных вычислительных систем. -В кн.: Использование избыточности в информационных системах. Труды Второго симпозиума. Л., "Наука", 1970, с. 73-80.

42. ХОРОШЕВСКАЯ Э.Г. Расчет нестационарных функций надежности и восстановимости однородных универсальных вычислительных систем. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 34. Новосибирск, 1969, с. 90-106.

43. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. О надежности, производительности и стоимости информационно-вычислительных систем с программируемой структурой. -В кн.: Проблемы создания больших информационно-вычислительных систем и обработки информации на ЭВМ. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Ч. I. М., 1968, с. 48-51.

44. ШУМ Л.С. Об экономичности однородных вычислительных систем и вычислительных машин. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с. 61-66.

45. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. О надежности и стоимости однородных универсальных вычислительных систем. -В кн.: Известия АН СССР. Вып. 67. Л., 1968, с. 166-172.

46. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Некоторые вопросы стоимости однородных универсальных вычислительных систем. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 31. Новосибирск, 1968, с. 41-54.

47. ХОРОШЕВСКАЯ Э.Г. Влияние показателей вычислительной системы на ожидаемый доход при ее эксплуатации. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с. 29-37.

48. ВОРОБЬЕВ В.А. Р-ЛЯПАС - базовый язык моделирования цифровых устройств. -Там же, с. 67-80.

49. ВОРОБЬЕВ В.А. Моделирование системы параллельных процессов на Р-ЛЯПАСе. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 51. Новосибирск, 1972, с. 82-97.

50. ВОРОБЬЕВ В.А., ПЕТРОВА Э.А. Программирующая система РС-Р-ЛЯПАС. Инструкция по эксплуатации. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.

51. ВОРОБЬЕВ В.А., КОРНЕЕВ В.В. Метод статистических испытаний при исследовании характеристик осуществимости. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.

52. ВОРОБЬЕВ В.А. Коммутируемость и внутренняя эффективность однородной вычислительной системы в одном частном случае. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.

53. ДИМИТРИЕВ Ю.К. О способе реализации ветвящихся программ при работе однородных вычислительных систем в синхроннопрограммном режиме. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.

54. ДИМИТРИЕВ Ю.К. О потерях времени при работе однородной вычислительной системы в синхроннопрограммном режиме. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.

55. ШУМ Л.С., ПОТАПОВА Ю.Н. Система прерывания управляющей однородной вычислительной системы. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с. 119-127.

56. ЕВРЕЙНОВ Э.В. Вычислительные системы малой и средней производительности. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 23. Новосибирск, 1966, с. 5-12.

57. ЕВРЕЙНОВ Э.В., ЛОПАТО Г.П. Универсальная вычислительная система "Минск-222". -Там же, с. 13-20.

58. ЛОПАТО Г.П., ВАСИЛЕВСКИЙ А.Н., ПЫХТИН В.Я., СИДРИСТЫЙ Б.А., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Системное устройство элементарной машины вычислительной системы "Минск-222". -Там же, с. 35-68.

59. ЕВРЕЙНОВ Э.В., ЛОПАТО Г.П., ПЫХТИН В.Я., ВАСИЛЕВСКИЙ А.Н., СИДРИСТЫЙ Б.А., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г., ПРЖИЯЛКОВСКИЙ В.В., СМЕРНОВ Г.Д. Устройство для сопряжения цифровых вычислительных машин. Авт. свид. № 215 596. -В кн.: Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", 1968, № 13.

60. ГУШЕНСКИЙ В.Н., КАВРИД Л.М., КАЗУШКИН В.А., КОСАРЕВ Ю.Г. Усовершенствование системы команд вычислительной системы "Минск-222". -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 42. Новосибирск, 1970, с. 74-80.

61. КОСАРЕВ Ю.Г. О схемах обмена между ветвями параллельных алгоритмов. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 51. Новосибирск, 1972, с. 70-75.

62. КОСАРЕВ Ю.Г., НАГАЕВ С.В. О потерях времени на синхронизацию в однородных вычислительных системах. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 24. Новосибирск, 1967, с. 21-39.

63. ШУМ Л.С., ДИМИТРИЕВ Ю.К., ТОМИЛОВ Ю.Ф., ПОТАПОВА Ю.Н. Управляющая линейная однородная вычислительная система. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 39. Новосибирск, 1970, с. 89-106.

64. ДИМИТРИЕВ Ю.К., ШУМ Л.С., ТОМИЛОВ Ю.Ф., ПОТАПОВА Ю.Н., Блок коммутации и взаимодействие элементарных машин управления -щей однородной вычислительной системы. -Там же, с. 107-118.

65. ЕВРЕЙНОВ Э.В. О возможности построения вычислительных систем в условиях запаздывания сигналов. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 3. Новосибирск, 1962, с. 3-16.

66. ВОЛКОВ Ю.М., ЕРОФЕЕВ Ю.Ф., ЖИРАТКОВ В.И., МАЛЯВКО А.А. и др. Междугородная вычислительная система. -В кн.: Всесоюзная научная конференция "Информационные системы в АСУ "Город" (Тезисы докладов и сообщений). М., 1974, с. 152.

67. ДИМИТРИЕВ Ю.К., ШУМ Л.С. О времени обмена в распределенной однородной вычислительной системе. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с. 135-141.

68. ВИНУКОВ В.Г., ДИМИТРИЕВ Ю.К., ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСТЕЛЯНСКИЙ В.М., ЛЕХНОВА Г.М., МИРЕНКОВ Н.Н., РЕЗАНОВ В.В., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Однородная вычислительная система из мини-машин. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 51. Новосибирск, 1972, с. 127-145.

69. ДИМИТРИЕВ Ю.К., ЕВРЕЙНОВ Э.В., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Вычислительная система "МИНИМАКС". -В кн.: Проектирование элементов и устройств вычислительной техники (материалы к семинару). Л., 1973, с. 4-6.

70. АФАНАСЬЕВ В.П., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г., ШУМ Л.С. Вычислительная система "СУММА". -В кн.: Всесоюзная научная конференция "Информационные системы в АСУ "Город" (Тезисы докладов и сообщений). М., 1974, с. 151.

71. КОСАРЕВ Ю.Г. О методике решения задач на универсальных вычислительных системах. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 17. Новосибирск, 1965, с. 61-99.

72. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. О решении задач на универсальных вычислительных системах. -Там же, с. 106-164.

73. ЗАГОРУЙКО Н.Г. Методы распознавания и их применение. М., "Сов. радио", 1972.

74. КОСАРЕВ Ю.Г., КУЧИН Н.В. Параллельный алгоритм для решения задач таксономии. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 42. Новосибирск, 1970, с. 3-14.

75. ЗАВЬЯЛОВ Ю.С. Применение вычислительных систем для решения сложных задач проектирования в машиностроении. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 38. Новосибирск, 1970, с. 3-22.

76. ЗАВЬЯЛОВ Ю.С. Интерполирование бикубическими многозвеньниками. -Там же, с. 74-101.

77. ЗАВЬЯЛОВ Ю.С. Экстремальное свойство бикубических многозвеньников (сплайнов) и задача сглаживания. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 42. Новосибирск, 1970, с. 109-158.

78. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. О системах автоматизации научных экспериментов для разработки вычислительных систем. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 8. Новосибирск, 1963, с. 3-10.

Поступила в ред.-изд. отд.
29 января 1974 года