

КОНФЕРЕНЦИЯ

**„ПУТИ РАЗВИТИЯ СОВЕТСКОГО
МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ”**

ПЛЕНАРНЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

Москва, 12—17 марта, 1956 г

Печатается по решению оргкомитета конференции

19/Х 56 г.

Тир. 5000

Зак. 4047

ВИНИТИ. Москва, Волочаевская, 40.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПАНОВ Д. Ю.	– ИСТОРИЯ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН.....	4
ЛЕБЕДЕВ С. А.	– БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ.....	16
ДОРОДНИЦЫН А. А.	– РЕШЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ	22
ШУРА-БУРА М. Р.	– ПРОГРАММИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН.....	26
БАЗИЛЕВСКИЙ Ю. Я.	– СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЦИФРОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ (СЦМ) И ПУТИ ИХ РАЗВИТИЯ	29
УШАКОВ В. Б.	– МОДЕЛИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ.....	39

ИСТОРИЯ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Зарождение вычислительной техники совпадает, по-видимому, с возникновением самого счета. В самые древние времена, тысячи лет тому назад, люди уже применяли простейшие приспособления для механизации счета: пальцы на руках и ногах, камешки на песчаных полях абака и т. п. Однако вычислительная техника в том виде, в котором она существует в настоящее время, еще очень молода — ей еще нет и 10 лет. В сущности говоря, только после второй мировой войны началось развитие электронных цифровых вычислительных машин, которые создали переворот в этой области.

Всем известны вычислительные устройства (планиметры, гармонические анализаторы, интеграторы и машины для решения дифференциальных уравнений), которыми уже давно пользуются математики и инженеры для облегчения решения различных математических задач.

Однако только с созданием цифровых электронных вычислительных машин оказалось возможным совершить качественный скачок вперед в решении сложных математических задач.

Быстродействующие цифровые вычислительные машины представляют собой наиболее совершенное достижение современной техники. Эти машины позволили ускорить вычисления, при сохранении необходимой точности, в десятки и сотни тысяч раз и сделали возможным такие вычисления, которые раньше вообще были недоступны человеку ввиду ограниченности срока его жизни. При помощи электронных вычислительных машин уже сейчас удается решать такие сложные задачи, как установление достаточно точного прогноза погоды (до последнего времени эта задача была невыполнима, так как для предсказания погоды на завтра нужно было вести счет в течение многих дней), производить расчет ряда вариантов сложной конструкции (или процесса) и выбирать из них наилучший; автоматическое управление сложной установкой по весьма сложной программе и т. д.

Отношение к объемам доступных нам вычислительных работ в корне изменилось. Уже сейчас такие задачи, для решения которых требуется меньше часа работы электронной вычислительной машины, считаются слишком «маленькими» задачами для больших универсальных машин, хотя для решения этих «маленьких» задач с помощью арифмометра потребовалось бы 10—15 лет работы вычислителя.

В условиях планируемого в нашей стране бурного роста промышленности вопрос о перспективах развития вычислительной техники приобретает исключительное значение. В нашей стране проблемы прикладной математики и вычислительной техники всегда привлекали внимание исследователей. С работ великого Эйлера начинается то направление прикладного математического анализа, которое в наше время представлено именами акад. А. Н. Крылова, акад. Чаплыгина, акад. Галеркина и многими ныне живущими их продолжателями и учениками.

Среди создателей математических машин мы можем с гордостью назвать инженера Экспедиции заготовления государственных бумаг в Петербурге Однера, создавшего в 1874 г. знаменитое «колесо Однера», используемое во многих современных арифмометрах; акад. П. Л. Чебышева, разработавшего оригинальную систему построения счетного механизма, использованную сейчас в новейших американских арифмометрах-автоматах «Мэрчент»; акад. А. Н. Крылова, построившего в 1911 г. первую в мире машину для решения дифференциальных уравнений; проф. Бонч-Бруевича, создавшего в 1918 г. электронную триггерную схему, принцип которой используется в электронных вычислительных машинах, а также имена многих других русских и советских ученых и инженеров, вложивших свои силы и изобретательность в создание современной вычислительной техники.

В настоящее время всем известна универсальная электронная вычислительная машина БЭСМ Академии наук СССР, разработанная и построенная в 1952 г. под руководством акад. С. А. Лебедева. Эта машина по своим данным превосходит все европейские и большинство американских машин.

На Международной конференции в Дармштадте осенью 1955 г. акад. С. А. Лебедев сделал доклад об этой машине, и присутствующие на конференции иностранные ученые и инженеры дали ей высокую оценку.

На настоящей конференции вы услышите доклады многих советских ученых и конструкторов, в том числе доклад акад. С. А. Лебедева «Быстродействующие универсальные вычислительные машины»; доклад о советской цифровой электронной машине М-2, разработанной под руководством члена-корр. АН СССР И. С. Брука; о машине «Стрела», разработанной под руководством Ю. Я. Базилевского и др. Вы услышите также доклады, посвященные нашим работам в области моделирующих устройств, ведущихся В. Б. Ушаковым, Л. И. Гутенмахером, Н. В. Корольковым и др.

В связи с тем что настоящая конференция посвящена советским работам в области математических машин и приборов, мы не будем останавливаться здесь на этих работах и постараемся хотя бы в самых общих чертах изложить положение в области математических машин в тех странах за рубежом, где вычислительная техника получила наибольшее развитие, главным образом в США и Англии.

История современных автоматических вычислительных машин с программным управлением представляет значительный интерес.

В 1833 г. профессор математики Кембриджского университета в Англии Чарльз Бэббидж (Charles Babbage) выступил с проектом «аналитической машины». Перед этим он построил макет «разностной машины», с помощью которой автоматически можно было вычислять значение многочленов и составлять таблицы функций, аппроксимируя их многочленами. Аналитическая машина Бэббиджа не была построена, и технические материалы по ней были опубликованы его сыном только после смерти Чарльза Бэббиджа, в 1888 г. Однако в 1842 г. известный итальянский математик Менабреа опубликовал свои записи лекций Бэббиджа, прочитанных в Турине и посвященных «аналитической машине». Эти весьма кратко изложенные лекции были переведены на английский язык дочерью лорда Байрона Адой Лавлейс (Ada Lovelace), талантливой женщиной-математиком, и изданы с ее обширными примечаниями.

Проект Бэббиджа превосходит современные идеи о конструкции и логических схемах вычислительных машин. В нем выделено арифметическое устройство (названное Бэббиджем «mill» — мельница), запоминающее

устройство (Бэббидж проектировал его на 1000 пятидесятизначных десятичных чисел), устройство управления с вводом программы на перфокартах. Бэббиджем были предусмотрены возможности выбора машиной дальнейшего пути вычисления в зависимости от предыдущих результатов (условный переход) и даже операции с адресами. В примечаниях Ады Лавлейс дана интересная конкретная программа вычисления бернуллиевых чисел для этой машины.

Замечательные исследования Бэббиджа не были, однако, оценены его современниками; в то время не было достаточной материальной базы для создания «аналитической машины». Лишь через 100 лет были построены первые электромеханические, а затем электронные машины с программным управлением.

Первая электронная цифровая машина ЭНИАК (рис. 1) была построена в Америке вскоре после второй мировой войны. Несмотря на все свои несовершенства, она показала на те огромные возможности, которые таит в себе новая электронная вычислительная техника. По сравнению с современными машинами машина ЭНИАК является далеко не совершенной; она выглядит примерно так же, как выглядел первый паровоз Дж. Стефенсона по сравнению с последней конструкцией паровоза. В США стала быстро развиваться специальная отрасль промышленности — производство электронных вычислительных машин.

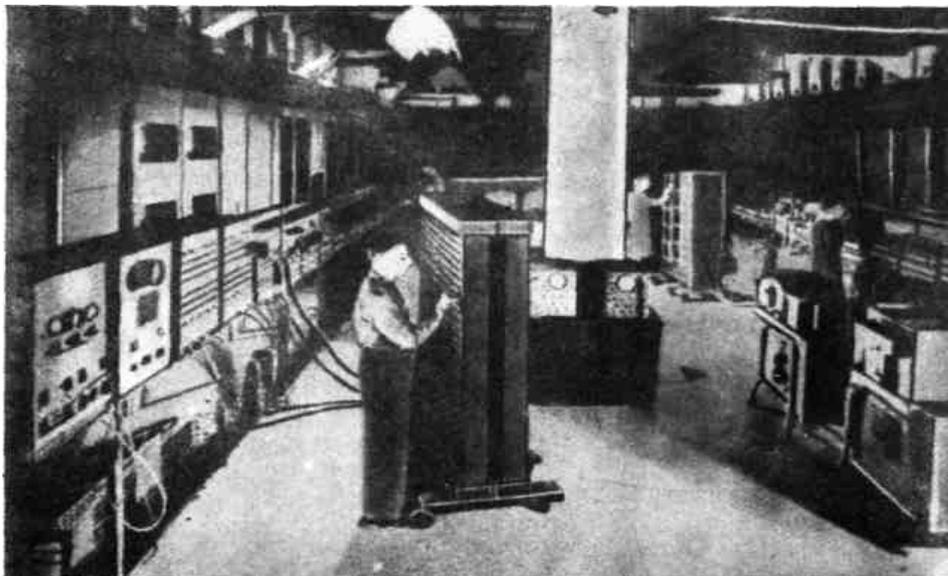


Рис. 1

Крупнейшие электронные и радиотехнические фирмы стремились захватить место в этой новой отрасли промышленности, стремились захватить рынки сбыта, создавая более совершенные конструкции машин. В результате этой конкуренции рождались все новые и новые модели машин. Рост количества вычислительных машин в США и во всех остальных странах мира необычайно стремителен. По сведениям, опубликованным в июньском номере журнала «Электроникс» за 1955 г., в Америке к середине 1955 г. были установлены и работали в промышленных и торговых организациях 2800 электронных цифровых машин стоимостью около 227 млн. долл., около 1700 вычислительных машин разных размеров стоимостью около 186 млн. долл. находились в производстве¹.

По сообщениям американского корреспондента журнала «Бритиш Коммьюникейшнз энд Электроникс», в 1956 г. в США ожидается дальнейшее расширение производства электронных вычислительных машин. Фирма «Интернейшил Бизнес Мэшинс» (ИБМ) имеет, например, заказы на 200 больших вычислительных машин, из которых 30 уже установлены, а остальные будут установлены в течение 16 месяцев. Указывается, что общая сумма капиталовложений в действующие или уже заказанные вычислительные машины, вероятно, достигнет 1 млрд. долл.²

Фирма «Интернейшил Бизнес Мэшинс» (ИБМ) является одной из крупнейших американских фирм, занятых изготовлением вычислительных машин. Валовой доход фирмы за 1954 г. составил 461,3 млн. долларов, превысив на 52 млн. долларов доход за 1953 г. Данные 1955 г. еще не опубликованы, однако несомненно, что они будут значительно выше, чем за 1954 г. За 1-й квартал 1955 г. доход фирмы составлял 2,78 доллара на акцию вместо 2,47 доллара в первом квартале 1954 года³.

2100 сотрудников фирмы заняты исследованиями и новыми разработками в области вычислительных машин. Фирма затрачивает на исследовательские работы и разработку новых моделей около 4% своего валового дохода⁴. Недавно фирма «ИБМ» организовала новое «Отделение военной продукции» (Military Products Div.), которое будет заниматься разработкой и изготовлением вычислительных машин для наземной сети станций противовоздушной обороны, входящей в состав «проекта Линкольн», а также участвовать в разработке и изготовлении авиационных вычислительных машин для электронных систем бомбометания и навигации⁵.

В 1956 г. фирма «ИБМ» открывает под руководством проф. Шпейзера исследовательскую лабораторию в Цюрихе (Швейцария). Аналогичное положение имеется и в других крупных фирмах.

Таким образом, новая отрасль промышленности — строительство электронных вычислительных машин —

¹ «Electronics», 1955, vol. 28, № 6, pp. 122—131.

² «British communications and Electronics», 1956, vol. 3, № 1, p. 36

³ The Magazine of Wall Street and Business Analyst, 1955, vol. 96, № 1 Cpp. 595—597, 622.

⁴ Electronics, 1955, vol. 28, № 12, p. 22.

⁵ Control Engineering, 1956, vol. 3, № 1. p. 27

быстро развивается. Функции этих машин непрерывно расширяются и усложняются. Теперь это не только счетные, но и управляющие машины, выполняющие различные довольно сложные логические операции. Как видно из указанных выше примеров, большая роль отводится этим машинам и в области военной техники.

Мы говорили выше об электронных цифровых вычислительных машинах общего назначения, т. е. универсальных машинах. Именно об этих машинах прежде всего приходится говорить в связи с современным развитием вычислительной техники. Однако наряду с универсальными цифровыми электронными вычислительными машинами быстрыми темпами развивается производство и специализированных цифровых электронных машин, предназначенных для решения какого-либо определенного класса задач и поэтому менее сложных. Продолжают развиваться и совершенствоваться также и машины непрерывного действия или моделирующие устройства, которые применяются для решения многих задач. Наконец, создаются новые типы малых настольных машин — арифмометры, компюметры, фактурные машины и т. п., хотя следует сказать, что здесь мы, конечно, не встретим такого быстрого развития, как в области цифровых электронных машин.

Универсальные цифровые машины

Не представляется возможным дать сколько-нибудь полный обзор существующих в настоящее время цифровых вычислительных машин; можно попытаться лишь на основе анализа последних конструкций указать на те тенденции их развития, которые обращают на себя особое внимание.

Необходимо отметить, что развитие конструкций электронных вычислительных машин диктуется требованиями различного характера. С одной стороны — все более высокие требования предъявляются к машинам, выполняющим научные расчеты. С другой стороны — вычислительные машины находят все большее применение для расчетов коммерческого характера. Требования, предъявляемые к вычислительным машинам, выполняющим научные расчеты, обычно не совпадают с требованиями, которые предъявляются к вычислительным машинам, производящим коммерческие расчеты. Наконец, электронные вычислительные машины все чаще используются для управления производственными установками, что опять-таки предъявляет к ним своеобразные требования.

Расчеты научно-исследовательского характера в свою очередь требуют развития вычислительных машин, по крайней мере, в двух направлениях. С одной стороны — для выполнения некоторых вычислений необходимы машины с весьма большой скоростью работы и большим объемом памяти. С другой — все более широкое распространение вычислительных машин и применение их даже в небольших расчетных бюро требуют создания недорогих вычислительных машин с несколько ограниченными возможностями.

Использование вычислительных машин для коммерческих вычислений требует создания весьма развитых систем ввода и вывода, так как в вычислениях такого рода обычно приходится выполнять довольно простые операции, но с большим количеством данных. Использование же машин для целей управления предъявляет ряд своеобразных требований по объединению машины и управляемого объекта.

Пытаясь удовлетворить этим разнообразным требованиям, фирмы, выпускающие вычислительные машины, пошли по следующему пути. Каждая фирма разрабатывает свой тип элементарных устройств, из которых могут быть скомбинированы машины, соответствующие различным требованиям заказчиков. В последнее время достаточно отчетливо определился тип современной электронной вычислительной машины. Это — машина, построенная по блочному принципу, из стандартных блоков, количество различных типов которых конструкторы стремятся сделать, по возможности, небольшим. Стандартные блоки собираются в стандартные же стойки или шкафы, к которым добавляются устройства ввода и вывода, и из определенного количества таких стоек или шкафов составляется машина. Крупные фирмы на основе таких стандартных элементов строят целые серии машин, отличающихся друг от друга своими возможностями и приспособлением к тому или иному виду работы.

Фирма «ИБМ» выпускает по такому принципу серию машин «700» (в которую входят машины «701», «702», «705»). Английская фирма «ЭЛЛИОТ» выпускает

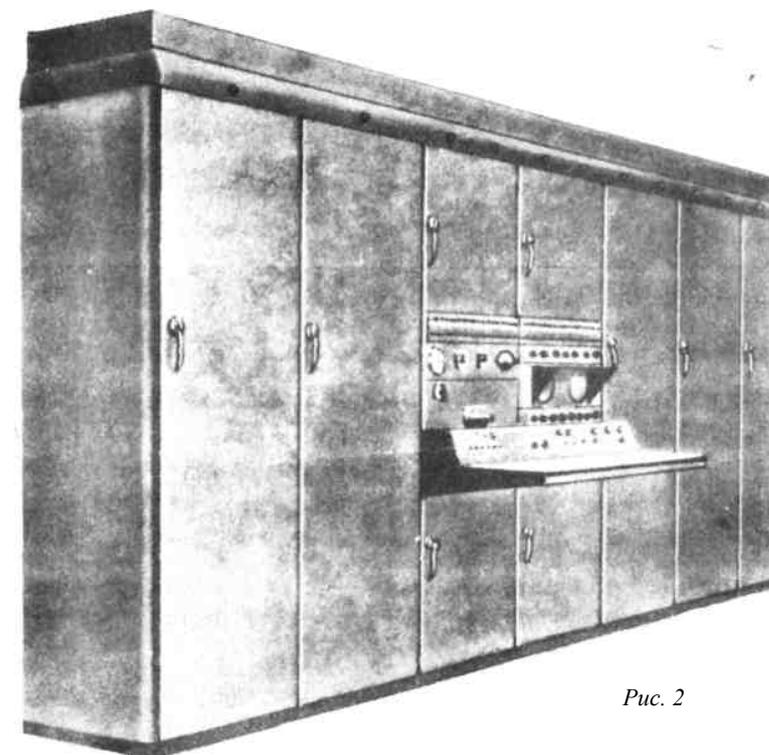


Рис. 2

серию машин «400» (машины «401», «402», (рис. 2) «404», «405» и т. д.).

Таким образом, фирмы могут удовлетворить пожелания весьма широкого круга заказчиков; в частности, используя те же самые арифметические блоки, что и в машинах для научных расчетов, и добавляя специальные вводные и выводные устройства, можно обеспечить потребности организаций, ведущих коммерческие расчеты.

Современные физика и техника предъявляют к вычислительным работам очень большие требования. В ряде случаев необходимо решать дифференциальные уравнения в частных производных с тремя, четырьмя и даже шестью независимыми переменными. Используя метод сеток и беря для каждого переменного всего десять значений, мы получаем от 10^3 до 10^6 узлов в сетке, для каждого из которых должно быть выполнено достаточно большое количество вычислительных операций. Таким образом объем вычислений в этих задачах определяется количеством операций от 10^6 до 10^{10} , или даже 10^{12} . Очевидно, что такой объем вычислительных работ предъявляет чрезвычайно высокие требования как к запоминающему устройству машины, так и к скорости ее работы.

В нижеприведенной таблице дано время выполнения различного количества операций при скорости машины 10 000 операций в секунду.

Время выполнения 10^n операций при скорости машины 10000 операций в секунду

n	время
6	1,6 мин.
7	16 мин.
8	2,6 час.
9	26 час.
10	13 дней

Из таблицы видно, что при такой скорости нельзя рассчитывать на решение задач, требующих больше чем 10^{10} операций. В связи с этим предпринимаются работы в направлении изготовления машин с очень большой скоростью.

В 1945 г. было объявлено о постройке фирмой «ИБМ» огромной уникальной машины НОРК с высокой скоростью работы (время сложения $15 \mu \text{сек}$, время умножения $31 \mu \text{сек}$), с очень большим числом ламп (8000 ламп и 25 000 диодов). Фирма «Ремингтон Ранд», выпускающая известные серийные машины УНИВАК, предполагает выпустить гигантскую машину ЛАРК (LARC) стоимостью в 3 млн. долл.

Эта машина должна иметь скорость в 250 раз большую, чем прежние машины данной фирмы. По мнению американских специалистов, машина ЛАРК будет иметь время умножения около $18 \mu \text{сек}$, что в 1,7 раза меньше, чем у машины НОРК.

Создание машин с такими большими скоростями неизбежно повлечет за собой чрезвычайную сложность конструкции и огромное количество оборудования. В связи с этим, наряду с разработкой уникальных сверхбыстрых машин, проводятся работы по параллельному использованию двух вычислительных машин при решении одной и той же задачи. Известно, что в США была построена вычислительная машина ДИСЕАК, которая отличается от обычных универсальных вычислительных машин тем, что может с помощью кабелей присоединяться к различным устройствам, хранящим и обрабатывающим данные, полученные в машине. Подобные соединения позволяют осуществлять совместную работу целого ряда устройств, образующих сложную вычислительную или управляющую систему. На совместно работающих машинах СЕАК и ДИСЕАК решалась задача, которая состояла в получении данных на машине СЕАК, передаче и дальнейшей их обработке на машине ДИСЕАК. Во время ожидания поступления данных от машины СЕАК машина ДИСЕАК выполняла другую программу.

В последнее время вопросам такой совместной работы вычислительных машин уделяется большое внимание. В частности, известно, что фирма «ИБМ» разработала специальный передатчик, который позволяет передавать по телеграфу, телефону или радио данные вычислений, записанные на перфокартах. Возможно, что совместная работа нескольких обычных машин в ряде случаев окажется практически более выгодной, чем создание чрезвычайно дорогих, специальных сверхбыстрых машин.

Повидимому, стремление к упрощению конструкции машин, сокращению оборудования и созданию максимальных удобств в эксплуатации является одной из основных тенденций в развитии вычислительных машин. В этом отношении представляет интерес вычислительная машина «Пегас» фирмы «Ферранти», являющейся одной из ведущих английских фирм по вычислительным машинам, которая успешно конкурирует с американскими фирмами.

«Пегас» — универсальная вычислительная машина средних размеров (рис. 3). В ней используется модифицированный одноадресный код. Арифметическое устройство этой машины содержит ряд регистров, использующих в качестве основных элементов никелевую линию задержки, в которой непрерывно циркулирует один код. В семи таких регистрах могут выполняться любые арифметические и логические операции. Другие 32 подобных регистра могут выполнять лишь сложение и вычитание. Отдельные регистры служат для ввода и вывода информации.

Главным запоминающим устройством является магнитный барабан, вращающийся со скоростью 3750 об/мин (максимальное время выборки 16 мсек) и содержащий 4096 кодов. Кроме того, имеется еще 512 кодов для хранения программ ввода и контроля. Каждое число состоит из 38 разрядов и знака, т. е. эквивалентно одиннадцатиразрядному десятичному числу.

Большинство операций выполняется за $0,3 \text{ мсек}$. Умножение требует 2 мсек , а деление 5 мсек . Имеется возможность останавливать ход вычислений на любой заранее указанной инструкции, а также выполнять программу вручную.

Данная машина потребляет мощность 12 ква , получаемую от мотор-генератора, который может быть включен в сеть любого напряжения и частоты; она имеет блочную конструкцию и размещена в двух шкафах. Габариты машины: главный шкаф $2300 \times 600 \times 2100 \text{ мм}$; шкаф питания $1600 \times 600 \times 2100 \text{ мм}$; пульт управления $1400 \times 2200 \text{ мм}$.

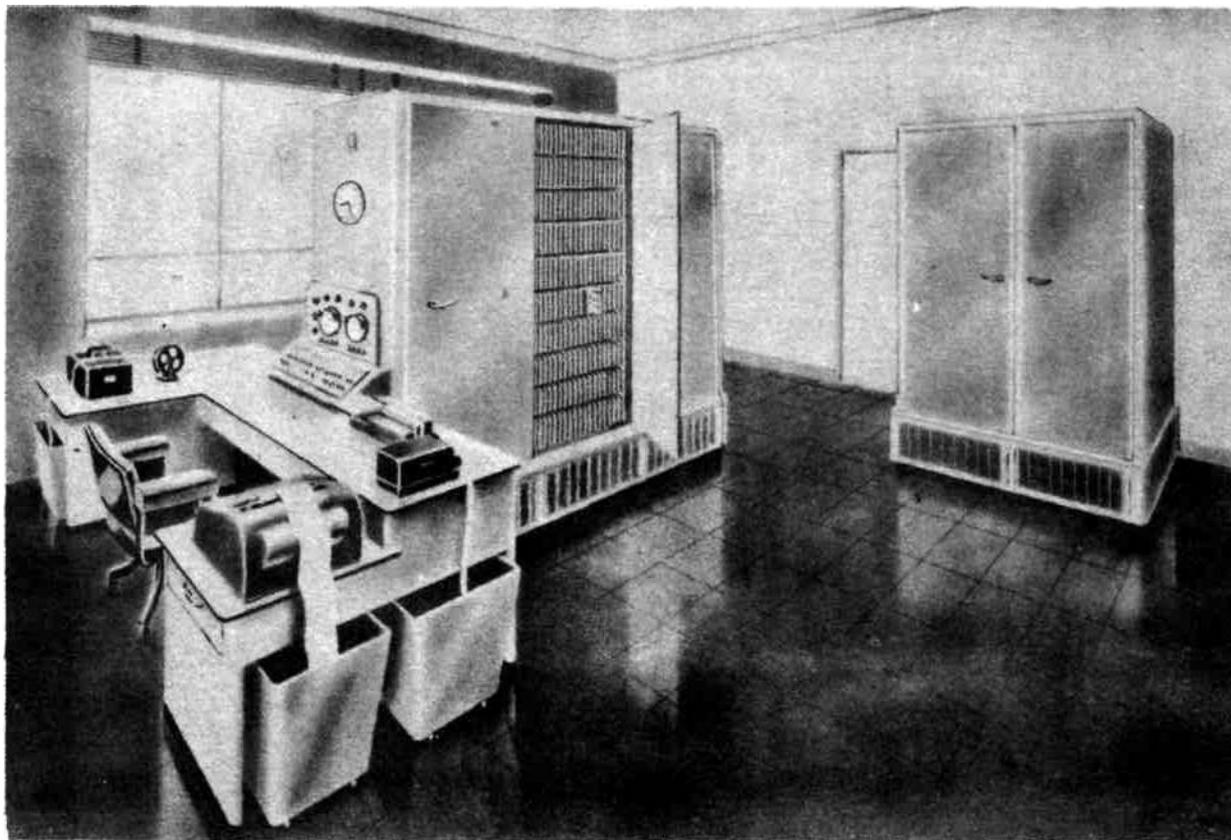


Рис. 3

В машине «Пегас» в результате тщательной разработки логической схемы при небольшом количестве оборудования получают значительную емкость памяти и хорошая скорость.

Большое разнообразие выполняемых машиной операций значительно облегчает работу программиста.

Передача содержимого любого регистра в запоминающее устройство, и наоборот, может осуществляться одновременно со сложением, вычитанием или изменением знака. Имеется логическая операция «и», которая записывает «1» в тех разрядах числа, образующегося в запоминающем устройстве, которым соответствует «1» в тех же разрядах как у числа, хранящегося в указанном регистре, так и у числа, ранее хранившегося в запоминающем устройстве. Другая логическая операция «несоответствие» записывает «1» в тех разрядах числа, образующегося в запоминающем устройстве, которым соответствуют разные значения в одинаковых разрядах числа, хранящегося в указанном регистре, и числа, ранее хранившегося в запоминающем устройстве.

В машине имеются шесть операций условного перехода по указанному адресу. Такой переход может осуществиться, в частности, если произошло переполнение регистра.

Особо важной характеристикой машины является возможность преобразовывать (модифицировать) первый адрес в команде перед тем, как выполняется указанная в ней операция. В команде, кроме позиций двух адресов и кода операции, имеется позиция, на которой указывается, на каком адресе имеется число для преобразования первого адреса этой команды. Эта характеристика открывает большие возможности для последовательной обработки группы чисел и облегчает программирование.

Специальные операции позволяют производить изменение адреса в команде с последующим контролем деления на 8 без остатка, который определяет условный переход. Эти операции позволяют легко обрабатывать блоки чисел, состоящие из 8 кодов, производить обмен информации между запоминающими устройствами и строить циклические подпрограммы.

В технологическом отношении машина, которую нам пришлось видеть в процессе наладки в вычислительном центре фирмы «Ферранти» в Лондоне, выполнена также очень хорошо. Конструкция блоков из пластмассы весьма проста и удобна. В качестве элементов быстродействующего запоминающего устройства используются магнестрикционные никелевые линии задержки, широко применяемые в английских вычислительных машинах и работающие, по словам англичан, весьма надежно. Машина «Пегас» представляет собой пример того, насколько может быть сокращено оборудование при хорошо продуманной конструкции: имея несколько лучшие данные, чем машина УНИВАК, машина «Пегас» использует примерно в пять раз меньше электронных ламп.

В качестве другого примера современной универсальной вычислительной машины очень малых габаритов можно привести интересную машину фирмы «Лайбраскоп» (рис. 4). Эта машина оперирует с 30-разрядными двоичными числами плюс разряд знака. Запоминающее устройство на магнитном барабане, вращающемся со скоростью 3600 об/мин, имеет емкость 4096 чисел. Среднее время выборки около 8,5 мсек.

Все устройства машины размещены внутри стального кожуха, содержащего также обслуживающую машину, кондиционирующую установку и блок питания. В машине 100 ламп и 1300 диодов. По-видимому, эти цифры представляют собой минимальные цифры, на которые можно рассчитывать в настоящее время.

Скорость работы машины «Лайбраскоп» следующая: сложение занимает от 2 до 19 мсек, умножение от 19 до 36 мсек. Машина может выполнять, помимо четырех арифметических действий, условный и безусловный переход, изменение адресов, передачу команд на запоминающее устройство и из него. Данные вводятся в машину через трансмиттер со скоростью 600 знаков в минуту; с такой же скоростью работает и выводное печатающее устройство.

Как указывалось выше, универсальные вычислительные машины могут быть приспособлены для выполнения

коммерческих расчетов. В этом случае они должны обладать устройствами ввода и вывода, дающими возможность обрабатывать большое количество материала.

Во время пребывания в Лондоне мы имели возможность ознакомиться с большой электронной вычислительной машиной ЛЕО фирмы «Лайонс» (рис.5). Эта фирма не является электротехнической или радиотехнической. Она владеет большим количеством кафе и столовых, а также предприятий, выпускающих печенье, кексы, консервы и т. п. Количество рабочих и служащих фирмы превышает 30 000 человек. В целях экономии большой счетной работы, связанной с начислением заработной платы и планированием производства, фирма создала у себя специальный отдел и своими силами построила электронную счетную машину ЛЕО, которая в настоящее время полностью обеспечивает все потребности фирмы и, кроме того, выполняет внешние заказы. Машина ЛЕО специально приспособлена для коммерческих вычислений и может выдавать результаты непосредственно на бланках и карточках, используемых далее в документационной работе фирмы. Машина снабжена разнообразными вводными и выводными устройствами, обеспечивающими ввод и вывод большого количества данных, необходимых при коммерческих расчетах. В настоящее время фирма изготавливает еще две машины для других предприятий и принимает заказы на постройку этих машин. Стоимость машины 75 000 фунт. стерл.

Специализированные цифровые машины

За последнее время уделяется много внимания вопросам разработки специализированных цифровых вычислительных машин. Эти машины, предназначенные для решения задач какого-либо одного класса, могут быть сделаны проще и меньше, чем универсальные машины. Для специализированных машин легче может быть разрешен и вопрос скорости, так как в них легко предусмотреть несколько параллельно работающих арифметических или запоминающих устройств, выполняющих ограниченные функции.



Рис. 4



Рис. 5

Сфера применения специализированных вычислительных машин весьма обширна; именно к этому классу машин относятся в своем большинстве вычислительные машины, работающие с реальными объектами и используемые для целей управления.

Дать сколько-нибудь полный обзор специализированных машин, так же как и в случае универсальных вычислительных машин, невозможно, и мы ограничимся некоторыми наиболее интересными конструкциями, на примере которых можно показать тенденции их развития.

Как уже указывалось, специализированные вычислительные машины часто находят свое применение для целей управления. Одной из наиболее интересных областей применения специализированных машин является авиация. В авиационной технике уже давно применяются вычислительные устройства, которые используются в навигационных приборах и т. д. С повышением скорости и увеличением дальности полета требования к авиационным вычислительным устройствам намного усложнились. Если раньше эти устройства часто являлись устройствами непрерывного действия, то в последнее время наметился определенный переход на цифровые системы.

К недостаткам вычислительных устройств непрерывного действия обычно относят: 1) накопление ошибок при вычислениях; 2) сильную зависимость конструкции от назначения устройства (вычислительное устройство непрерывного действия, спроектированное для управления стрельбой, нельзя легко приспособить, например, для

решения навигационных задач); 3) зависимость точности от размеров (повышение точности, вообще говоря, требует увеличения масштабов, что приводит к увеличению размеров и утяжелению деталей); 4) сложность производства (для устройств непрерывного действия обычно требуются сверхточные потенциометры, зубчатые передачи, эксцентрики и т. п., которые дороги и сложны в изготовлении и сборке).

Цифровые вычислительные устройства имеют следующие преимущества: 1) отсутствие потери точности при вычислениях;¹ 2) гибкость¹; 3) простота изготовления²; 4) потенциально большая надежность³.

В качестве единственного недостатка цифровых вычислительных устройств, который затрудняет пока широкое их применение на самолете, можно указать на сложность запоминающего и управляющего устройств. В стационарных цифровых вычислительных машинах эти устройства обычно велики и тяжелы. Учитывая, однако, что самолетное вычислительное устройство должно решать лишь несколько специальных задач, можно рассчитывать на уменьшение его размеров.

Несколько американских фирм уже в течение ряда лет работает над самолетными цифровыми вычислительными машинами. Известны машины ДЖЕНКОМП фирмы «Джекобс» и «Диджитак» фирмы «Хьюз». Эти машины имеют много интересных особенностей, которые могут оказаться полезными при проектировании и других специализированных машин.

Машина «ДЖЕНКОМП-С» (рис. 6) построена фирмой «Джекобс». Она оперирует с данными, непрерывно поступающими в нее через девять внешних каналов работая в истинном масштабе времени и используя для вычислений константы, хранящиеся в ее запоминающем устройстве. Машина имеет три выхода, с которых периодически могут сниматься значения каких-либо переменных.

Машина измеряет входные величины 10 раз в секунду и в таком же темпе выдает выходные данные. Если на одном из входов переменная резко изменяется, машина анализирует ранее поступившие данные, чтобы определить, является ли это изменение возможным или оно должно рассматриваться как случайное и может быть отброшено. Машина, по словам фирмы, может принимать несколько типов подобных решений.

Чтобы обеспечить возможность работы в истинном масштабе времени, машина должна иметь высокую скорость, в связи с этим она является машиной полностью параллельного типа. По данным фирмы, максимальное время сложения двух 24-значных чисел составляет 24 мсек, умножения 650 мсек, деления 1,63 мсек. Кроме того, машина вычисляет синус за 5 мсек и косинус от арксинуса за 4,2 мсек. Машина имеет три запоминающих устройства: 1) оперативное (из 24 магнитных регистров, в каждом из которых размещается одно 24-значное число со временем выборки около 4 мсек); 2) программное (на перфокартах, для запоминания программы и констант. Каждая программная перфокарта содержит 128 кодов команд по 24 разряда. Каждая из трех перфокарт для запоминания констант содержит 70 чисел по 24 разряда. По данным фирмы, время выборки наперед заданного числа с этих карт составляет одну мсек); 3) приемное (из 9 магнитных регистров для запоминания последних значений переменных, приходящих по 9 внешним каналам).

Через каждые 3,2 сек (32 цикла операций) производится автоматическая проверка, заключающаяся в том, что на входы подаются некоторые вполне определенные величины, которые должны дать заранее известный результат. Если результат получается другой, машина останавливается и дает сигнал. Машина содержит 800 субминиатюрных ламп и занимает объем 56X61X71 см (без источника питания); она может работать от переменного тока 400 или 60 гц.

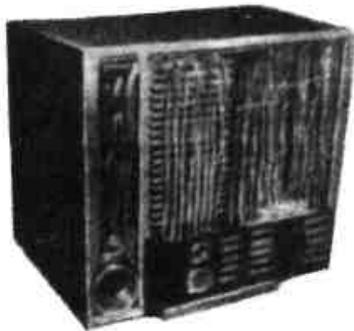


Рис. 6

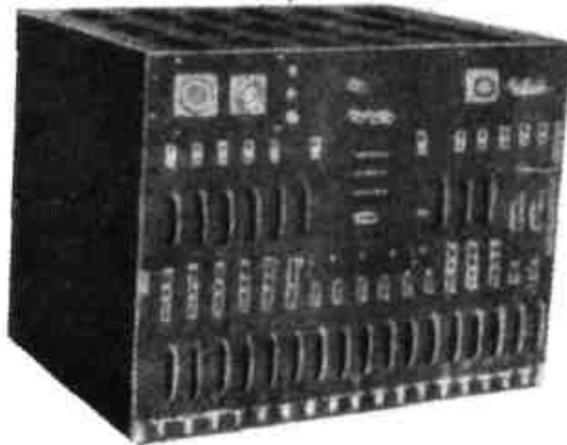


Рис. 7

Другая самолетная цифровая вычислительная машина «Диджитак» (рис.7) (Digitac) была сконструирована фирмой «Хьюз» (Hughes Aircraft Co.). Машина предназначена для работы с наземной гиперболической радионавигационной системой типа «Лоран» (Logan). Она определяет координаты самолета, выводит его к заданному месту и выполняет ряд других функций.

«Диджитак» является последовательной, двухадресной машиной, оперирующей с семнадцатью разрядными (включая знак) двоичными числами, с запоминающим устройством на магнитном барабане диаметром 10,2 см,

¹ Одно и то же цифровое вычислительное устройство может решать и навигационные задачи и другие задачи управления без сколько-нибудь заметного увеличения веса или сложности. Цифровое вычислительное устройство можно, например, в начале полета использовать для навигационных целей, затем нажатием кнопки переключить его на выполнение другой задачи и потом вновь вернуть к навигационным задачам.

² Цифровые устройства состоят из большого числа одинаковых деталей, их легче приспособить к производству на автоматических поточных линиях.

³ За исключением запоминающего устройства и устройства управления, в цифровых вычислительных устройствах нет движущихся частей. Это делает их потенциально более надежными, чем устройства непрерывного действия.

вращающимся со скоростью 8000 об/мин. Емкость барабана 1056 чисел, система адресов — плавающая. Время выборки от 6 μ сек до 7 msec. Время сложения, включая выборку от 0,6 до 2,4 msec, умножения — от 2,5 до 4,3 msec. В машине около 350 ламп и 2500 полупроводниковых диодов.

Определение местонахождения самолета ведется с одновременным использованием радионавигационных и навигационных средств. При затухании радиосигналов «Диджитак» автоматически переходит на работу с одними навигационными средствами. Когда радиосигналы усиливаются, осуществляется автоматический возврат к комбинированному способу работы. Навигационные расчеты ведутся по непрерывно поступающим данным о курсе самолета, воздушной скорости, скорости и направления ветра и о предыдущем местонахождении. Все выходные данные предварительно контролируются по допустимым пределам и сравниваются с их предыдущими значениями. Если какие-либо данные выходят за допустимые пределы или сильно отличаются от предыдущих, то они отбрасываются и для вычисления используются предыдущие их значения.

Время решения навигационных задач составляет около 0,5 сек, за это время машина выполняет 360 операций. Цифровые данные на выходе машины с помощью специального счетчика преобразуются во вращение мотора, управляющего автопилотом. Счетчик после приема выходных данных начинает считать импульсы специального генератора, причем каждый импульс соответствует изменению курса на $1/5^\circ$ в направлении, определяемом разрядом знака. Когда счетчик досчитывает до нуля, поправка курса вводится в автопилот. При выполнении крутых разворотов скорость счетчика автоматически увеличивается.

В машине автоматически производится усреднение получаемых данных. Для усреднения данных о местонахождении и скорости самолета применяются следующие уравнения:

$$P = P_{n-1} + (V_a + W_n) \Delta t \quad \text{— местонахождение } P, \text{ полученное навигационным счислением};$$

$$P_n = c \bar{P} + (1 - c) \tilde{P} \quad \text{— усредненное местонахождение};$$

$$\tilde{V}_g = \frac{1}{\Delta t} (P_n - P_{n-1}) \quad \text{— скорость относительно земли /приблизительная/};$$

$$\tilde{W} = \tilde{V}_g - V_a \quad \text{— скорость ветра /приблизительная/};$$

$$W_n = d W_{n-1} + (1 - d) \tilde{W} \quad \text{— усредненная скорость ветра}$$

$$\tilde{P} \quad \text{— местонахождение, вычисленное по замерам времени /приблизительное/}.$$

Здесь V_a — воздушная скорость по приборам;

Δt — время вычисления;

c, d — константы.

Такое усреднение целесообразно, так как вычисленное местонахождение может быть неустойчивым из-за помех в принимаемых сигналах. Полетными испытаниями было установлено, что коэффициент c должен быть принят равным $1/2$, а коэффициент $d = \frac{31}{32}$.

На примере машин «ДЖЕНКОМП» и «Диджитак» видны те специфические требования, которые приходится предъявлять к машинам, работающим с реальными объектами. Разумеется, в других случаях возможно возникновение и совсем иных требований, однако, повидимому, всегда при использовании каких-либо величин, полученных измерением, приходится думать о мерах, предупреждающих внесение в расчеты погрешностей.

Из числа других специализированных машин нам хочется упомянуть лишь о цифровых машинах для решения дифференциальных уравнений или, как их иногда называют, «цифровых дифференциальных анализаторов». Создание несколько лет тому назад машин этого типа произвело большое впечатление. Однако за прошедшее время стала достаточно ясна ограниченность возможностей подобных машин, но тем не менее для некоторых задач они остаются интересными.

Недавно фирма «Литтон» (Litton Industries Inc.) выпустила портативную цифровую машину для решения дифференциальных уравнений, не превосходящую по габаритам пишущей машинки (рис. 8). Машина имеет 20 интеграторов, дающих точность в 5 знаков. При выполнении итераций процесс идет со скоростью 60 раз в секунду. Машина работает от сети 110 в и потребляет 300 ватт. В ней имеется небольшое запоминающее устройство на магнитных элементах. Стоимость машины — 10 000 долларов.

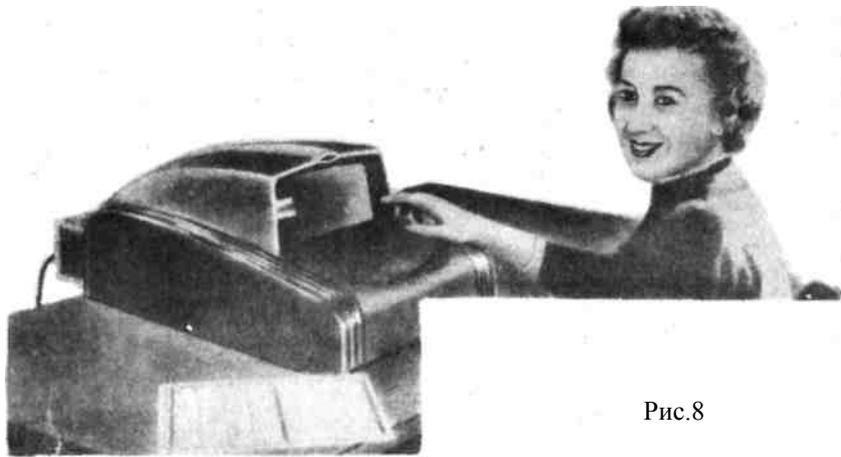


Рис.8

Моделирующие устройства

В сентябре 1955 г. в Брюсселе состоялась Первая международная конференция по моделирующим устройствам, на которой нам пришлось присутствовать в составе делегации СССР. Конференция подвела итоги пройденного пути развития, позволила установить состояние техники моделирующих устройств в разных странах и дала возможность представить себе пути развития этой области в ближайшее время. Конференция показала, что во многих странах построено большое количество разнообразных моделирующих устройств, которые выпускаются промышленностью серийно. Это особенно относится к Соединенным Штатам Америки, Англии и Франции. В этих странах моделирующие устройства стали обычным орудием инженерного исследования, применяющемся весьма широко в силу своей доступности и простоты работы. Так, например, в США в 1955 г. имелось 42 вычислительных центра, оснащенных моделирующими устройствами различного размера, принимающие заказы на выполнение вычислений. В указанное количество не вошли центры, которые не принимают заказы от других организаций.

Имеется, кроме того, значительное количество крупных установок, моделирующих сложные процессы и явления («Тайфун» в США, ТРИДАК в Англии, ВАДК в Австралии и т. д.). Подавляющее большинство серийных моделирующих устройств предназначено для решения обыкновенных дифференциальных уравнений как линейных, так и нелинейных; для решения нелинейных уравнений часто выпускаются специальные «нелинейные приставки» добавляемые к линейному устройству.

Брюссельская конференция показала, что уровень техники в области разработки и постройки моделирующих устройств в настоящее время почти одинаков во всех странах. Мы имели возможность сравнить последние советские конструкции, разработанные в промышленности, с зарубежными и убедиться в том, что советские моделирующие устройства не уступают американским или английским.

Наряду с серийными моделирующими устройствами, предназначенными для решения общих инженерных задач, непрерывно идет изыскание новых аналогий и возможностей создания моделирующих устройств для специальных целей. Некоторые из этих работ представляют значительный интерес, они дают возможность при помощи очень простых средств получить решение той или иной частной задачи. В качестве примера можно привести чрезвычайно простое множительное устройство, разработанное фирмой «Арма» (Arma Corp.), в котором используется преобразование электрических сигналов в тепло.

Преобразователь состоит из двух тождественных «нагревательных элементов» H_1 и H_2 и двух «воспринимающих элементов» B_1 и B_2 . Элемент H_1 находится в тепловом, но не электрическом контакте с элементом B_1 элемент H_2 в таком же контакте с элементом B_2 . При этом не происходит теплообмена между парами H_1 и B_1 , H_2 и B_2 . Если через «а» и «б» обозначить электрические сигналы и предположить, что эти сигналы в одной фазе, то очевидно, что напряжение на элементе H_1 будет равно $a-b$, а на элементе H_2 будет равно $a+b$. Нагревание каждого из элементов будет пропорционально квадрату напряжения, а разность величин рассеиваемого ими тепла будет пропорциональна $(a+b)^2 - (a-b)^2 = 4ab$, т.е. произведению входных сигналов.

Конструктивно преобразователь выполнен в виде двух стержней из пайрекса, на которые намотаны нагревательный элемент в виде двойной нити накала из нихрома в тефлоновой изоляции и воспринимающий элемент из никелевой проволоки в той же изоляции. Стержни заключены в миниатюрную стеклянную или металлическую колбу, вакуума в которой не требуется.

Указывается, что легко может быть получена точность прибора до 0,5%, стоимость же его составляет от $1/2$ до $1/5$ стоимости электронных ламп обычных типов.

Как известно, моделирующие устройства широко применяются для целей управления и автоматического регулирования производственных установок. В последнее время в эту область, где раньше преобладали машины непрерывного действия, все больше проникают цифровые вычислительные и управляющие устройства, однако, еще и сейчас моделирующие устройства продолжают играть здесь весьма важную роль. Конструкторы и исследователи ищут новые пути в этой области. Так, в связи с использованием вычислительных машин для целей управления возникли идеи о введении в машины предсказывающих устройств. В этих устройствах определяется наиболее вероятный будущий ход процесса, для управления которым предназначается вычислительная машина. Такое «предсказание» будущего хода процесса позволяет улучшить регулирование. С этой точки зрения запоминающие устройства являются частным

случаем предсказывающих устройств, в которых данные о поведении системы предполагаются постоянными, не зависящими от времени.

Самое определение возможного будущего поведения системы производится при помощи экстраполяции тех или иных значений параметров на основе сопоставления их значений в предыдущие моменты времени и минимизации суммарных вероятных отклонений, характеризующих закон изменений системы. Разумеется, такое «предсказание» не может быть ни чрезмерно точным, ни однозначным. Несмотря на это, использование предусматривается в машине РАЙКОМ фирмы «Райтеон» (эта машина оперирует с десятичными числами,

цифры которых записаны двоичным кодом). Запоминающие устройства на ферритах установлены или будут установлены и в ряде европейских машин, таких как французская машина КАБ-2022, английская ЭДСАК-II, предполагаемый к серийному выпуску вариант шведской машины БЭСК и других. В упоминающейся выше большой машине ЛАРК (Livermore Automatic Research Computer), которая, так же как НОРК, будет десятичной машиной с плавающей запятой (с записью десятичных цифр двоичным кодом), предполагается поставить быстродействующее запоминающее устройство на ферритах на 25 000 чисел. Повидимому, запоминающие устройства на ферритах в ближайшее время почти полностью вытеснят запоминающие устройства на электронно-лучевых трубках.

Запоминающие устройства на магнитном барабане находятся в более благоприятном положении. Простота и надежность работы этих устройств, несомненно, еще в течение долгого времени позволит им успешно применяться в малых и средних вычислительных машинах, а также в различных вспомогательных устройствах, обслуживающих торговые и коммерческие предприятия (регистрация заказов, запись графиков движения самолетов и т. п.). Магнитные барабаны и диски широко применяются в новых конструкциях вычислительных машин, причем здесь возникают некоторые новые идеи.

В 1955 г. появилось сообщение о разработке фирмой «ИБМ» запоминающего устройства на магнитных дисках «вероятного» поведения системы может оказаться более выгодным, чем использование только тех данных, которыми вычислительное устройство располагает в каждый данный момент времени.

В настоящее время трудно ожидать каких-либо особенно сенсационных достижений в области моделирующих устройств, однако можно с несомненностью утверждать, что работа в этой области даст еще очень много, в частности в тех вопросах, которые являются смежными для моделирующих устройств и цифровых вычислительных машин.

Отдельные устройства

Можно считать, что структура вычислительных машин в настоящее время уже достаточно определилась. В каждой цифровой вычислительной машине мы имеем арифметическое устройство и устройство управления, запоминающее устройство, устройство ввода и вывода. Однако сами эти устройства весьма разнообразны и, в связи со стремлением ускорить работу машины и сделать ее более надежной и удобной, непрерывно изменяются.

Как уже указывалось выше, для вычислительных машин, выполняющих научные расчеты, большое значение имеет объем запоминающего устройства и время выборки из него. Естественно поэтому то внимание, которое уделяется конструкторами разработке запоминающих устройств.

В последнее время совершенно отчетливо намечился переход к конструкциям запоминающих устройств на ферритах. Такие устройства ставятся почти на всех новых машинах, находящихся в разработке или производстве. Запоминающее устройство на ферритах на 20 000 знаков со временем выборки $17 \mu \text{сек}$, предполагается поставить в машине ИБМ-705. Такое же устройство на 104 000 разрядов (2000 чисел) со временем выборки $10 \mu \text{сек}$ ИБМ-305. По сообщению фирмы, емкость этого запоминающего устройства составляет 5—6 млн. знаков. Запоминающее устройство состоит из 50 дисков, установленных на общей вертикальной оси, с записью данных на концентрических дорожках с обеих сторон диска. Головка для записи и считывания расположена сбоку дисков. Электронное устройство в зависимости от выбранной стороны диска и дорожки управляет положением головки с помощью пневматического привода. Для создания необходимого зазора между головкой и диском, а также для предохранения магнитного слоя дорожки через головку проходит воздух под давлением, который по выходе из нее создает воздушную подушку. Если судить по опубликованным фотоснимкам, диаметр диска составляет около 500 мм, а расстояние между дисками около 9 мм. При таких размерах дисков указываемая фирмой емкость запоминающего устройства может быть реализована, если на каждом диске с каждой его стороны имеется 10—15 дорожек для записи данных. Сообщается, что такого рода устройства будут также использованы в машинах ИБМ-705.

Продолжается работа и по более медленным запоминающим устройствам на магнитных лентах. Эти устройства приобретают большое значение для цифровых вычислительных машин, используемых для статистических расчетов и вообще для задач, требующих обработки большого количества данных.

Вычислительная машина ИБМ-702 имеет в своем составе запоминающее устройство на магнитной ленте, позволяющее записывать и считывать 15000 цифровых или буквенных знаков в секунду. Каждая катушка магнитной ленты содержит более 5 млн. знаков. В машине ИБМ-702 предусматривается возможность использования более 100 таких устройств, с общим объемом памяти свыше 500 млн. знаков. Машина РАЙКОМ фирмы «Райтеон» использует широкую магнитную ленту (75 мм), позволяющую вести запись на 31 дорожке. Катушка ленты содержит около 34 млн. десятичных цифр. Данные могут считываться и записываться со скоростью 56 000 десятичных цифр в секунду¹.

Весьма большое внимание привлекают к себе устройства ввода и вывода. Повидимому, эти устройства до сего времени являются одним из наиболее слабых мест в вычислительных машинах. По американским данным, не менее 75% ошибок при расчетах получается в результате плохой работы устройств ввода и вывода. Разработка этих устройств, изыскание новых более совершенных и производительных конструкций ведется все время, хотя уже и сейчас имеется большое количество удобных вводных и выводных устройств, облегчающих работу на машинах.

Из устройств ввода хорошо зарекомендовало себя фотооптическое вводное устройство фирмы «Ферранти», применяемое в настоящее время во всех европейских цифровых машинах. Это устройство позволяет осуществлять ввод данных с перфорированной ленты со скоростью 200 знаков в секунду. Некоторое представление о вспомогательных устройствах дают устройства, выпускаемые американской фирмой «Ремингтон Рэнд» для работы с машинами УНИВАК. Среди них имеются устройства, преобразующие запись с магнитной ленты на перфокарты. Преобразователь автоматически переносит на перфокарты данные, записанные на магнитной ленте. Скорость работы преобразователя 75—120 перфокарт в минуту. Имеется также преобразователь записи с перфокарт на магнитную ленту. Преобразователь снабжен контрольными приспособлениями, которые проверяют запись и в случае обнаружения ошибки дают предупредительный сигнал. В записывающем устройстве «Унитайпер II» (рис. 9) удары по клавишам преобразуются в определенную

¹ Electronics, 1955, vol. 28, No. 6, P. 123—131

последовательность электрических импульсов, которые записываются на магнитную ленту. Одновременно на машинке печатается копия. Устройство для записи на магнитную ленту смонтировано сзади. Имеется большое количество разнообразных устройств для наглядного изображения данных, получаемых при расчетах: построителей графиков и т. п. Несомненно, что все эти вспомогательные устройства весьма существенным образом облегчают работу на вычислительных машинах.

Использование полупроводниковых элементов

Одним из основных вопросов, стоящих перед конструкторами вычислительных машин, является использование в вычислительной технике полупроводниковых триодов. Преимущества, которые дают полупроводниковые триоды в вычислительных устройствах, настолько велики, что использование их представляется весьма заманчивым.



Рис. 9

Однако до сего времени еще нельзя считать, что все трудности, связанные с широким использованием полупроводниковых триодов, преодолены. В большинстве стран идет интенсивная работа по созданию вычислительных устройств на полупроводниковых триодах. Построены опытные машины; некоторые конструкции, повидимому, в ближайшее время будут выпускаться серийно, например, машина ИБМ-608, представляющая собой полупроводниковый вариант известной машины ИБМ-604.

Особенно большое значение имеет использование полупроводниковых триодов для специализированных, в частности, авиационных машин. Опубликованы сведения о постройке специализированных машин на полупроводниковых триодах для управления самолетом.

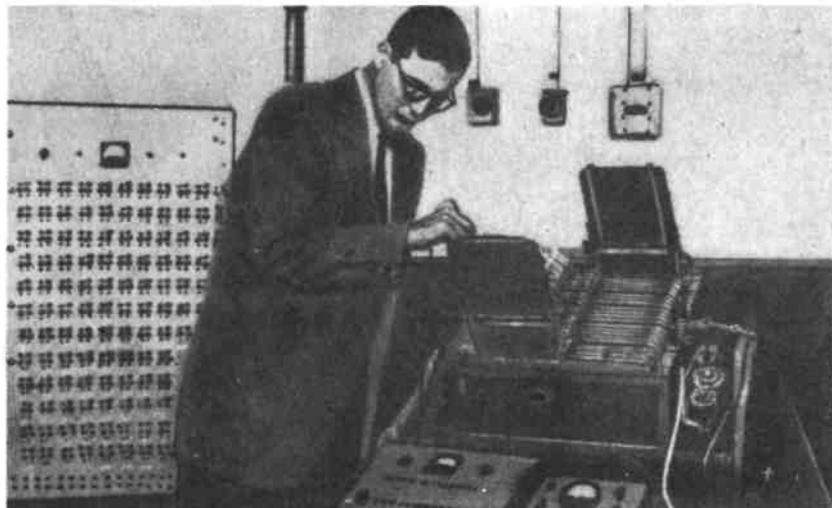


Рис. 10

Так, например, американская фирма «Норт-Американ» (North American Aviation Inc.) разработала и успешно провела полетные испытания новой самолетной цифровой вычислительной машины на полупроводниковых триодах, изготовленной для ВВС США (рис. 10). Машина занимает объем $0,085 \text{ м}^3$ и весит около 57 кг. Потребляемая ею мощность 100 вт. Такая же машина на электронных лампах была бы в четыре раза больше по весу и потребляла бы 3000 вт.

Для большей надежности, удобства обслуживания и быстрой замены все схемы в машине изготовлены на 51 стандартной панели. Машина может интегрировать одновременно 93 величины.

Запоминающее устройство рассчитано на 20 000 знаков; рабочая частота 50 кГц. В машине имеется 1000 полупроводниковых триодов и 3500 диодов.

В настоящее время работа по использованию полупроводниковых триодов в вычислительных машинах находится в своей начальной стадии, и, несомненно, в ближайшее время мы будем иметь много интересных результатов в этой области.

Заключение

Прошедшие после конца второй мировой войны десять лет были периодом бурного развития новой вычислительной техники. Опыт постройки и эксплуатации большого количества электронных вычислительных машин позволил более правильно оценить различные проблемы, возникавшие в процессе создания и наладки этих машин.

Несколько лет назад весьма большое внимание уделялось тем трудностям, которые связаны с программированием задач для решения их на электронных вычислительных машинах. Как известно, высказывались даже такие точки зрения, что огромные затраты времени и сил на программирование задач не позволят широко развиваться цифровой вычислительной технике и во многих случаях заставят обращаться к моделирующим устройствам, не требующим сложных программ. В настоящее время, в связи с развитием автоматического программирования при помощи самих вычислительных машин, созданием больших библиотек стандартных программ, разработкой специальных программ «компиляторов», «интерпретаторов» и т. п., этот вопрос в значительной степени потерял свою остроту. Несмотря на то, что трудности программирования остаются весьма большими, есть все основания предполагать, что они с течением времени будут уменьшаться за счет все более широкого применения стандартных программ и методов автоматического программирования.

Другим вопросом, вызывавшим большие споры в первый период возникновения электронных вычислительных машин, являлся вопрос о надежности работы этих машин. Все мы помним мрачные предсказания скептиков, утверждавших, что электронные устройства с несколькими тысячами ламп не могут удовлетворительно работать. В настоящее время и этот вопрос можно считать практически разрешенным. Летом 1956 г. в Мичиганском университете в США было проведено любопытное обследование работы ряда электронных вычислительных машин на основании тех мнений и сведений, которые сообщили о них потребители. Из этих сведений вытекает, что машины работают весьма надежно. Так, например, машина ИРА-1103, эксплуатируемая корпорацией «Витро», проработала более 43 часов без единой ошибки, за исключением нескольких отказов перфорирующего механизма для ленты. Машина ИБМ-650, эксплуатируемая фирмой «Локхид», регулярно работает без наблюдения конца субботы и воскресенье, не делая никаких ошибок¹.

По американским данным, в современных вычислительных машинах одна ошибка приходится на 10 млн. операций; в тех машинах, которые разрабатываются в настоящее время, можно предполагать, что одна ошибка будет приходиться на 100 млн. операций (около 3 час. работы при скорости 10 000 операций в сек.). Для сравнения можно отметить, что опытный вычислитель делает в среднем одну ошибку на 100 операций.

Можно рассчитывать, что переход на ферритовые запоминающие устройства существенно уменьшит вероятность ошибок.

Но если вопрос о надежности работы машины не вызывает сейчас особого беспокойства, то серьезное внимание должно быть уделено более сложной проблеме накопления ошибок как от округления, так и методических. При том огромном количестве операций, которое необходимо для решения сложных математических задач, этот вопрос приобретает существенное значение, и разработка методов оценки этих ошибок как теоретическим путем, так и при помощи самой машины является одной из важных задач сегодняшнего дня. Американские специалисты считают, в частности, весьма удобным для экспериментального исследования ошибок округления такие машины, как ИБМ-702 и ИБМ-705, в которых длина числа может произвольно меняться.

За последнее время наметились некоторые успехи в использовании электронных вычислительных машин для решения сложных логических проблем такого, например, типа как перевод с одного языка на другой. В частности, в Академии наук СССР не так давно были проведены опыты автоматического перевода с английского языка на русский на машине БЭСМ. При постановке этой работы имелось в виду проверить возможность перевода научно-технического текста при помощи машины. Для перевода был разработан словарь, содержащий около 1000 слов и синтаксические правила, обеспечивающие возможность составления программы. Для перевода брался текст из книги Милна «Численное решение дифференциальных уравнений». Опыт показал, что выбранный словарь достаточен для перевода, что же касается синтаксических правил и программы, то они практически не зависят от словаря, это было проверено при помощи перевода отрывка из газеты «Таймс»; каких-либо изменений или дополнений в программу не потребовалось. Эти первые опыты позволяют надеяться на создание в скором времени специализированных машин для автоматического перевода.

Можно не сомневаться, что дальнейшее развитие вычислительной техники в ближайшие годы позволит решить такие задачи, которые некоторое время тому назад казались совершенно неразрешимыми.

¹ «Control Engineering», 1955, vol. 3, № 1, P. 70.

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Математические методы широко используются в науке и технике, однако решение многих важных задач связано с таким большим объемом вычислений, что при обычном ручном счете с помощью арифмометров или настольных клавишных машин, т. е. с помощью так называемых ручных средств, такие задачи оказывались практически неразрешимыми.

Изобретение электронных вычислительных машин, позволяющих производить вычисления с невиданной ранее скоростью, совершило переворот в применении математики для решения важнейших проблем физики, механики, астрономии, химии и т. д.

Современные универсальные электронные вычислительные машины совершают тысячи, десятки тысяч арифметических и логических действий в секунду и заменяют труд десятков и сотен тысяч вычислителей, работающих с настольными клавишными вычислительными машинами. За несколько часов на электронной машине выполняется столько расчетов, сколько опытный вычислитель не сможет сделать за всю свою жизнь.

Кроме высокой скорости исполнения арифметических и логических действий, универсальные электронные счетные машины дают возможность решать разнообразнейшие задачи на одной и той же машине. Эти машины, помимо громадного увеличения производительности труда, позволяют решать такие задачи, которые ранее считались невыполнимыми.

Сложные вычислительные работы, выполняемые с громадной скоростью на электронных машинах, дают в области умственного труда такие экономии и увеличение возможностей человеческого творчества, какие сравнимы только с применением машинного производства вместо физического труда.

Электронная машина, действующая по заранее определенной человеком программе, естественно, лишена творческих возможностей. Применение машин имеет целью не замену человека машиной, а огромное увеличение возможностей человека в результате применения машин.

Широкое использование электронных вычислительных машин в научно-исследовательских институтах, конструкторских бюро и проектных организациях открывает неограниченные возможности в решении народнохозяйственных задач.

Электронные счетные машины являются мощным орудием в руках человека. Трудно переоценить значение этих машин для нашей страны, строящей коммунистическое общество, в познании человеческим разумом явлений природы и использовании их на благо человечества.

Перед советскими инженерами и математиками открыты огромные перспективы в развитии принципов работы и конструкций вычислительных машин, а также их применения и эксплуатации.

Универсальные электронные вычислительные машины являются чрезвычайно мощным аппаратом для исследования, и именно это определило их бурное развитие. Элементы машин и сами машины непрерывно совершенствуются. Если на первом этапе для создания машин заимствовались элементы, разработанные ранее для других областей техники, то в дальнейшем создаются и развиваются специальные элементы для вычислительной техники. Разработка таких элементов в значительной мере определяет типы и характеристики машин.

Требования со стороны математиков и необходимость решения все более и более сложных задач форсирует разработку новых принципов построения более современных машин и их элементов.

Действительно, если мы обратимся к истории развития электронных вычислительных машин, то увидим, как разработка того или иного элемента или принципа построения машины влияла на характер конструкции машин, их характеристику и возможности. В первой электронной американской машине ЭНИАК были в основном использованы триггерные ячейки, хорошо разработанные для других областей техники. В значительной мере использование триггерных ячеек получило отражение в малой электронной счетной машине (МЭСМ) АН УССР.

Появление запоминающих устройств на электроакустических трубках привело к созданию ряда машин последовательного действия как с точки зрения выборки самих чисел последовательно из запоминающего устройства, так и с точки зрения выполнения арифметического устройства последовательного действия. Это обуславливалось теми соображениями, что при данном виде памяти основное время в работе машины уходило на выборку чисел из запоминающего устройства. Поэтому не было никакого смысла увеличивать скорость выполнения арифметических действий, так как скорость машины от этого существенно не повысилась бы.

Примером машин такого класса может служить английская машина ЭДСАК, т. е. последовательная машина с запоминающим устройством на электроакустических трубках. Машины этого класса имеют скорость порядка 1—2 тыс. операций в секунду.

Разработка запоминающих устройств на электронно-лучевых трубках привела к развитию более быстродействующих машин, т. е. машин параллельного действия (БЭСМ АН СССР, «Стрела» Министерства приборостроения и средств автоматизации СССР, М-2 АН СССР).

Машины этого типа обладают скоростью несколько тысяч операций в секунду. Так, например, на БЭСМ время стандартного цикла выполнения одной команды составляет $77 \mu \text{сек}$, что примерно соответствует 13 тыс. операций в секунду, а средняя скорость при решении сложных задач, включая сюда обращения к магнитному барабану и магнитным лентам, составляет 7—8 тыс. трехадресных операций в секунду. Скорости машин «Стрела» и М-2 — 2 тыс. операций в секунду. Достигнутые скорости далеко не являются пределом при данном виде запоминающего устройства на электронно-лучевых трубках.

Применение в качестве памяти электронно-лучевых трубок в значительной мере определяет емкость оперативной памяти, т. е. количество чисел или команд, которые могут храниться в запоминающем устройстве. Эта величина определяется числом точек, которые могут быть записаны на экране одной трубки, и составляет для машин БЭСМ и «Стрела» 1024 точки, для машины М-2 — 512 точек.

Увеличение емкости оперативной памяти за счет дублирования трубок большинством конструкторов машин признается нецелесообразным, поскольку такой метод увеличения емкости памяти приводит к существенному увеличению количества аппаратуры, а следовательно, усложняет машины.

Работы по увеличению емкости запоминающего устройства на данном виде памяти ведутся по линии

увеличения разрешающей способности электронно-лучевых трубок, т. е. по линии увеличения количества точек, которое может быть записано на одной трубке. В настоящее время уже получены положительные результаты по увеличению емкости трубки до 2048 точек, т. е. емкость памяти будет составлять 2048 чисел. Достаточно успешно ведутся также работы по дальнейшему увеличению емкости данного вида запоминающих устройств до 4000.

Запоминающие устройства на магнитном барабане показали большую надежность в эксплуатации при относительно малом количестве аппаратуры и сравнительно большой емкости хранимых чисел. Эти обстоятельства привели к созданию класса сравнительно медленно действующих электронных вычислительных машин со скоростью порядка сотен операций в секунду, но обладающих значительно меньшим количеством аппаратуры, т. е. более простых машин. Скорость в машинах данного класса в основном определяется временем, которое нужно затратить на выборку требуемых чисел с магнитного барабана. Эта скорость в основном определяется скоростью вращения барабана. Естественно, что она будет значительно ниже, чем у запоминающих устройств на электроакустических трубках, не говоря уже о запоминающем устройстве на электронно-лучевых трубках.

Простота и надежность этого вида памяти на магнитном барабане позволили создать довольно большое число более простых машин с меньшим количеством аппаратуры. Одним из видов такой машины может служить машина «Урал» Министерства приборостроения и средств автоматизации СССР, совершающая 100 одноадресных операций в секунду, что эквивалентно примерно 50 трехадресным операциям в секунду.

Требование повышения емкости запоминающего устройства, вызванное решением сложных задач, привело к созданию в быстродействующих машинах дополнительной или, как ее часто называют, внешней памяти, более простой, чем оперативная память, но, естественно, конечно, и более медленно действующей. В основном для большинства машин в качестве такой внешней памяти используются магнитные барабаны и магнитные ленты. Характер работы внешней памяти существенно отличается от характера работы оперативной памяти, где требуется выбирать каждое число, которое участвует в расчете. Внешняя же память служит как бы только хранилищем для чисел и команд, требующихся для решения той или иной задачи. По мере необходимости, группа чисел или команд передается с внешней памяти в оперативную, на которой и производятся необходимые вычисления. Полученные результаты могут быть переданы с оперативной памяти на внешнюю и использоваться при дальнейших подсчетах. Таким образом, режим работы внешней памяти сводится лишь к обмену групп чисел или команд с оперативной памятью, в непосредственном же вычислении внешняя память не участвует. Благодаря такому режиму сравнительно небольшая скорость работы внешней памяти мало сказывается на средней скорости работы машины.

Если сравнить соотношения между памятью на магнитном барабане и магнитной ленте, то можно сделать вывод, что магнитный барабан является более оперативным видом внешней памяти, чем магнитная лента, поскольку в любой момент может быть считана или записана требуемая группа чисел или команд. В случае магнитной ленты необходимо предварительно подвести ленту к тому месту, где записана группа чисел, и только после этого можно производить запись или считывание. Кроме того, магнитный барабан более надежен в работе, чем магнитная лента. Однако магнитные ленты имеют значительно большую емкость хранимых чисел, чем магнитный барабан. Если учесть, что ленты можно менять, то емкость запоминающих устройств на магнитных лентах практически следует считать неограниченной, что является существенным преимуществом магнитных лент по сравнению с магнитным барабаном.

В зависимости от назначения машины, требований и задач, которые на ней решаются, в универсальных машинах применяется тот или другой вид внешнего запоминающего устройства. Так, на БЭСМ имеется магнитный барабан с емкостью на 5120 чисел и четыре магнитофона с лентами, на которых может храниться свыше 120 тыс. чисел. На «Стреле» имеются два устройства с магнитными лентами общей емкостью 200 тыс. чисел. На машине М-2 в качестве внешней памяти используются магнитные ленты с емкостью 50 тыс. чисел.

Большая скорость вычислений на современных электронных машинах часто требует быстрого вывода большого числа полученных результатов, а также удобного ввода исходных данных и программ. Поэтому вводные и выводные устройства имеют серьезное значение в общей характеристике работы машин.

Для вводных и выводных устройств используется как существующая аппаратура, так и новые разрабатываемые виды устройств, специально приспособленные для вычислительной техники.

В БЭСМ в качестве вводного устройства используется перфолента, а для вывода результатов разработано специальное быстродействующее фотопечатающее устройство, применяемое для выдачи больших массивов полученных результатов. Кроме фотопечатающего устройства, предусмотрено также электромеханическое печатающее устройство для печати контрольных значений и печати результатов в случае их малого количества по сравнению с объемом вычислений.

В машине «Стрела» применяются вводные и выводные устройства на перфокартах с последующей печатью результатов с перфокарт вне машины.

В машине М-2 в качестве вводных и выводных устройств используется модифицированная телеграфная аппаратура.

Разработка и применение новых элементов для вычислительной техники позволяет существенно улучшить характеристики универсальных вычислительных машин. Здесь особенно большое значение имеют полупроводниковые элементы.

Логические схемы на полупроводниковых диодах позволяют существенно сократить число электронных ламп в машине, не снижая ее быстродействия. Весьма перспективным является применение полупроводниковых триодов вместо электронных ламп.

Работы в области ферритовых сердечников находят практическое применение в первую очередь для создания запоминающих устройств универсальных машин.

Применение новых элементов в вычислительной технике приводит к резкому сокращению аппаратуры и повышению надежности работы электронных машин. В связи с этим, возможно, придется пересмотреть вопрос о малых электронных машинах с запоминающим устройством на магнитном барабане и имеющих скорость порядка сотен операций в секунду. Такая скорость вычислений в большинстве случаев недостаточна для решения практических задач.

Использование ферритовых сердечников для запоминающих устройств и применение полупроводниковых элементов позволит создать машины с значительно большим быстродействием и требующих одного — двух

человек для их обслуживания.

Электронные вычислительные машины в настоящее время находятся в стадии бурного развития. Каковы же направления этого развития?

Нам представляется, что основными направлениями развития универсальных математических машин являются следующие: 1) повышение быстродействия машин; 2) увеличение емкости запоминающего устройства; 3) повышение надежности работы и 4) упрощение математической и технической эксплуатации машин.

Под математической эксплуатацией машин мы подразумеваем упрощение логики машин, разработку более совершенных типов машин в отношении логики программирования и решения математических задач.

Остановимся кратко на этих основных вопросах.

Повышение быстродействия электронных математических машин вызывается необходимостью решения на них все более и более сложных задач с большим числом операций. Это обстоятельство настоятельно диктует повышение скорости выполнения операций на машинах.

Повышение быстродействия в основном может происходить за счет ускорения выполнения отдельных операций на электронных машинах. Основными моментами, определяющими быстродействие машин, являются выборка чисел из запоминающего устройства и время, требуемое для непосредственного выполнения арифметических и логических действий. Помимо этого, повышение быстродействия может быть также получено за счет совмещения отдельных операций в машине и, в частности, совмещения выборки чисел из запоминающего устройства с одновременным выполнением арифметических и логических действий.

Повышение скорости выполнения арифметических и логических действий может быть осуществлено как за счет повышения быстродействия отдельных элементов основного арифметического устройства, так и за счет создания более рациональных логических схем выполнения этих действий. Кроме того, повышение быстродействия арифметического устройства может быть получено вследствие усложнения его логической схемы.

С точки зрения повышения быстродействия непосредственно самих элементов арифметического устройства заслуживает внимания применение импульсного принципа работы отдельных элементов арифметического устройства.

Следует иметь в виду, что существенное повышение быстродействия элементов арифметического устройства, как правило, приводит к увеличению мощности, а следовательно, и к применению более сложных и менее надежных электронных ламп. Однако повышение быстродействия за счет логической структуры арифметического устройства позволяет получить существенное ускорение выполнения операций при сравнительно умеренном увеличении аппаратуры. Так, в частности, путем видоизменения операций умножения можно добиться значительного сокращения времени на выполнение этого действия.

Для машин с плавающей запятой существенное значение имеет сокращение времени сложения, как наиболее часто встречающейся операции. Кроме того, на машинах с плавающей запятой, помимо выполнения непосредственно самого сложения, приходится производить также предварительное выравнивание порядка и нормализацию результата.

Сокращение этих операций позволит также поднять общую скорость работы машины. Имеющиеся в этом направлении возможности далеко еще не использованы.

Следует также отметить, что с точки зрения повышения быстродействия целесообразнее отрицательные значения чисел представлять обратным, а не дополнительным кодом. Это связано с тем обстоятельством, что преобразование прямого кода в дополнительный является арифметическим действием и обычно отнимает больше времени, чем непосредственное обращение прямого кода в обратный.

Вторым фактором, определяющим скорость работы машины, является время обращения к запоминающему устройству. При трехадресной системе команд для выполнения одного действия приходится обращаться 4 раза к запоминающему устройству. Таким образом, время обращения к запоминающему устройству имеет существенное значение для оценки общей скорости работы машины.

Следует отметить, что выбор адресности в системе команд мало сказывается на суммарном времени обращения к запоминающему устройству. Действительно, при одноадресной системе команд для выполнения одной операции приходится дважды обращаться к запоминающему устройству: один раз для вызова числа, другой — для вызова следующей команды. Но так как при одноадресной системе команд для выполнения заданных вычислений требуется примерно в 2 раза большее число команд, то суммарное время обращения к памяти остается примерно таким же, как и в трехадресной системе. В значительной мере это относится также и к двухадресной системе команд.

Таким образом, с точки зрения адресности команд, время, затрачиваемое на работу запоминающего устройства, практически остается без изменения.

Одним из решений уменьшения времени обращения к запоминающему устройству является создание дополнительной сверхбыстродействующей памяти сравнительно небольшой емкости. Повышение быстродействия памяти обычно приводит к увеличению аппаратуры, но если емкость быстродействующей памяти сделать сравнительно небольшой, то можно без значительного увеличения аппаратуры существенно уменьшить время обращения к памяти. Создание такой памяти позволит сократить время для выполнения отдельных стандартных вычислений (подсчет специальных функций, вычисление по алгебраическим формулам и т. д.).

Некоторые возможности повышения скорости имеются также в случае использования принципа совмещения операций. Выполнение арифметических действий в значительной мере может быть совмещено по времени с обращением к памяти. При этом возможно также отказаться от стандартного цикла выполнения операций, когда вызов следующей команды производится после отсылки результата в запоминающее устройство. Так, например, в БЭСМ цикл машин состоит из следующих операций: вызов первого числа, вызов второго числа и последующее арифметическое действие с ними. Затем результат отсылается в запоминающее устройство и только тогда вызывается следующая команда.

Если изменить такой порядок чередования цикла, а именно, третьим сделать не отсылку результата, а вызов следующей команды, то на выполнение арифметического действия останется большее время, т. е. значительно легче будет совместить выполнение арифметических действий и обращение к памяти.

Возможное ускорение работы машины за счет совмещения вызова команд и чисел по двум независимым каналам также может дать сокращение времени, но при этом теряется возможность совмещения выполнения арифметического действия с вызовом команд. Однако отдельные каналы для вызова чисел и команд приводят к увеличению аппаратуры и требуют разделения памяти на две части, что несколько уменьшает гибкость машины.

Арифметическое устройство машины используется по существу лишь наполовину своего времени (например, при трехадресной системе команд). Действительно, арифметическое действие с числами можно производить лишь после того, как вызваны оба числа, т. е. половину цикла работы машины арифметическое устройство не работает. Поэтому следует видоизменить структуру и использование машины с тем, чтобы арифметическое устройство работало все время, а не только половину времени.

Кое-какие возможности в этом направлении имеются, но предложить какое-либо определенное решение пока еще не представляется возможным.

В особых случаях, когда требуется повышенное быстродействие машины, возможно, окажется целесообразным дублирование отдельных устройств машины; при этом существенное значение будет иметь соотношение между скоростями выполнения арифметических действий и обращения к запоминающему устройству.

Лимитирующим фактором в скорости машин является время обращения к запоминающему устройству. Большинство арифметических и логических действий может быть выполнено без дополнительного времени, т. е. за счет совмещения выполнения арифметических действий с обращением к памяти. Однако дальнейшее повышение быстродействия запоминающих устройств и введение сверхбыстродействующей памяти могут в корне изменить это соотношение, и окажется целесообразным создавать не одно, а несколько арифметических устройств машины при той же самой памяти и, таким образом, за счет лишь частичного увеличения аппаратуры машины существенно повысить ее быстродействие.

Повышение быстродействия запоминающего устройства может вызвать также пересмотр системы представления чисел в системе машины. Возможно, что выполнение арифметических действий с плавающей запятой вызовет существенное замедление общей скорости работы машины и в тех случаях, когда требуется большое быстродействие, целесообразнее будет переходить на машины с фиксированной запятой, хотя это и создает некоторые осложнения при математической эксплуатации.

Расширение круга задач, решаемых на машинах, и особенно многомерных задач математической физики, помимо повышения скорости, требует также увеличения емкости запоминающих устройств.

До последнего времени увеличение емкости запоминающих устройств шло по линии создания промежуточной или так называемой внешней, менее быстродействующей, чем основная, памяти, но зато и требующей меньшего количества аппаратуры, т.е. запоминающего устройства на магнитных барабанах и на магнитных лентах. Такое разделение вызывалось необходимостью применения в качестве оперативного запоминающего устройства для быстродействующих машин электронно-лучевых трубок. Емкость такого запоминающего устройства определялась разрешающей способностью электронно-лучевых трубок. Следовательно, увеличение емкости вызывало существенное увеличение аппаратуры.

Появление запоминающих устройств на ферритовых сердечниках, которые, видимо, на ближайшее время будут являться основным видом запоминающих устройств для быстродействующих машин, позволит увеличить емкость запоминающего устройства без существенного увеличения электронной аппаратуры.

Однако увеличение емкости оперативной памяти не может полностью решить вопроса о создании достаточной емкости памяти для решения сложных задач. Поэтому промежуточная медленно действующая память на магнитных барабанах и ленте, повидимому, сохранит свое значение и в дальнейшем для универсальных электронных машин.

Опыт эксплуатации машин показал, что магнитные барабаны являются более надежным запоминающим устройством, чем магнитные ленты. Однако недостатком магнитного барабана является малая емкость, по сравнению с магнитными лентами. В этом направлении далеко еще не использованы все возможности. Поэтому создание запоминающих устройств на магнитных барабанах с повышенной емкостью хранимых чисел и с повышенной скоростью выборки массивов чисел является одной из задач дальнейшего развития вычислительных машин.

Существенное значение запоминающих устройств для дальнейшего совершенствования вычислительных машин требует усиления работы в области как повышения скорости и емкости уже известных видов памяти, так и разработки и исследования новых элементов и принципов. В частности, может получить практическое применение использование сегнетоэлектриков для создания малогабаритных видов запоминающих устройств с большим быстродействием и большой емкостью.

Надежность работы электронных вычислительных машин имеет большое значение при их эксплуатации. Повышение надежности работы может быть осуществлено за счет повышения надежности отдельных элементов, из которых составляется машина. С целью повышения надежности работы элементов следует стремиться к максимальному сокращению аппаратуры электронных машин и в первую очередь электронных ламп. В этом отношении заслуживает внимания машина М-2, которая имеет существенно меньшее количество электронных ламп (около 1600) при достаточно высокой скорости.

Правильный выбор режимов работы электронных ламп, а также создание достаточных запасов в отношении разброса и изменения характеристик ламп приводит к тому, что даже электронные элементы могут быть сделаны достаточно надежными.

Не все элементы, применяемые в электронных машинах, обладают одинаковой надежностью. Поэтому при создании машин целесообразно уменьшить количество менее надежных элементов за счет увеличения числа более надежных элементов.

Опыт эксплуатации машин показал, что германиевые диоды являются весьма надежным элементом в машинах. Так, например, из 10 тыс. германиевых диодов, установленных в БЭСМ, в течение двухлетней эксплуатации вышло из строя лишь единичное количество диодов. Это указывает на то, что применение германиевых диодов даже в больших количествах не понижает надежности работы машин и многие электронные элементы, в основном применяемые для логических схем, с успехом могут быть заменены элементами на германиевых диодах. При этом успешное решение задачи может быть получено лишь при соответствующем сочетании ламповых элементов с элементами на германиевых диодах.

Заслуживает внимания применение импульсного принципа и замена статических триггерных ячеек на импульсные так называемые динамические триггеры. Динамические триггерные ячейки с трансформаторным выходом обладают низким выходным сопротивлением, что позволяет хорошо сочетать их с логическими элементами на германиевых диодах. Кроме того, применение динамических триггерных ячеек позволит существенно сократить количество электронных ламп, так как схема динамического триггера требует меньшего количества колб.

Следует также пересмотреть вопросы контроля работы машин. Принятая у нас практика логического контроля в целом представляется правильной, так как создание схем аппаратного контроля на все элементы машины сильно усложнило бы структурную схему машины и значительно увеличило бы количество аппаратуры, в результате чего мы имели бы не повышение надежности, а ее уменьшение. Однако, возможно, окажется целесообразным для отдельных, менее надежных по сравнению с другими, устройств вводить частичный аппаратный контроль, который не приведет к значительному усложнению структурной схемы машины и увеличению аппаратуры.

В случае введения аппаратного контроля для отдельных устройств машины целесообразно предусматривать такую схему аппаратного контроля, которая бы не только констатировала наличие ошибки, но и автоматически восстанавливала бы правильное значение числа, т.е. не вызывала бы остановку машины.

Анализ осуществления и целесообразность применения подобиных методов аппаратного контроля для отдельных устройств машины, естественно, должны быть проверены конкретными разработками.

Для обеспечения надежной работы электронных вычислительных машин существенное значение приобретают методы профилактической проверки машины, создание ухудшенных режимов работы для электронных ламп, разработка тестовых программ, позволяющих достаточно быстро определять малонадежные элементы в машине и проверяющих все элементы машины в условиях, аналогичных работе машины при вычислениях. В этом направлении проведено большое число работ и получены неплохие результаты. Однако дальнейшая разработка данного вопроса позволит еще больше повысить надежность и использование машин.

В условиях развития электронных вычислительных машин намечается тенденция к упрощению ряда логических функций. Если раньше для каждого изменения адреса команды использовалась индивидуальная логическая команда и определение количества повторений циклов осуществлялось путем введения дополнительного счетчика или путем модификации какой-либо команды, то в настоящее время при создании машин стремятся к тому, чтобы изменение адресов команд и задание числа повторения циклов осуществлялось бы автоматически, путем введения соответствующих признаков кода адресов и более простого задания числа повторений в цикле.

Помимо удобств при программировании, которые дает такое автоматическое изменение адресов команд, при этом получается также некоторое повышение скорости работы машин за счет совмещения выполнения ряда логических действий с непосредственным выполнением арифметических действий. Точно так же получается некоторое сокращение команд в программе. Автоматизация выполнения логических действий должна сыграть также положительную роль в отношении упрощения автоматизации составления программ.

Помимо этих вопросов, необходимо обратить внимание на развитие логики электронных вычислительных машин, в целях дальнейшего упрощения автоматического составления программ и возможности решения на машине математических задач в их общей формулировке.

В развитии логики машин имеются еще далеко не использованные возможности.

Повышение скорости вычислений повышает также требования к выводным устройствам машины, поэтому необходимо дальнейшее развитие работ по созданию быстродействующих выводных устройств.

Представляется целесообразным также дальнейшее развитие в области повышения оперативности фотопечатающих выводных устройств и создания быстродействующих электромеханических печатающих устройств.

В создании электронных вычислительных машин в настоящее время явно установился принцип мелкоблочного построения машин, т.е. схемы электронных машин собираются из отдельных блоков.

Нам кажется, что накопленный нами значительный опыт по созданию и эксплуатации электронных вычислительных машин, позволяет сейчас поставить вопрос о типизации отдельных элементов и узлов электронных вычислительных машин. Вместе с этим возросшие потребности в электронных вычислительных машинах, а также отдельные специфические требования, которые предъявляются к применению электронных машин той или другой организацией, должны привести к привлечению широкого круга специалистов и организаций к разработке и созданию новых типов машин.

Для того чтобы облегчить организациям создание новых типов машин, целесообразно опираться на разработанные стандартные типовые элементы и добиться того, чтобы наряду с изготовлением машин организовать в промышленности также производство отдельных элементов и узлов машин. Наличие стандартных элементов и узлов облегчит создание новых типов машин в различных организациях и тем самым существенно расширит объем работ по электронным вычислительным машинам. Можно надеяться, что в ближайшее время у нас появится довольно большое количество различных типов машин, особенно если будет организовано производство стандартных элементов.

Необходимо несколько остановиться на классах машин. Для ряда сложных задач нужны сверхбыстродействующие электронные вычислительные машины, обладающие большими емкостями памяти и массивами внешней памяти, т.е. высокопроизводительные электронные вычислительные машины. Наряду с этим, должен получить широкое развитие класс машин сравнительно средней производительности со скоростями порядка тысяч операций в секунду, однако главную роль здесь будет играть не скорость, а объем оборудования, т.е. емкость запоминающих устройств, объем вводных и выводных устройств и т.д. Такой класс машин должен быть рассчитан на широкий круг проектных и других организаций.

Необходимо также создавать машины для ручного использования, т.е. совсем маленькие, простые настольные машины, обладающие значительно пониженной скоростью операций.

*
*
*

В связи с большим развитием работ по электронным вычислительным машинам особую остроту приобретает вопрос о подготовке кадров и более широкой публикации работ в области вычислительной математики и техники. Хотя наши высшие учебные заведения и готовят большое число специалистов в этой области, однако, этого явно недостаточно. Представляется целесообразным создание в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР краткосрочных курсов подготовки программистов по вопросам программ и решению конкретных задач.

Создание таких постоянно действующих курсов было бы весьма полезным вкладом для вычислительной техники и математики.

Необходимо расширить также курсы для специалистов по технической эксплуатации и наладке электронных вычислительных машин с практическим прохождением наладки машин, более широко организовать обмен опытом между отдельными организациями, занимающимися вычислительной техникой и вычислительной математикой, расширить положительный опыт прикомандирования сотрудников к ведущим организациям. Особенно большое внимание должно быть уделено помощи периферийным организациям. Во всех этих вопросах большую роль должен сыграть Вычислительный центр Академии наук СССР.

Не менее важное значение имеет вопрос издания учебников и учебных пособий по вычислительной технике, программированию, методам численного анализа применительно к машинам. Дело чести наших специалистов, несмотря на всю их загруженность, в кратчайшие сроки написать такие учебники и учебные пособия. Необходимо также расширить публикацию работ по отдельным вопросам вычислительной техники и вычислительной математики в наших журналах и трудах.

**РЕШЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ**

Опыт применения быстродействующих вычислительных машин по времени еще весьма невелик. Однако возможности новой вычислительной техники позволили за это короткое время провести огромный объем вычислительных работ. При этом обнаружилось такие свойства имеющихся вычислительных методов, которые раньше оставались незамеченными. Возник ряд острых математических проблем даже в отношении старых вычислительных методов.

Постановка новых задач большой математической сложности вызвала необходимость разработки новых методов их решения. Поэтому, несмотря на малый опыт применения быстродействующих вычислительных машин, целесообразно провести его анализ, отметить имеющиеся решения различных трудностей и проблем, которые возникли в процессе использования быстродействующих вычислительных машин.

Для работ Вычислительного центра Академии наук СССР характерным является разнообразие задач как по физическому, так и по математическому содержанию. В каждой области численного анализа применение быстродействующих вычислительных машин поставило свои проблемы.

В настоящей работе основное внимание уделяется задачам, связанным с уравнениями в частных производных.

Ко времени появления быстродействующей вычислительной техники с большой полнотой были разработаны методы численного решения линейных уравнений в частных производных, особенно при двух независимых переменных, которые получили также строгое математическое обоснование. Однако, если говорить об общих методах, практическое их применение при прежних средствах вычислительной техники сильно ограничивалось трудоемкостью вычислительных работ. Существовал разрыв между понятием, которое математики вкладывали в термин «задача решена», и тем, что инженеры подразумевали под решенной задачей. С точки зрения математика задача была решена, если она сводилась к уравнениям, решение которых принципиально может быть получено, т. е. доказано существование и единственность решения задачи. Инженер же считал задачу решенной только в том случае, если она доведена до получения численных значений.

Применение быстродействующих вычислительных машин в значительной мере ликвидировало этот разрыв, и в настоящее время главной математической проблемой является разработка методов решения нелинейных уравнений в частных производных и нелинейных интегральных уравнений.

Было бы неправильным, однако, считать, что в линейных задачах уже не осталось нерешенных проблем. Появление быстродействующих вычислительных машин поставило перед расчетными методами требование получения решений с большой степенью точности, удовлетворение которому оказалось весьма трудной проблемой и для быстродействующей вычислительной техники.

Хотя проблему быстроты сходимости вычислительного процесса нельзя назвать новой, применение быстродействующих вычислительных машин сделало ее чрезвычайно острой.

Может возникнуть вопрос, имеет ли требование повышенной точности практическое значение? Ведь для большинства технических задач точность 2—3 знака вполне достаточна.

Чтобы правильно ответить на этот вопрос, необходимо учесть, что в основе любого расчетного метода лежат некоторые теоретические предпосылки, в той или иной мере идеализирующие изучаемый физический процесс. Поэтому, если точность расчета такова, как и точность эксперимента или наблюдения, нельзя быть уверенным, за счет чего получены расхождения между расчетом и опытом — неточности расчета или недостаточной точности предпосылок, положенных в основу расчета. Для того чтобы таких сомнений не возникало, необходимо, чтобы точность расчета (при тех предпосылках, которые положены в его основу) по крайней мере была на порядок выше точности эксперимента. Выполнение этого требования является, с нашей точки зрения, обязательным для полноценного расчета.

Часто целью расчета является не решение какой-либо конкретной задачи, а получение универсальных таблиц значений функций или величин, которые в дальнейшем могут использоваться в ряде различных конкретных задач. В этом случае требования к точности должны быть еще более повышенными.

Наконец, следует отметить, что в ряде областей физики достигнута очень высокая точность эксперимента (например, длина волн спектральных линий определяется восьмью—девятью знаками). Полноценный расчет должен обеспечить здесь не меньшую точность.

Таким образом, требование высокой точности расчета не является требованием математиков, а выдвигается практикой.

Многие методы численного решения уравнений в частных производных и интегральных уравнений тем или иным путем приводят к решению линейных алгебраических систем. При этом задача решения исходного уравнения подразделяется на две: 1) выбор порядка приближенной системы, обеспечивающего требуемую точность приближения к решению исходного уравнения, и 2) решение алгебраической системы уравнений.

Суждение о точности приближенного метода, как правило, производится «экспериментально-расчетным» путем, так как оценки точности если и существуют, то сделаны обычно с большим запасом и действительного представления о точности решения не дают.

Под экспериментально-расчетным понимается такой метод, при котором нужно провести один расчет с системами одного порядка, потом повысить порядок систем и, если получаются удовлетворительные расхождения, можно считать точность расчета достаточной.

Второй задачей при высоких требованиях к точности является решение алгебраических систем очень высокого порядка. Для решения систем высокого порядка прямые методы мало пригодны; обычно пользуются различными итеративными приемами. Решение систем высокого порядка является самостоятельной и очень трудной проблемой.

Однако алгебраические системы, получающиеся в результате приближенных представлений

дифференциальных или интегральных уравнений, обладают своеобразной спецификой, и поэтому вполне целесообразно ставить вопрос о методах решения больших алгебраических систем не общего вида, а тех, которые возникают в результате решения уравнений математической физики.

Практика показывает, что для решения этой частной задачи весьма эффективным является «метод удвоения», при котором каждая последующая итерация сопровождается одновременным дроблением шага интерполяционной сетки вдвое и повышением порядка интерполяции.

Метод удвоения особенно удобен тогда, когда вычислительная формула построена так, что значения искомой величины в новых узлах сетки выражаются через значения в старых узлах, а значения в старых узлах сетки затем уточняются по найденным значениям в новых узлах.

Для иллюстрации приведем пример решения сингулярного интегрального уравнения, в котором γ — искомая функция,

$$f(\Theta)\gamma(\Theta) = \alpha(\Theta) - \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{d\gamma(\vartheta)}{d\vartheta} \cdot \frac{d\vartheta}{\cos\vartheta - \cos\Theta},$$

встречающегося в задачах гидромеханики и теории упругости. Применением тригонометрической интерполяции к функции $\gamma(\Theta)$ это уравнение сводится к алгебраической системе уравнений:

$$b_n \gamma_n = \sum b_{nk} \gamma_k$$

(n-k) нечетные

$$\gamma_n - \gamma(\Theta_n) = \gamma\left(\frac{\pi}{m+1}\right).$$

При внимательном рассмотрении строение приведенной системы уравнений представляется таким, что неизвестные в четных точках выражаются через неизвестные в нечетных точках и наоборот. Поэтому эта формула непосредственно и применяется для метода удвоения. Вначале исходят из очень небольшого числа точек (можно ограничиться тремя), для которых решить такую систему не представляет никакого труда.

Теперь, делая следующую интерполяцию, число точек увеличивают вдвое (точнее, переходят к семи точкам). Тогда старые точки являются четными для новой системы и благодаря такому строению значения функций в новых добавленных узлах сетки выражаются через старые; затем старые уточняются и т. д.

Опыт показывает, что сходимость получается значительно быстрее по сравнению с взятой сразу большой системой уравнений, скажем, очень большим числом искомых точек. При этом грубая оценка показывает, что отношение числа итераций, если оно в обычном случае было m , при методе удвоения уменьшается в отношении $m \lg_2 m$.

Таким образом, здесь получается значительное преимущество в скорости расчета. Это свойство не алгебраической системы, а свойство исходного уравнения. Этот метод является методом ускорения сходимости данного способа решения уравнений частных производных, а не общим методом ускорения сходимости больших алгебраических систем.

Большой эффективностью для уравнений эллиптического и параболического типов обладает метод сведения уравнений в частных производных к системам обыкновенных дифференциальных уравнений (метод прямых). Это сведение можно провести либо заменой производных по одной из переменных (в случае двух независимых переменных) конечно-разностным соотношением, либо путем интегрирования по одной из переменных. В результате такого интегрирования получают интегральные соотношения. Представляя подынтегральную функцию какой-либо интерполяционной формулой и выполняя после этого интегрирование, получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Часто этот метод называют методом интегральных соотношений.

Иногда высказывается мнение, что метод сведения к системе обыкновенных дифференциальных уравнений имеет самостоятельный смысл лишь в том случае, если полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений имеет точное решение, в противном случае этот метод является частным случаем конечно-разностного метода.

Если понимать конечно-разностный метод в самом широком смысле слова, то такое утверждение часто имеет основание. Но основная практическая ценность метода сведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям заключается в том, что в полной мере используется хорошо разработанный аппарат численных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений и мощный арсенал методов интерполирования функций от одной переменной, что позволяет уже при системах невысокого порядка получать высокую точность.

Что подразумевается под аппаратом численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений? В численном анализе это одна из наиболее хорошо разработанных областей, насчитывающая столетия практического применения. Важный вклад в этой области сделали астрономы.

Большое значение имеет выбор интерполяционных формул. Часто по типу задач видно, какие интерполяционные формулы выгоднее принять. Необязательно пользоваться интерполяционными формулами, в основе которых лежат степенные полиномы. В зависимости от типа задачи можно взять, например, полиномы Лежандра или другие системы функций, что дает большую свободу действий и позволяет часто при системах невысокого порядка получить очень высокую точность.

Особое значение приобретает этот метод при неограниченных областях, в которых ищется решение исходного уравнения: область представляет бесконечную или полубесконечную полосу.

При конечно-разностном методе в этом случае вводится обычно искусственное ограничение области. В методе же сведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям бесконечные области не представляют обычно существенных затруднений, так как для обыкновенных дифференциальных уравнений хорошо разработаны методы асимптотического представления решений.

Основной задачей современной вычислительной математики является разработка методов решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Самым употребительным аппаратом в теоретических исследованиях по нелинейным уравнениям является метод последовательных приближений, однако он весьма неудобен в применении к быстродействующим вычислительным машинам, так как влечет за собой чрезмерное увеличение памяти. Кроме того, метод последовательных приближений и по существу является ограниченным,

требуя жестких условий для сходимости.

Отсюда вытекает необходимость развивать прямые методы решения нелинейных задач. В теории нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с наибольшей полнотой развиты прямые методы для гиперболических уравнений (метод характеристик, а также в последнее время метод конечных разностей).

Применение этих методов к гиперболическим уравнениям на быстродействующих вычислительных машинах вполне себя оправдало, хотя для решения задач с большой точностью возникают определенные трудности.

Так, для получения решения с четырьмя знаками при применении классического метода характеристик, изложенного в любом учебнике по аэродинамике, потребовалось бы в ряде случаев несколько десятков миллионов узлов сетки характеристик.

Ускорение процесса здесь достигается также путем повышения порядка интерполяционных формул. Применение метода, аналогичного методу «Эйлера с уточнением» для обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяет уменьшить число узлов в сетке с десятков миллионов до нескольких тысяч, что вполне реально для применения на быстродействующих вычислительных машинах.

Однако дальнейшее повышение точности интерполяционных формул далеко не всегда может быть оправдано, учитывая характер решений гиперболических уравнений (возможные разрывы производных при переходе через характеристику).

Значительно большие трудности представляет решение нелинейных эллиптических и параболических уравнений.

Опыт работы Вычислительного центра АН СССР показал успешность применения, для решения этих задач, метода сведения уравнений в частных производных к системам обыкновенных уравнений. При этом для получения соответствующих аппроксимирующих систем применялись интегральные соотношения. Вкратце указанный метод заключается в следующем.

Обычно дифференциальные уравнения в задачах физики и механики имеют «дивергентный» вид:

$$\frac{\partial P_i(x, y; u_1, \dots, u_n)}{\partial x} + \frac{\partial Q_i(x, y; u_1, \dots, u_n)}{\partial y} = F_i(x, y; u_1, \dots, u_n)$$
$$(i = 1, 2, \dots, n).$$

Если нам требуется найти решение в прямоугольнике, в полосе (бесконечной или полубесконечной), этот прямоугольник разбивается на ряд отдельных полосок и поперек каждой полоски производится интегрирование системы уравнений, в результате чего получается интегральное соотношение:

$$\frac{d}{dx} \int_{y_k}^{y_{k+1}} P_i dy + Q_{i,k+1} - Q_{i,k} = \int_{y_k}^{y_{k+1}} F_i dy$$
$$(i = 1, 2, \dots, n; \quad k = 0, 1, \dots, m).$$

Здесь

$$Q_{i,k} = Q_i [x, y_k; u_1(x, y_k), \dots, u_n(x, y_k)].$$

Если мы представим подынтегральную функцию какой-либо интерполяционной формулой и выполним интегрирование, то в результате получится система обыкновенных дифференциальных уравнений, аппроксимирующая данную систему уравнений в частных производных. Такой метод оказывается естественным и в случае неопределенной границы области. В ряде задач необходимо найти решение уравнений в области, которая заранее неизвестна. Примером таких задач являются задачи газовой динамики с отошедшей ударной волной: граница области — ударная волна — заранее не известна; задачи теории тяжелой жидкости, где неизвестна форма свободной поверхности; задачи теплопроводности с промерзанием почвы, где граница между замерзшей и незамерзшей почвой является функцией времени, заранее неизвестной.

В этом случае полученная система дифференциальных уравнений будет иметь границу области в качестве одной из искомым функций. Принципиальное усложнения наличие неизвестной границы здесь не дает, а получается лишь увеличение порядка системы на одну единицу.

В ряде случаев, когда мы имеем бесконечную область (например, бесконечную полуплоскость), имеет смысл искусственно вводить неопределенную границу, характеризующую с некоторым приближением границу той области, до которой доходят возмущения. Такой подход хорошо известен в теории пограничного слоя.

Надо отметить, что вычислительные трудности весьма сильно возрастают при увеличении числа независимых переменных в уравнениях в частных производных или в интегральных уравнениях, и если для случая двух переменных имеется значительный прогресс, то многомерные задачи остаются весьма громоздкими и для быстродействующей вычислительной техники.

Современная вычислительная техника позволяет эффективно решать практически любые задачи с двумя независимыми переменными.

Трехмерные задачи находятся на границе практической возможности их решения на современных быстродействующих вычислительных машинах. При этом для трехмерных задач достаточно общего вида получение решения с большой точностью весьма затруднительно.

В то же время общие задачи физики и механики являются четырехмерными (три пространственных переменных и время), а в некоторых случаях (например, квантовая механика) число независимых переменных больше четырех.

Необходимо отметить, что без существенного повышения быстродействия и увеличения объема оперативной памяти вычислительных машин многомерные задачи физики и техники будут оставаться недоступными. Анализ задач, которые выдвигаются сейчас в различных областях техники, показывает, что требование увеличения быстродействия до величины порядка миллиона операций в секунду и увеличения объема оперативной памяти до десятка и даже нескольких десятков тысяч чисел является вполне актуальным и, может быть, даже скромным требованием.

Нужно учитывать также, что развитие вычислительной техники и возможности, которые она порождает,

приводят к появлению таких по объему и сложности задач, о которых при прежних вычислительных возможностях никто даже и не думал.

Конечно, математики не должны всю трудность задачи целиком перенести на вычислительную технику. Разработка методов решения нелинейных задач, обеспечивающих как можно более быструю сходимость, является важнейшей обязанностью математиков, работающих в области приближенных вычислений.

Отметим еще один существенный момент. Требования жизни заставляют нас сейчас разрабатывать методы в известной мере формально. Доказательство сходимости методов, как правило, не поспевает за формальной их разработкой. Мы ограничиваемся тем, что опытно-расчетным путем проверяем сходимость этих методов. И, безусловно, задача математического обоснования новых методов, развитие которых вычислительная техника весьма мощно стимулирует, является также важной задачей для математиков.

В результате опыта применения быстродействующих вычислительных машин возникли также следующие проблемы.

1. В численных методах решения обыкновенных дифференциальных уравнений возникают большие трудности в задаче прохождения через особые точки. Обычным методом до сих пор являлся метод решения разложением в ряды в окрестности особой точки и склеивание этих рядов с решением, доходящим в окрестность особой точки. Но те системы, которые встречаются в практике в настоящее время, настолько сложны, что разложение решений в ряды почти выходит за пределы человеческих возможностей. Поэтому возникает логическая задача — механизировать, исходя из известной таблицы дифференцирования функций, задачу построения рядов и последующего их вычисления.

2. Многие задачи с применением преобразования Лапласа или Фурье сводятся к сравнительно простым уравнениям для нахождения этих преобразований.

Но обратная задача нахождения оригинала, если только она не решается в явном виде, представляет весьма большие вычислительные трудности. Это ставит задачу создания методов аппроксимации преобразования, которые обеспечивают равномерное приближение оригинала.

3. В методах уравнивания большого числа данных наблюдений, исходящих из предположения гауссова закона распределения погрешностей, проявляется явление больших поправок, заведомо выходящих за пределы возможных погрешностей наблюдений.

Возникает необходимость разработки методов уравнивания, которые основывались бы на более близких к действительности законах распределения ошибок. Обнадеживающие результаты в решении этой проблемы получены А. А. Абрамовым.

В заключение хочу остановиться на том новом положении, которое начинает занимать расчетные методы в результате создания быстродействующей вычислительной техники.

Характеризуя значение вычислительной техники, обычно подчеркивают тот факт, что одна быстродействующая вычислительная машина заменяет труд десятков тысяч вычислителей. Однако эта количественная характеристика не отражает того качественного эффекта, который создается современной вычислительной техникой, и экономического эффекта, который дают быстродействующие вычислительные машины.

Дело в том, что при старой вычислительной технике над ученым или инженером, разрабатывающим тот или иной расчетный метод, довлело требование практической возможности его применения. Это обстоятельство вынуждало прибегать к упрощению и схематизации изучаемого явления, заставляло отбрасывать многие факторы, влияющие на ход рассчитываемого процесса, но которые по каким-то соображениям можно было считать менее существенными.

В результате такого подхода расчетные методы в большинстве областей физики и техники имели вспомогательное значение. Ими пользовались лишь для грубой, предварительной оценки, главная же тяжесть решения технической задачи ложилась на эксперимент или на натурную доводку проектируемого объекта, что, разумеется, требует больших материальных затрат, а самое главное, не дает уверенности в оптимальности решения задачи.

Можно указать, пожалуй, лишь одну область — небесную механику, где невозможность эксперимента привела к глубокому развитию расчетных методов. Они заняли здесь главенствующее положение и, как известно, дали возможность не только предвычислять движения планет, но и «открывать их на кончике карандаша» (открытие планеты Нептун).

Создание быстродействующей вычислительной техники принципиально меняет роль расчетных методов. При решении очень многих технических задач теперь можно предъявлять к расчетным методам требование наиболее полного учета факторов, влияющих на ход изучаемого процесса. Поэтому расчеты часто могут давать точность большую, чем эксперимент, поскольку последний осуществляется в условиях, не вполне соответствующих натурным, и, кроме того, точность его ограничена точностью измерений.

При использовании быстродействующей вычислительной техники расчет может дать часто окончательное или почти окончательное решение задачи, сокращая до минимума этап натурной доводки.

Отсюда очевидно, что и экономический эффект не определяется тем, что машина заменяет армию вычислителей. Этот эффект значительно выше.

Опыт Вычислительного центра АН СССР показал, что те проектно-конструкторские и исследовательские организации, которые однажды использовали в своей работе быстродействующие вычислительные машины, уже не мыслят свою дальнейшую работу без их применения.

Это положение должно учитываться при определении потребности в быстродействующих вычислительных машинах, причем характерным здесь является то, что потребность будет возрастать по мере появления и внедрения вычислительных машин в практику исследовательских и проектных организаций.

ПРОГРАММИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Огромное развитие в нашей стране науки и техники потребовало обеспечения народного хозяйства новыми мощными вычислительными средствами, и прежде всего максимально рационального использования имеющихся в настоящее время вычислительных средств.

При оценке производительности быстродействующей вычислительной машины принято в первую очередь учитывать длительность элементарного такта или, что то же самое, число выполняемых в секунду операций при работе с внутренним запоминающим устройством. Параметры быстродействия буферной памяти (если она существует) и устройств ввода и вывода конечно, также учитываются однако, часто считаются второстепенными. В оценку производительности входит, кроме того, число рабочих часов машины в сутки и средняя продолжительность работы без сбоев. Все эти цифры безусловно необходимы для правильной оценки производительности и ни одну из них нельзя считать второстепенной. Для оценки истинной производительности машины безусловно следует учитывать и удобство работы на машине на всех стадиях реализации решения задачи.

Значение перечисленных параметров быстродействия различных узлов машины не может, конечно, привести к правильной оценке производительности без учета объема запоминающих устройств. Однако оценка производительности, основанная на учете всех данных машины, является все же лишь относительной оценкой по сравнению с другими машинами.

Истинная же производительность машины должна определяться числом фактически решенных на машине задач, временем, необходимым для реализации решения каждой задачи, и количеством людей, занятых на подготовке и проведении задач и технической эксплуатации машины. При этом объем и сложность решения той или иной задачи надо оценивать не числом операций, выполняемых машиной в процессе решения, а лишь объемом вычислений и сложностью организации вычислений при применении других средств. Только в таком случае можно правильно оценить роль и значение машин, как нового средства вычислений и, что для нас особенно важно, найти правильные решения при создании новых машин и рационально использовать имеющиеся машины.

Численное решение любой задачи есть определение значений некоторой совокупности функций от конечного числа переменных — исходных данных задачи:

$$\bar{u}_i = f_i(\bar{x}, \dots, x_M), \quad i=1, 2, 3, \dots, N$$

Если совокупность исходных данных рассматривать как M -вектор \bar{x} , результаты как некоторый N -вектор \bar{u} , то задачу можно записать кратко, как вычисление по «формуле» $\bar{u} = \bar{f}(\bar{x})$, где \bar{f} — вектор — функция.

Само собой разумеется, что функция \bar{f} задана, т. е. определен алгоритм получения \bar{u} по \bar{x} . Сложность этого алгоритма определяется сложностью задачи.

Любой алгоритм может быть описан в терминах элементарных операций универсальной вычислительной машины. Такое описание является в сущности программой для решения задачи. Если бы программы, применяемые при решении задач, являлись бы просто таким описанием, то вопрос о составлении программы сводился бы к «переводу» заданного алгоритма на «язык» элементарных операций машины. Уже такой перевод требует расширения заданного алгоритма, так как при этом необходимо учитывать распределение и объем памяти для численного материала и программы, невозможность проведения операций над несколькими числами без фиксации промежуточных результатов в некоторых ячейках памяти, запрет записи нового результата на место нужной в дальнейшем величины и т. д.

Формализовать и автоматизировать такое расширение заданного алгоритма, конечно, не очень трудно, однако такой непосредственный «перевод» оказывается по существу непригодным. Дело в том, что в процессе решения всякой задачи на машине необходим этап ввода исходной информации.

Для автоматической цифровой машины исходной информацией, помимо значений аргументов x_1, \dots, x_M , являются приказы программы.

Поэтому время, которое требуется для решения задачи, заведомо больше времени, затрачиваемого на ввод программы. В случае если в программе, вводимой в машину перед решением задачи, выписаны в виде команд все элементарные операции, которые нужно выполнить для определения значений вектора-функции $\bar{f}(\bar{x})$, то скорость выполнения одной элементарной операции при решении задачи ограничивается скоростью ввода одной команды. Для машин, в которых при работе с информацией внутри машины скорость выполнения команды во много раз превосходит скорость ввода этой команды во внутреннюю память машины, программы, такого типа неприемлемы.

В связи с этим в действительности программы являются реализацией в терминах элементарных операций машины более общего алгоритма, осуществляющего, помимо заданного алгоритма вычисления значений $\bar{f}(\bar{x})$, некоторые вспомогательные операции, обеспечивающие создание внутри машины команд для выполнения заданного алгоритма.

Обычно конкретную математическую задачу можно численно решать различными методами. Далеко не всякий численный метод, удобный при ручных вычислениях, оказывается удобным для реализации на машине. Чем однороднее метод, тем меньше «особых случаев» возникает при его применении, тем он удобнее для реализации на машине. Однако следует иметь в виду, что даже при работе на машинах с высоким быстродействием нельзя забывать о числе операций, необходимых для решения задачи. На этом стоит остановиться подробнее, так как широко распространено мнение, что вопрос о количестве операций является второстепенным. Такое ошибочное суждение приводит к неверной оценке целесообразности исходного алгоритма, с одной стороны, и к выбору

нерационального расширения заданного алгоритма — с другой. Часто выбирают простейшие из известных численных методов, не принимая во внимание количество операций, необходимых для решения. Конечно, простейшие методы, как правило, легко программировать, и, с этой точки зрения, они предпочтительнее. При решении несложных задач, расчет для которых даже таким простейшим методом занимает небольшое время, соизмеримое с временем ввода в машину исходной информации и вывода полученных результатов, вопрос о выборе более совершенного метода обычно не возникает. Однако истинная производительность машины в таком режиме, конечно, невелика, и его нельзя считать режимом нормальной эксплуатации быстродействующей машины. В случае же решения сложных задач количество необходимых операций для решения простейшими методами и объем исходной информации для реализации этих методов возрастает во много раз, и поэтому реализация более сложного метода может повысить истинную производительность машины во много раз. Однако, в то время, как простейшие известные методы оказываются обычно удобными для программирования, более сложные методы ручных вычислений часто мало пригодны для реализации на машине. Решение возникающего здесь противоречия следует искать в создании новых методов, предназначенных для реализации на быстродействующих автоматических машинах. В некоторых случаях такой новый метод может отличаться от известных методов лишь некоторыми деталями, но в ряде случаев требуется существенно новая методика. В частности, требуется разработка методики решения задач, фактическое решение которых ранее не проводилось из-за их сложности и громоздкости.

Но даже при правильном выборе исходного алгоритма при его расширении необходимо руководствоваться принципом экономии числа операций. Часто в целях незначительного упрощения программы допускают лишний счет. Иногда такой лишний счет увеличивает время решения незначительно, но можно привести примеры, когда нерациональное программирование увеличивало время решения в десятки раз. На вопрос об экономии счетного времени все еще мало обращают внимания. В то же время здесь скрыты очень большие резервы мощности математических машин.

Так как определенная часть машинного времени при решении задачи по новой программе затрачивается на предварительную проверку правильности работы программы, фактическое время, затраченное на решение одного варианта задачи, будет тем меньше, чем большее количество вариантов будет решено с помощью данной программы. С этой точки зрения следует предпочесть более универсальные программы, охватывающие более широкий класс задач. Именно при создании таких программ следует обращать особое внимание на их экономичность в работе. Конечно, нельзя отказаться от экспериментальных программ, заранее рассчитанных на то, что по ним будут проведены сравнительно небольшие вычисления. Без таких экспериментов невозможна успешная работа по созданию новых машинных методов вычислений. Однако для этой цели, а также для решения небольших задач, рациональнее использовать машины, отличные от машин, предназначенных для решения больших задач во многих вариантах.

Имеющийся в нашем распоряжении опыт доказывает возможность и целесообразность создания новых специально машинных методов вычислений и подтверждает необходимость тщательного обсуждения степени универсальности создаваемой программы в целях ее более полного применения в дальнейшем. Успешная работа по созданию новых методов вычислений возможна лишь при тесном контакте работников, занимающихся математической постановкой задач, с программистами. Целесообразность тесного контакта не означает, однако, смешение функций. Вопрос о выборе расширенного алгоритма решения столь же существенен, как и правильный выбор исходного алгоритма, в то же время эта сторона дела имеет свои специфические особенности и целесообразно, чтобы данная часть работы проводилась программистом.

После того, как выбраны алгоритм решения и схема реализации его в машине, т. е. расширенный алгоритм решения задачи, необходимо записать (закодировать) его в виде приказов в коде машины. Эта часть работы по подготовке программы решения задачи является в значительной степени работой технической и наиболее трудоемкой. Ошибку, допущенную на данном этапе работы, обычно трудно обнаружить в дальнейшем. Следовательно, необходимо обращать особое внимание на тщательность выполнения указанного участка работы. С другой стороны, данная часть работы легче всего поддается формализации, а, следовательно, и автоматизации.

С помощью программирующей программы данный этап работы может быть полностью формализован и автоматизирован. Применение программирующей программы резко снижает число ошибок, допускаемых на этой стадии программирования, так как необходимая ручная работа по подготовке информации для программирования на машине однозначно определена заданием и проводится в «две руки» с обязательным контролем совпадения двух комплектов информации.

Несмотря на наличие программирующей программы, некоторая, правда, незначительная, часть программ будет по той или иной причине составлять «на руках». Существенное облегчение указанного способа составления программы может дать достаточно универсальная программа «автоматического присвоения адресов», дающая возможность написания программы «в буквах» с последующей автоматической обработкой ее с помощью машины.

После того, как программа тем или иным способом записана в виде приказов в коде машины, необходимо убедиться в правильности ее работы. Для этой цели следует решить с помощью составленной программы часть задачи (возможно, модельной) и, анализируя полученные результаты, сделать вывод о правильности программы. Обычно желательно иметь для этого анализа заведомо верные результаты. Первые пробные просчеты по новой программе должны занимать как можно меньше времени работы машины. Опыт показывает, что для таких просчетов достаточно время порядка нескольких минут. Для этих просчетов можно использовать время, так или иначе остающееся свободным при смене решаемых задач из-за необходимости в смене магнитных лент, замены содержимого ячеек постоянной памяти и т. д. Возможность использования указанного времени определяется быстрой и надежностью работы вводных и выводных устройств машины, с одной стороны, и правильной подготовкой проведения пробного просчета и принятием необходимых мер контроля ввода и вывода, с другой стороны. Особое внимание следует обратить на недопустимость «ручной работы» за пультом, в результате которой теряется время и появляются трудно учитываемые в дальнейшем анализе ошибки.

Автоматизация контроля готовой программы является довольно сложной проблемой, удачное решение которой может существенно повысить «коэффициент полезного действия» машины.

Для автоматизации контроля применяется так называемая программа контроля, которая в ряде случаев оказывается мощным средством обнаружения ошибок в программе. В настоящее время в нашем распоряжении имеется значительно более совершенная программа контроля, применение которой, как мы надеемся, почти

полностью решит имеющиеся здесь трудности, по крайней мере для программ, удовлетворяющих некоторым стандартным требованиям. Новая программа контроля даст, конечно, возможность контролировать любую программу, однако ее применение даст наиболее ощутимые выгоды для программ, составленных при помощи программирующей программы.

После того, как установлено, что составленная программа функционирует правильно, необходимо решение задач с помощью этой программы передать лицу, специально занимающемуся расчетами, освободив программиста для работы по составлению новых программ. Целесообразность такой передачи очевидна. Однако она накладывает определенные требования к тщательности изготовления программы, простоте обращения с программой и полноте документации, относящейся к программе. Эти дополнительные требования в конечном счете нисколько не затрудняют, а скорей, наоборот, облегчают программирование. К лицам, отвечающим за подготовку и проведение задачи на машине по отлаженным программам, следует все же предъявлять некоторые минимальные требования знаний основ программирования и знакомства с особенностями и организацией программ, по которым решается проводимая ими задача. Обязательное присутствие лица, отвечающего за задачу, в машинном зале во время решения задачи вовсе не обязательно. При наличии простой и ясной инструкции о порядке решения данной задачи она может быть решена «заочно».

Безусловно, необходимо иметь в распоряжении дежурного оператора резервные задачи, которые можно решать в случае, если по тем или иным причинам машина оказывается незагруженной. Для проведения работ на больших быстродействующих машинах целесообразно иметь дежурного оператора, отвечающего за соблюдения правил работы на машине, и дежурного диспетчера для более оперативного использования машины в режиме решения различных задач и проведения работ по отладке программ, в обязанности которого входит вызов того или иного исполнителя на машину, точный учет расхода машинного времени и контроль выполнения инструкции по подготовке программы и задачи для пуска на машине.

Существенное значение в рациональном использовании машины имеют вспомогательные программы, находящиеся в распоряжении оператора и программистов, облегчающие работу за пультом и программирование. В качестве примера таких программ можно привести 67-ю и 77-ю операции на «Стреле 1».

Следует остановиться на особенностях организации решения больших задач, вызванных наличием сбоев в работе машины.

Программа должна быть составлена таким образом, чтобы имелась возможность прерывать и возобновлять решение без необходимости вторично считать значительную по времени часть задачи. При этом также следует считаться с возможностью случайной ошибки в работе машины в любой момент времени. Поэтому в том случае, когда результаты последующих просчетов зависят от просчетов предшествующих, прежде чем продолжать счет, необходимо убедиться в правильности полученных результатов. Наиболее простым и достаточно надежным средством в данном случае является метод повторения части просчета с контрольным суммированием и сравнением контрольных сумм. Этот способ не гарантирует от ошибки в случае постоянной неисправности, для выявления которой необходимо иметь достаточно полную систему испытательных программ-«тестов». Следует обратить особое внимание на полноту проверки работы постоянных подпрограмм, имеющихся в машине.

Однако метод двойного просчета является тяжелым «налогом» за достоверность результатов. Борьба против этого налога вряд ли может с успехом вестись программным путем. Здесь необходимо техническое решение вопроса и в первую очередь повышение надежности работы различных узлов машины. Успешное решение этой проблемы повысило бы истинную производительность машин почти в 2 раза.

Потребность в современных быстродействующих вычислительных машинах огромна, а в дальнейшем будет несомненно расти.

При помощи каких машин и каким образом можно удовлетворить эту растущую потребность?

Прежде всего следует отметить, что быстродействие, а главный объем, памяти имеющихся в нашем распоряжении больших машин БЭСМ и «Стрела» оказываются недостаточными для решения целого класса важных задач. Для некоторых задач нет даже перспективы решения их в ближайшем будущем, так как потребуются машины, производящие примерно 1 млн. операций в секунду.

С другой стороны, имеется потребность в проведении большого количества расчетов, которые далеко не используют всех возможностей больших машин, и с меньшим успехом можно было бы решать на машинах, более медленных и простых. Кроме того, очевидно, что для полного использования мощности большой машины требуется работа большого коллектива, значительная часть которого должна состоять из специалистов высокой квалификации. Поэтому большие вычислительные машины следует выпускать лишь в расчете на крупные вычислительные центры, в которых возможно рациональное использование таких машин. Совершенно необходимо организовать также серийный выпуск небольших универсальных машин для научно-исследовательских и производственных целей. Основное внимание при создании такой машины должно быть обращено на удобство эксплуатации и надежность в работе. Такие машины смогут удовлетворять значительную часть потребности в расчетных работах. Эти же машины при достаточном быстродействии могут послужить основой для применения машин, работающих с реальными объектами на производстве и в военной технике.

В целях более полного использования мощности как больших, так и малых автоматических машин, необходимо решить задачу максимальной автоматизации программирования. Определенные положительные результаты в этом направлении уже достигнуты, но еще многое нужно сделать. В частности, слабо развит метод применения стандартных программ для автоматизации программирования. При условии выпуска большой серии одинаковых машин этот метод мог бы сыграть большую роль в освоении данных машин различными организациями, применяющими стандартные программы для автоматизации программирования.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЦИФРОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ (СЦМ) И ПУТИ ИХ РАЗВИТИЯ

I

Специализированные машины создаются для систематического решения отдельных классов задач, решение которых на универсальных машинах не оправдано. Это может происходить как за счет простоты решаемой задачи, не требующей использования значительной части возможностей универсальной машины, так и за счет специфических трудностей задачи, делающей невозможным или неудобным решение ее в приемлемые сроки на универсальной машине. В том и другом случае решающее значение играет экономический фактор, т. е. степень потребности в решении таких задач, и потенциальная нагрузка соответствующей СЦМ.

Упрощения и отличия в конструкции СЦМ от схем универсальных машин могут идти по следующим линиям:

- а) сокращение объема внутреннего запоминающего устройства (сокращение памяти), упрощение структуры памяти, улучшение организации внешней памяти;
- б) упрощение арифметического устройства: уменьшение разрядности, упрощенный ввод масштабов, уменьшение состава производимых операций;
- в) упрощение системы управления; сведение до минимума доли программного управления, переход к схемной коммутации и переключениям с пульта, в ряде случаев ввод дополнительных устройств для реализации программы;
- г) создание специализированных блоков (цифровых интеграторов, датчиков случайных чисел и т. п.);
- д) создание специально оборудованных входных и выходных устройств для возможности работы с реальными объектами.

В настоящее время следует отличать СЦМ от малых универсальных машин (таких, как например, «Урал», до некоторой степени СЦМ-12, малая машина ЭНИН). В то время, как малые универсальные машины решают сравнительно широкий класс задач, ограничиваемый главным образом объемом вычислений, и работают со скоростью, значительно уступающей скорости больших универсальных машин, специализированные машины эффективно решают сравнительно узкие классы задач, но за время того же порядка, а в ряде случаев существенно быстрее, чем большие универсальные машины, тем более, если учитывать время подготовки задачи.

Упрощения, возникающие в специализированных вычислительных машинах, связаны с определенными особенностями алгоритма, принятого для решения задачи. Эти особенности можно характеризовать понятиями, поддающимися количественной оценке. Пусть вычисления ведутся так, что промежуточные результаты, нужные для дальнейшего, записываются во внутреннюю память, а после использования — немедленно стираются. В данном случае максимальное число одновременно хранящихся во внутренней памяти чисел можно назвать «связностью алгоритма». Очевидно, что связность алгоритма определяет минимальный объем внутренней памяти, необходимый для его успешной реализации.

Рассмотрим в качестве примера алгоритм, выполняемый машиной СЦМ-25 («Погода») (рис. 1).

Производится вычисление суммы парных произведений вида

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^N a_{ik} b_k \quad (i=1, 2, \dots, M).$$

Числа a_{ik} и b_k являются выходными данными; α_i — ответами; N и M — параметрами программы. Вычисление ведется по схеме:

$$\psi_k = a_{ik} b_k, \quad \psi_k = \varphi_k + \psi_{k-1}, \quad \psi_0 = 0.$$

Запоминаемыми промежуточными результатами являются только φ_k и ψ_k , т. е. связность алгоритма равна двум, и внутренняя память практически отсутствует.

Наличие столь малой связности в алгоритме имеет место далеко не всегда. В ряде случаев задачу можно разбивать на блоки малой связности. Так, например, при решении системы конечно-разностных уравнений, вытекающих из уравнения в частных производных, можно сначала разбить пространство на маленькие кубы и выразить значения искомой функции внутри куба через значения на гранях куба, а после этого решать систему, связывающую значения на гранях со значениями на границе области.

Однако упрощение внутренней памяти возможно и не только за счет малой связности, оно может возникать благодаря простой «организации» алгоритма, позволяющей эффективно использовать магнитную и другие виды памяти без потерь на время ожидания. Иначе говоря, нужно хорошо организовать выборку из памяти.

Простота или степень организации алгоритма определяет возможность планомерной выборки данных из памяти

для последующей переработки. Возможность такой планомерной выборки, характеризующейся простым законом, исключает необходимость пользоваться набором арифметических команд со всевозможными значениями адресов. В этом случае обеспечение нужного порядка действий и выборки можно в значительной мере достичь схемным способом.

Степень организации алгоритма для некоторого фиксированного способа заполнения памяти можно охарактеризовать, например, следующим образом (рис. 2).

Каждую последовательно выполняемую операцию можно записать, как $|k|A|n|m|p|$, где k — номер операции; n, m, p — адреса участвующих чисел; а A — символ операции. Если n, m и p выписать в виде рекурсивных функций от k , то степень организации как раз и характеризуется сложностью этих функций, например, числом рекурсий. Для построения узко специализированной машины весьма важной характеристикой является минимальная степень организации алгоритма при оптимальной загрузке накопителя.

Например, пусть адреса можно выразить таким образом:

$$m(k) = k^1 + a, \quad n(k) = k^1 + b, \quad p(k) = k^1 + c,$$

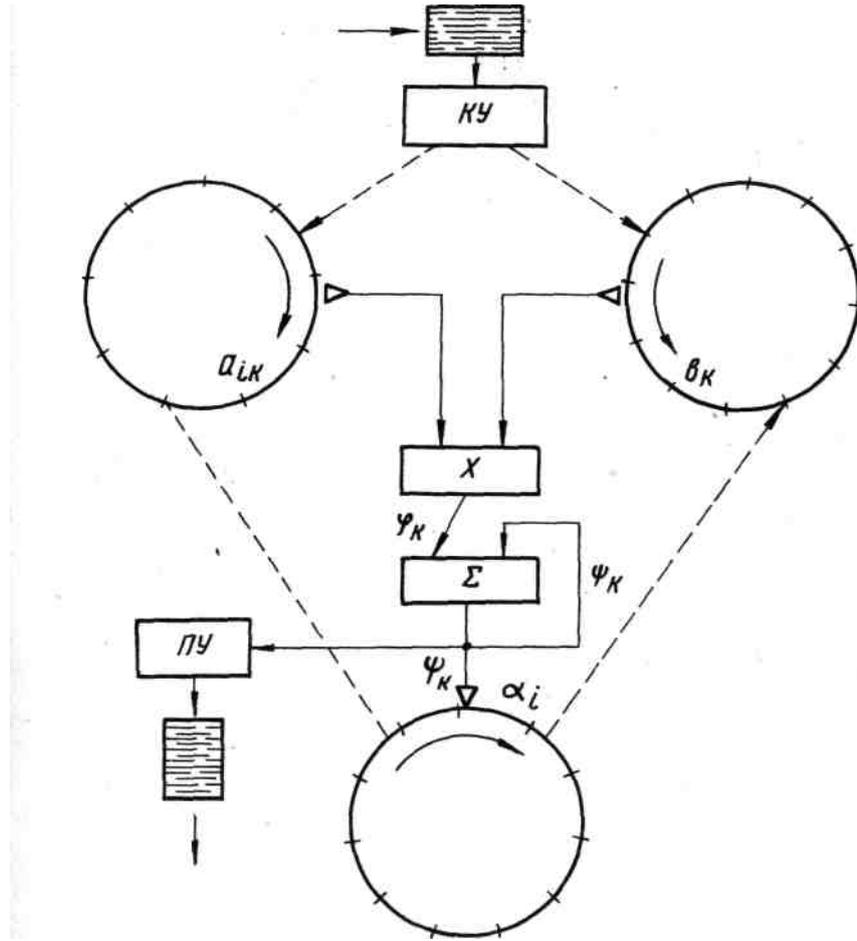


Рис. 1

где k — номер, отсчитываемый от начала цикла, а числа a, b, c — зависят только от операции A , которая в свою очередь просто зависит от k и k^1 .

Для такой задачи числа можно последовательно записать на магнитный барабан и считывать с него, пользуясь двумя рядами головок последовательно, а результаты записывать немедленно через третий ряд головок,

k	A	n	m	p
-----	-----	-----	-----	-----

$$m(k) = k' + a$$

$$n(k) = k' + b$$

$$p(k) = k' + c$$

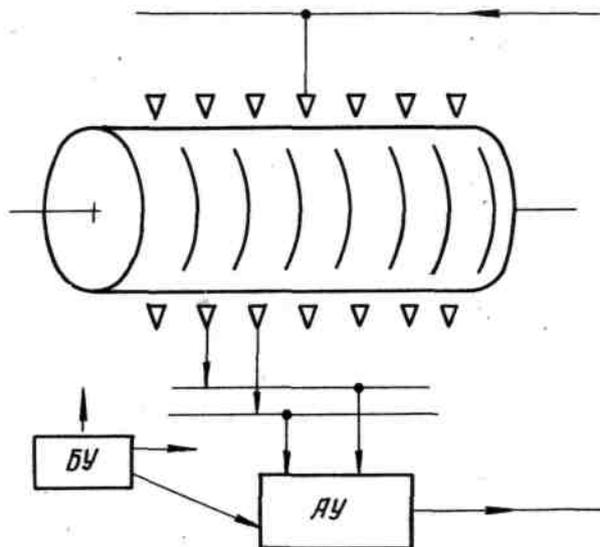


Рис. 2

отнесенный на некоторое расстояние от предыдущих. При несколько более сложной структуре этих функций можно использовать и горизонтальную развертку по строкам барабана.

На такой идее основана схема СЦМ — «анализатора сетей» («ДИНА»), предназначенного для решения краевых задач и задачи Коши для уравнений Лапласа, Пуассона, волнового и диффузионного.

Возможность подобного планомерного изменения адресов даже и более сложной структуры позволяет эффективно использовать различные виды последовательной памяти иногда с промежуточным переписыванием на несколько электронных статических регистров.

Важной стороной вопроса о возможности упрощения организации памяти и системы управления является также степень сложности программы. В значительной части это понятие характеризуется степенью организации алгоритма. Дело в том, что при несложных функциях $n(k)$, $m(k)$, $p(k)$ их не нужно хранить в отдельной памяти, а можно вводить частично в виде «признаков», сопровождающих числа $\{n\}$, $\{m\}$, $\{p\}$ в оперативной памяти, а частично вырабатывать схемно.

Наличие длинной программы неудобно уже потому, что вызывает наличие отдельного последовательного ввода чисел и ввода команд с двух видов последовательной памяти; это затрудняет синхронизацию в машине и вызывает потери на время ожидания (уменьшается преимущество последовательной выборки). Программа зависит также от ряда параметров как числовых (различные области для уравнений в частных производных и т. п.), так и логических (разные варианты решаемых задач). Число этих параметров для СЦМ должно быть невелико; желательно, чтобы их можно было вводить с пульта или с небольшой внутренней «таблицы», допускающей быстрое чтение, но не обязательно быструю запись (перфокарта и т. п.).

В противном случае для записи этих параметров также пришлось бы применить дополнительную последовательную память, что нарушает всю организацию вычислений. Вообще говоря, большое количество степеней свободы в выборе программы привело бы нас опять к универсальной машине с ее преимуществами и недостатками.

В качестве примера заметим, что в упомянутой машине «СЦМ-25» программа состоит из двух операций сложения и умножения и команд выдачи данных, пуска и остановки. Программа зависит всего от двух параметров M и N , так что ее с удобством можно изменять переключениями на пульте.

Можно отметить, что существенным условием успешной реализации данной программы на СЦМ является возможность простого синтеза этой программы на основе информации, поступающей параллельно с числами (первичные команды хранятся как «признаки» чисел).

Важной идеей здесь является построение отдельных блоков решения; при этом функции устройства управления сводятся к правильному переключению (коммутации) этих блоков. Как пример можно привести цифровой аналог интегратора в цифровых дифференциальных анализаторах. В этих случаях мы имеем дело со схемой, поддающейся простому синтезу.

II

Перейдем к обзору различных типов СЦМ. Решающим в конструировании СЦМ являются реализуемый ею алгоритм и метод использования машины. Поэтому мы будем классифицировать машины по условиям эксплуатации, а внутри каждого класса — по реализуемым алгоритмам. Такая классификация оправдана, в частности, и потому, что внешние устройства, имеющие в СЦМ значительный удельный вес, определяются в первую очередь условиями эксплуатации. Специализированные цифровые машины могут быть разделены на три основных класса (рис. 3):



Рис. 3

А. Машины для научных и инженерных исследований

Машины этого класса работают по схеме «человек—машина—человек». Поэтому данные должны быть приспособлены к ручному вводу, а выходные данные должны печататься в виде, удобном для чтения и анализа. Управление должно быть удобным, ошибки настройки легко проверяемыми. Машина должна занимать небольшую площадь и иметь простое обслуживание.

Машины, перерабатывающие содержимое накопителей последовательного действия (магнитных и перфорированных лент). В качестве примеров укажем на машину «СЦМ-25», машину для решения линейных уравнений СПЕС¹ и другие, для которых характерно практически полное отсутствие внутренней памяти и управление с пульта.

Быстродействие определяется последовательной выборкой с ленты. Точность может быть повышена до любого практически требуемого предела. Область применения: вычисление коэффициентов Фурье, сумм рядов Фурье по произвольным системам функций, рентгеноструктурный анализ, перемножение матриц, решение систем линейных уравнений итерационными методами, обработка статистических данных, вычисление функций автокорреляции, вычисление моментов и центров тяжести сложных тел и др.

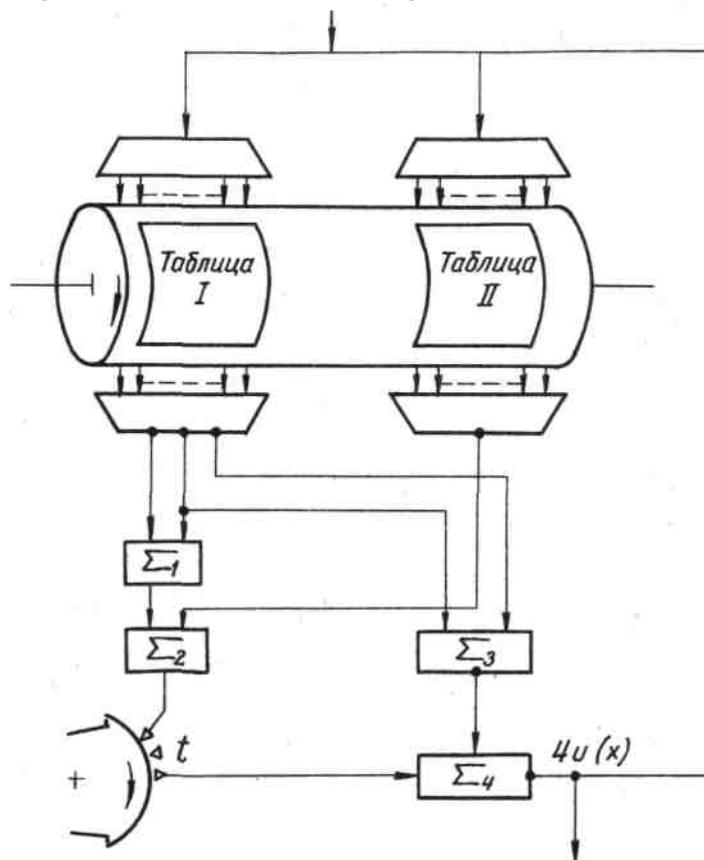


Рис. 4

Машины, последовательно перерабатывающие содержимое магнитного барабана. Специализированной машиной такого типа является машина «ДИНА» (анализатор сетей)² (рис. 4). Она предназначена для решения

¹ Math. Tables, 1953, Jan, № 41.

² Zeondes Rubinoff, 1952.

уравнений:

$$\text{Лапласа } \Delta U = 0, \text{ Пуассона } \Delta U = f, \text{ диффузии } \Delta U = K \frac{\partial U}{\partial t} \text{ и волнового } \Delta U = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}.$$

Эти уравнения могут быть как двухмерными, так и с большим количеством измерений. Дифференциальные операторы этих уравнений заменяются приближенными разностными, и полученная система линейных уравнений решается итерационным методом Либмана или Ричардсона.

Накопителем машины является магнитный барабан емкостью порядка 20000 чисел и скоростью 100 об/сек. Числа на барабане размещаются соответственно их расположению в заданной области (в сетке).

Арифметическое устройство весьма просто, содержит лишь несколько сумматоров последовательного действия и загружено вычислениями почти на 100%. Программа практически отсутствует.

Указывается, что решение задачи в течение трех часов уменьшает первоначальные ошибки приближения в 100 раз, а решение в течение восьми часов — в 10^6 раз.

По сравнению с машиной «Univas», имеющей внутреннюю память на линиях задержки емкостью 100 чисел, уравнение Лапласа с сеткой 100 X 100 на данной машине решается в 100 раз быстрее.

На подобном принципе основана и схема СЦМ для решения задач Лапласа и Пуассона с применением замкнутой магнитной ленты, предложенной В. Вишином¹ (рис. 5).

Повидимому, целесообразно использовать метод последовательной переработки содержимого магнитного барабана для построения отдельных функциональных блоков и применять их в сочетании с устройством синтеза программы и небольшой быстродействующей статической памятью для вспомогательных вычислений по программе.

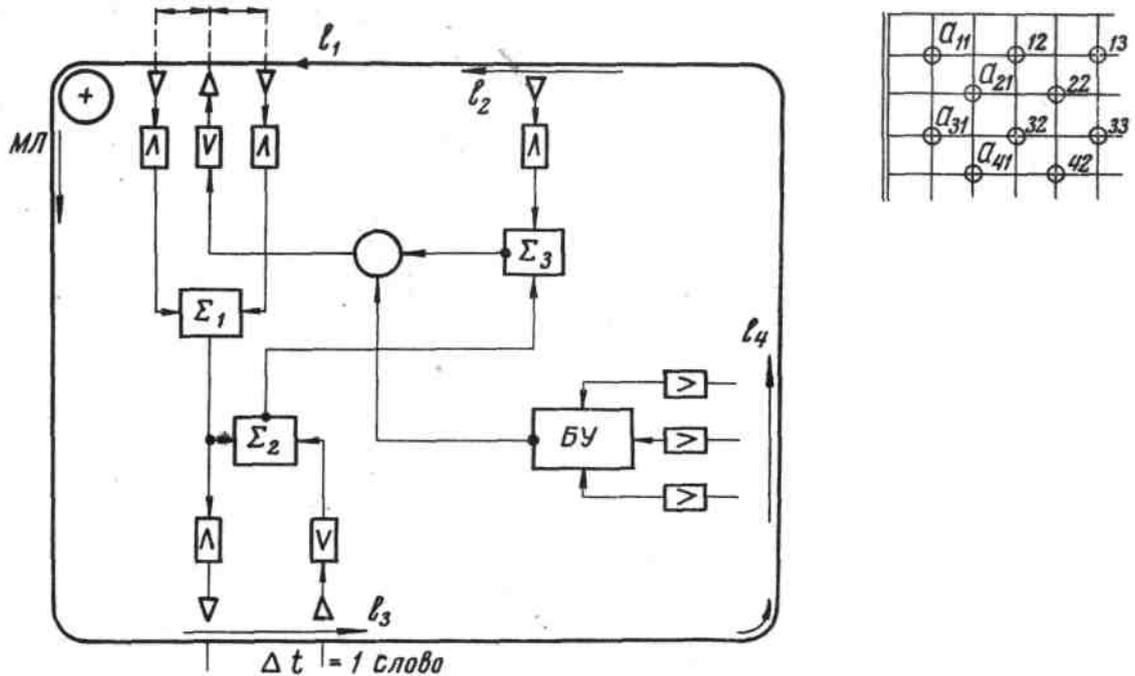
Область применения: уравнения в частных производных с постоянными и с переменными коэффициентами — двухмерный и трехмерный случай; задачи с комбинированными краевыми и начальными условиями, поверхностями разрыва и т. п.

Цифровые дифференциальные анализаторы. В основе машин этого типа лежит использование схемы цифрового интегратора, реализующей один из алгоритмов численного интегрирования. Структурная схема задачи коммутируется из интеграторов и других функциональных блоков аналогично случаю дифференциальных анализаторов непрерывного действия.

Используемые методы численного интегрирования (метод Эйлера, разностный метод и др.) определяют достижимую точность и сложность схемы.

В машинах подобного типа для записи промежуточных результатов используется магнитный барабан. Примерами выполненных машин могут служить «ЦДА-64», «Бендикс», «Райдак», «СРС» «Маддида» и др.

- (1) $\Delta U = 0$,
(2) $\Delta U = f$

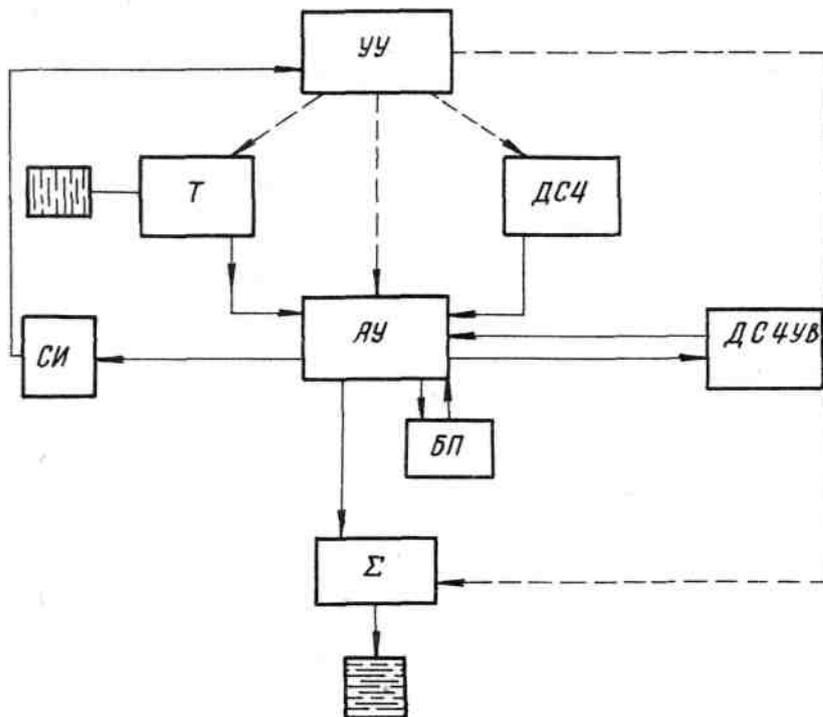


Значения дорожек на магнитной ленте

- l_1 - значения переменных в точках сетки
- l_2 - правая часть при решении уравнения Пуассона
- l_3 - временная задержка
- l_4 - сигналы сохранения граничных условий и синхронизация.

Рис. 5

¹ V. Visin. Сообщение на IV Национальной чехословацкой конференции по математическим машинам, ноябрь, 1955г.



АУ - арифметическое устройство
 УУ - устройство управления
 ДСЧ - датчик случайных чисел
 ДСЧУВ " " " с условной
 вероятностью
 БП - быстродействующая память
 СИ - счетчик испытаний
 Σ - сумматор для вычислений эмпирических средних

Рис. 6

В машинах данного типа увеличение точности влечет за собой возрастание времени решения; при увеличении разрядности чисел на один двоичный разряд время растет в 2 раза. Ввиду этого значительное повышение точности за пределы двух — трех десятичных знаков затруднительно.

Цифровые дифференциальные анализаторы проще и дешевле соответствующих машин непрерывного действия и обладают большей гибкостью, однако ввод экспериментальных функций и подбор масштабов на них несколько сложнее.

Область применения: решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений и задач, к ним сводящихся (теория автоматического регулирования, внешняя баллистика, аэродинамика самолета и т. д.), и моделирование соответствующих процессов.

Машины, решающие задачи по методу статистических проб («Монте-Карло»).

Метод статистических проб состоит в том, что искомые величины интерпретируются как вероятности или математические ожидания. Для приближенного отыскания последних моделируется соответственный случайный процесс и подсчитываются частоты или эмпирические средние, дающие в силу закона больших чисел приближенные значения искомых величин. Решение задачи по этому методу приводит, как правило, к алгоритмам малой связности; поэтому в таких машинах не нужна емкая и сложная память. Точность решения связана с временем решения и практически может быть получена порядка 0,1 — 1%. Специализированные машины этого типа в литературе пока не описаны.

Наряду со специализированными машинами для решения отдельных задач, может быть построена более универсальная машина, решающая задачи по методу статистических проб. Структура подобной машины предложена Ю. А. Шрейдером и характеризуется следующими особенностями (рис. 6):

а) малой внутренней памятью, отсутствием внешней памяти, значительным объемом табличной памяти с быстрым чтением, но медленной записью;

б) быстродействующим арифметическим устройством с простым составом операций и с малой разрядностью, так как точность решения ограничена, а ошибки округления практически отсутствуют;

в) наличием специального устройства для ввода случайных чисел с заданными априорной и условной вероятностями;

г) управлением с пульта путем ввода небольшой программы в «таблицу».

Область применения: краевые задачи для уравнений в частных производных, задачи диффузии и рассеяния частиц, задачи теории столкновений с образованием новых частиц, задачи теории стрельбы, вычисление собственных значений дифференциальных операторов, вычисление многомерных интегралов.

Метод дает существенный выигрыш при применении к многомерным задачам и позволяет эффективно решать отдельные задачи, требующие длительных вычислений на больших универсальных машинах.

Б. Машины для обработки информации

Машины работают по схеме «реальный объект — машина — человек» или «человек — машина — человек». Задача машин состоит во многих случаях в анализе и выделении небольшого количества информации из большого числа данных.

Общие особенности машин: выходные устройства должны быть приспособлены к введению большого объема данных, к их преобразованию и пересортировке, поэтому большое значение приобретает организация внешней памяти.

В ряде случаев входные устройства должны работать совместно с реальным объектом и формировать воспринимаемые от него данные к виду, удобному для работы машины. Выходное устройство должно давать ответ в удобном для чтения и анализа виде.

Арифметическое устройство и программа, как правило, должны быть приспособлены не столько к арифметическим вычислениям, которые в большинстве случаев достаточно просты, сколько к разнообразным логическим операциям: выделению составных частей числа, формированию числа из его частей, условным переходам, групповым переносам данных и т. п.

Машины этого класса должны быть достаточно быстродействующими, так как объем перерабатываемой информации обычно велик.

Машины для проверки истинности высказываний. Эти машины проверкой вычисляют истинность заданных высказываний для различных комбинаций логических аргументов, от которых они зависят. Применяется либо метод последовательного обзора всех комбинаций значений аргументов, дающий все существующие решения, либо метод случайных переходов, дающий отдельные частные решения с экономией во времени вычислений.

Из литературы известна машина Калина и Буркхарта, позволяющая вводить с помощью многопозиционных переключателей восемь логических переменных и логические связи между ними. Анализируются все комбинации аргументов. Назначение машины — демонстрация основных положений математической логики. Аналогичной является машина фирмы «Ferranti», на которой могут исследоваться логические высказывания, содержащие семь аргументов.

Машины для проверки истинности высказываний пока не нашли практического применения, так как еще слабо выявлен круг задач, для решения которых они могут потребоваться. Предположительно такие машины могут оказаться полезными для проверки юридических документов, проверки правильности переключений стрелок на железнодорожном транспорте, при контроле правильности построения схем автоматики и в других подобных задачах.

Машины для решения сложных логических задач. К этому типу машин следует отнести специализированные машины с программным управлением для перевода текстов с иностранных языков, машины для составления программ решения задач, а также машины для анализа и преобразования выражений, заданных аналитически.

Для подобных машин характерна развитая и специализированная система логических операций и достаточно большой объем памяти.

Машины для решения тактических задач. Особенностью этих машин является наличие элементов случайного выбора при решении задачи, в соединении с большим объемом арифметических вычислений. В качестве примеров можно указать на машину, специализированную для составления графиков движения поездов, а также на «Logistic Computer»¹, предназначенный для решения тактических задач.

Машины для подбора библиографии. Машины этого типа должны обладать гибкой, систематически пополняющейся памятью. Важным требованием является самоорганизуемость памяти ввиду того, что в результате развития новых отраслей знания и стирания границ между существующими отраслями науки классификация научной, технической и других видов информации меняется.

По заданным классификационным признакам, вводимым с пульта управления, машина должна производить подборку информации и печатание библиографических сводок.

Машины для статистического анализа и обработки информации. Для выяснения роли тех или иных факторов, влияющих на характер производственного процесса или массового эксперимента, во многих случаях требуется производить статистическую обработку (корреляционный анализ) поступающей информации по всевозможным сочетаниям соответствующих процессу факторов и выделить существенные факторы, оказывающие такое влияние. СЦМ, построенные для этой цели, носят название коррелятивных анализаторов. Такие машины с успехом можно было бы применить, например, к исследованию условий появления волосовки в стали после выплавки, условий, влияющих на размеры зерен в прокатанном листе и на другие дефекты. Вычисление статистических характеристик потребуется также при автоматизации статистического метода контроля качества промышленной продукции.

Известен также пример устройства, которое периодически обследует показания сотен различных приборов, характеризующих состояние производственного процесса. Показания всех приборов регулярно печатаются на ленту. В случае нарушения режима показания соответствующих приборов печатаются красным цветом вне очереди; при этом привлекается внимание оператора для анализа процесса и принятия мер.

Машины для экономического анализа. Существует ряд специализированных машин, в которых количество исходных данных и результатов решения велико по сравнению с количеством выполняемых операций. К числу таких задач относятся различные задачи статистики и экономики, бухгалтерского учета и обработки данных технических и научных испытаний.

Для решения подобных задач, в частности, приспособлены счетно-аналитические машины, работающие на перфокартах в десятичной системе счисления и выполняющие сложение, вычитание, сортировку данных и другие операции. В последние годы появился ряд машин аналогичного назначения, но обладающих значительно большими возможностями по сравнению со счетно-аналитическими машинами старого образца. Такие машины конструируются на основе использования электронных схем, магнитных накопителей и снабжены развитыми устройствами для ввода и вывода информации; тем не менее, перфокарты сохраняют свое значение благодаря возможности сортировки, визуального контроля и другим преимуществам.

¹ «Proc. of IRE», Oct., 1953.

В подобных машинах применяется представление чисел в десятичной системе с фиксированной запятой. Некоторые из них не обладают программным управлением. К таким, например, относится машина «IBM101», обладающая возможностью сортировки перфокарт, накоплением данных и печатью их; схемы ее используют электронные лампы. Работающая на перфокартах машина «Спиц Телли» предназначена для бухгалтерского учета и обрабатывает товарные карточки в количестве 90 тыс. в день.

Другие машины дают возможность вводить небольшую программу вычислений с помощью коммутации. Это позволяет делать несколько арифметических операций над числами, последовательно вводимыми и выводимыми из машины с помощью перфокарт. Представителем данного типа машин является вычислительный перфоратор «IBM602А», он содержит схемы на электронных лампах.

Третий вид машин отличается возможностью ввода программы с перфокарт. Команды вводятся в машину в той последовательности, в какой они нанесены на перфокартах, и синхронно с вводом и выводом чисел. К числу таких машин относится программный вычислитель «СРС», работающий с четырехадресной системой команд и шестнадцатью статистическими регистрами, а также одноадресная машина «Гамма», в которой программа может вводиться как с перфокарт, так и посредством коммутации.

Четвертый вид машин для целей экономики и статистики составляют машины с гибким программированием и быстродействующими накопителями типа магнитного барабана и линий задержек. Эти машины близки к универсальным, но все же отличаются от них меньшими возможностями. Сюда относится английская машина «LEO», имеющая накопитель на 64 ртутных линиях емкостью в 2048 двоичных семнадцатизначных чисел. Эта машина составляет платежные ведомости на 1700 человек менее, чем за час. Другими машинами этого вида являются «Elescom-120», «iBM650» «Monrobot».

Как известно из литературы, автоматизация экономических и статистических расчетов в широком объеме в пределах, например, деятельности одного промышленного предприятия представляет собой очень большую задачу, логика которой зачастую сложнее логики многих научных задач. Поэтому в последнее время для этой цели все в большей и большей мере находят применение мощные цифровые машины с программным управлением. Некоторые из этих машин при полной универсальности обладают дополнительными удобствами для решения задач экономики и статистики. К их числу следует отнести машины «Univac» и «IBM705».

Развитие современных специализированных машин для целей планирования, учета и статистических исследований тесно связано с разработкой более рациональной организации системы учета и способов накопления первичной информации и является актуальной задачей ближайших лет.

Машины для физиологических и медицинских исследований. В настоящее время внедрение точных диагностирующих приборов в медицину требует больших усилий для расшифровки получаемой информации.

Как пример, можно указать на проблему, поставленную физиологами. Требуется построить машину, которая по данным восьмидесяти снятых синхронно с разных точек мозга энцефалограмм, давала информацию об изменениях в этих энцефалограммах и позволила бы проанализировать, как на энцефалограммах сказываются те или иные внешние раздражители или функциональные расстройства. Такого рода дешифраторы могли бы быть применены и в клиниках.

Современные теории позволяют решать математическим путем некоторые задачи теории наследственности (генетики). Можно полагать, что развитие биологической науки приведет в ближайшие годы к необходимости применения математических машин в этой области и, весьма вероятно, к необходимости создания специализированных машин для этой цели.

Могут получить развитие цифровые машины для моделирования процессов, происходящих в сердце, нервной системе и других органах человека, наподобие электрической модели сердца, позволяющей интерпретировать электрокардиограммы.

В. Машины для управления производственными процессами и реальными объектами

Эти машины работают по схеме «реальный объект — машина — реальный объект», а иногда с участием человека (оператора). И в том и другом случае схема работы — замкнутая, с обратной связью.

Основные требования к управляющим машинам определяются условиями их применения. Внешние устройства должны соединяться с измерительными датчиками реальных объектов; как правило, требуются устройства для преобразования формы представления информации, в частности, преобразующие величины из непрерывного представления в цифровое, и наоборот. Машины могут работать при необычных температурных условиях и загрязненной атмосфере. Габариты машин должны отвечать конкретным условиям размещения. Следует подчеркнуть, что построение и успешное применение управляющих машин возможно только на основе знания законов протекания процессов и правильно сформулированного математического описания их динамики.

Машины, управляющие технологическими операциями. Процесс обработки детали на станке может быть изображен в виде программы, учитывающей все требования чертежа. Записанная на магнитную или перфорированную ленту программа устанавливается на управляющее вычислительное устройство; команды последовательно выполняются станком, при этом осуществляется контроль за соответствием истинных положений движущихся частей станка их вычисленным и заданным в программе значениям. Такого рода методы особенно эффективны при токарной обработке сложных профилей, фрезеровке фасонных поверхностей и т. п. и позволяют значительно сократить время на перестройку станка и улучшить организацию механической обработки при серийном производстве. Известны применения вычислительных машин для управления химическими процессами.

По характеру выполняемых функций машины этого класса можно разделить на следующие виды:

а) Машины, обеспечивающие необходимый порядок выполнения технологических операций. Сюда относятся машины, осуществляющие управление станком, и устройство для программного управления блокомингом. Такие машины могут работать по замкнутой или разомкнутой схеме, внося или не внося поправки на действительное поведение управляемого объекта. Эти машины по существу задают нормальный режим технологического процесса.

б) Машины, контролируемые правильный или оптимальный ход процесса и обеспечивающие внесение нужных поправок. Эти машины связаны с приборами, регистрирующими отклонения процесса от нормального хода, и вычисляют способ перехода к правильному или оптимальному режиму работы, реализуя затем этот

переход и исправляя, по возможности, сделанные ошибки. Подобная машина может, например, следить за отклонением размеров прокатываемого слитка от номинала и регулировать движение следующих клетей, так чтобы эти отклонения погасались.

Существенное направление развития машин этого вида состоит в расширении применения принципа минимизации, согласно которому для каждого состояния процесса машина решает несколько вариантов продолжения процесса и выбирает из них оптимальный вариант по заданному критерию. Это позволяет вести процесс по наивыгоднейшему режиму и обеспечивать, например, наибольшую производительность, наилучшее использование сырья, наиболее быстрое достижение требуемого результата и т. п.

Машины, производящие статистическую обработку результатов контроля и корректирующие режим процесса. Эти машины также связаны с приборами, контролирующими ход процесса. Обработывая показания приборов (вычисление средних, дисперсии, коэффициентов корреляции и т. п.) машины дают сжатую информацию о ходе процесса, позволяющую человеку произвести соответствующую регулировку. Например, измерения, производимые по длине прокатанного изделия, дают несколько различные результаты. Производя статистический анализ измерений, можно выбрать величины обжатий, при которых в среднем будет расходоваться минимальное количество металла.

Преимущество подобных машин состоит в том, что их можно использовать в работе вместе с неполностью автоматизированными агрегатами. В этом случае воздействие на реальный объект происходит не непосредственно, а через оператора. В частности, такие машины можно применять на всех действующих в настоящее время прокатных станах. Машины же управляющие технологическими операциями, должны выпускаться совместно с разработкой и выпуском новых автоматических агрегатов.

Следует обратить внимание на необходимость развития поисковых работ, направленных на разработку новых эффективных способов управления производственными процессами. В частности, представляют интерес работы, направленные на изыскание экономичного способа управления процессами путем вычисления оптимальных режимов регулирования в условиях случайных возмущений, накладываемых на процесс¹

Машины для управления движением транспорта. Управляющие машины для движущихся объектов составляют в перспективе обширный класс машин, разнообразных по своему назначению и конструктивному оформлению.

Достаточно здесь упомянуть лишь некоторые актуальные задачи в этой области: управление торможением железнодорожных вагонов на сортировочных горках; навигационные вычислительные машины для воздушного и морского транспорта; регулирование воздушного движения и автоматическая посадка самолетов на аэродромы, автоматическое вождение поездов при электровозной и тепловой тяге.

Повидимому, в ближайшем будущем машины, управляющие производственными процессами и движущимися объектами, будут обладать возможностью накапливать опыт и в дальнейшем выбирать оптимальный способ решения задачи, приводящий к наилучшим результатам. Это повлечет конструирование машины со своеобразно организованной памятью, хранящей сведения, которые пришлось запоминать много раз и «забывающей» те данные, которые в течение долгого времени не были нужны (не подтверждались). Сейчас трудно предсказать все возможности таких машин.

III

Границы, определяющие сферу преимущественного применения специализированных и универсальных цифровых математических машин по сравнению с машинами-аналогами, определяются следующими факторами.

1. Сложность логических условий, накладываемых на задачу. Цифровые машины легко реализуют любые логические, тактические или иные условия, если их можно выразить на языке математической логики. В электро моделирующих устройствах непрерывного действия возможно автоматическое выполнение лишь некоторых простейших логических переходов таких как изменение масштабов переменных и времени или перекоммутация структуры в зависимости от амплитудных и временных соотношений переменных в процессе решения задачи. Введение более сложных и комбинированных логических условий в машины-аналоги практически весьма затруднено.

2. Точность представления переменных величин и точность результатов решения. В машинах-аналогах, как известно, точность представления переменных величин ограничивается невысокими пределами, так как ошибки изготовления элементов функциональных блоков, колебания номиналов параметров и изменение их со временем и от других условий — все это служит непосредственными источниками погрешностей в представлении величин и их преобразовании. Ошибки в результатах решения, кроме того, зависят от структуры системы уравнений и ее устойчивости.

В машинах дискретного действия представление и преобразование величин может быть обеспечено с любым количеством разрядов и точностью, поддающейся оценке для каждого типа машины. Поэтому цифровая машина в состоянии обеспечить любую практически требуемую точность решения задачи.

Отсюда вытекает, что машины-аналоги следует использовать для качественного анализа задачи или решения ее с ограниченной точностью, а также в случаях, когда точность исходных данных либо вводимых экспериментальных функций невелика.

Цифровые машины имеют перспективу преобладающего применения во всех остальных случаях.

3. Характер реального процесса или объекта совместно с которым работает математическая машина. Производственные процессы, имеющие существенно-дискретный характер, а также процессы непрерывного действия с часто изменяемыми режимами и условиями работы, естественно, требуют применения специализированных машин дискретного действия. Существенно-непрерывные процессы более удобны для применения машин-аналогов, если только по условиям точности и характеру математических уравнений это допустимо.

Следует отметить, что при совместной работе специализированной цифровой машины с процессом непрерывного действия могут возникнуть ограничения, связанные с дискретностью выдачи решений и запаздываниями, вносимыми математической машиной в замкнутую систему «объект — машина — объект».

¹ Напр., работа Coales'a, доложенная на Брюссельской международной конференции по математическим машинам-аналогам в сентябре 1955 г.

Электро моделирующие устройства непрерывного действия при работе с реальной аппаратурой имеют преимущество в том, что ввиду своего быстродействия могут не внося искажений работать в реальном масштабе времени с быстропротекающими процессами.

4. Объем и сложность аппаратуры. Машины-аналоги, работающие по методу математического моделирования и построенные из типовых функциональных блоков, по объему аппаратуры прямо зависят от сложности задачи. С ростом порядка системы дифференциальных уравнений количество аппаратуры возрастает.

Цифровые машины с программным управлением состоят из типовых универсальных блоков (памяти, арифметического, управления, внешних), количество которых с возрастанием сложности задачи не меняется; может лишь увеличиваться емкость памяти.

В машинах-аналогах, работающих в инфранизком диапазоне частот, переходные процессы и возмущения от внешних случайных причин практически мало влияют на процесс решения задачи и ее результаты, поэтому наладка и техническая эксплуатация аппаратуры непрерывного действия относительно просты.

Машины дискретного действия характеризуются использованием прямоугольных импульсов с частотами повторения до 1 мГц и выше и фронтами импульсов в диапазоне 0,1—1,0—5,0 мсек.

Высокий частотный диапазон и недопустимость потери или искажения информации делают аппаратуру дискретного действия относительно сложной в наладке и пока менее надежной в эксплуатации по сравнению с аппаратурой непрерывного действия. Преодоление этих ограничений должно идти по линии повышения качества радиотехнических элементов (в том числе полупроводниковых) и перехода на более надежные безламповые схемы.

Приведенное сравнение показывает, что сфера преимущественного применения цифровых вычислительных машин весьма широка и имеет перспективу значительного развития. Отметим также, что проникновение методов и инженерных приемов, используемых в электронных цифровых машинах, в технику машин-аналогов (электромоделей) позволит несколько расширить возможности их применения и, в частности, повысить точность решения.

IV

Данная выше классификация позволяет определить перечень СЦМ, подлежащих разработке и производству. По каждому из классов может быть построена одна или несколько СЦМ исходя из потребностей практики. Эти потребности могут быть выяснены достаточно полно только на основе широкого внедрения в научно-технические исследования универсальных цифровых машин. Оснащение советских научных учреждений и проектных организаций цифровыми машинами разного типа (главным образом общего назначения) позволит выделить класс задач, которыми экономически невыгодно загружать универсальные машины или решение которых настоятельно необходимо, но невозможно на универсальных машинах современного типа.

Систематическое изучение потребностей народного хозяйства и различных отраслей науки и техники в новых специализированных средствах для ускорения расчетов, замены натуральных испытаний и автоматизации управления процессами является одной из важных и неотложных задач отраслевых и академических научно-исследовательских институтов. В результате такой работы могут быть выработаны технически и экономически обоснованные предложения о типах специализированных цифровых машин, подлежащих проектированию и серийному выпуску промышленностью.

Необходимо подчеркнуть, что весьма перспективная и имеющая народнохозяйственное значение проблема внедрения специализированных математических машин для управления промышленными процессами и агрегатами по оптимальным режимам может успешно разрешаться только на основе комплексно поставленных научно-исследовательских работ по изучению и необходимой переработке технологических процессов и конструкции агрегатов; без знания динамики процессов, не имея математических описаний процессов — управлять ими по наивыгоднейшим режимам, конечно, невозможно.

Следует привлечь к этой важной проблеме внимание специалистов и технологов соответствующих отраслей промышленности, а также ученых академических и учебных институтов.

Что касается методов конструирования новых типов СЦМ, то здесь можно указать на два возможных подхода.

Разработка СЦМ, основанных на новых принципах действия, или для специальных условий применения представляет собой обычно творческую задачу, при решении которой конструкция новой машины является в первую очередь результатом поисковых работ, исследований и эксперимента.

Во многих случаях новая конструкция СЦМ может быть построена из типовых функциональных блоков, используемых в универсальных машинах, с добавлением новых схем и блоков, соответствующих специфике и логике задачи.

С освоением серийного производства универсальных цифровых машин необходимо провести работу по нормализации функциональных блоков машин (запоминающие блоки и секции, арифметические блоки, блоки программного управления, входные и выходные блоки и т. п.), а также нормализация ячеек с элементарными схемами (клапан, триггер, инвертор и т. д.). Нормализация должна предусматривать тщательную отработку схем, конструкций, технологии и технической документации и обеспечивать для принятых входных и выходных параметров каждого блока полную взаимозаменяемость — электрическую и механическую. Нормализованные узлы, выпускаемые в серийном производстве, предоставят конструкторам необходимый материал для ускоренного проектирования, производства и отработки новых образцов специализированных цифровых машин. Они дадут также возможность исследовательским и конструкторским организациям ряда отраслей промышленности самостоятельно работать над созданием новых типов машин для обработки информации и для управления процессами.

К числу неотложных задач конструкторов и технологов в области математического машиностроения относится всемерное внедрение схем на новых безламповых элементах, техники печатного монтажа, а также автоматизации ряда производственных процессов изготовления элементов и поточной сборки ячеек и узлов машины.

Предусмотренное Директивами XX съезда КПСС развитие отрасли математического машиностроения и рост производства машин создают необходимые предпосылки для успешного решения насущных научных инженерных и производственных задач в данной отрасли техники.

МОДЕЛИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

Математические машины являются такой научно-технической базой, применение которой необходимо для быстрого развития ряда областей современной науки и техники.

Основные группы современных математических машин составляют машины непрерывного действия (аналоговые, или, иначе, моделирующие установки) и цифровые вычислительные машины, которые при решении многих современных проблем выгодно дополняют друг друга, подтверждением чего, в частности, служит комплексное оборудование ими ряда крупных вычислительных и исследовательских центров в США.

В свою очередь, моделирующие установки строятся либо на принципах физического моделирования, при котором модель имеет одинаковую с оригиналом физическую природу, либо на принципах математического моделирования.

В последнем случае модель имеет иную, по сравнению с оригиналом, физическую природу, однако ее функционирование описывается тождественными уравнением или системой уравнений по отношению к тем, которые описывают явления, происходящие в оригинале.

Один из возможных вариантов основной классификации аналоговых (моделирующих) математических машин непрерывного действия представлен на рис. 1.

Основная классификация в этой схеме проводится по специализации машин в соответствии с видом решаемых математических уравнений, которые описывают исследуемые явления или процессы в различных областях науки и техники.

Вторичными признаками классификации являются основные технические данные, которые отличают схемы и конструкции таких машин.

Более детальные различия в схемах машин, такие, как использование для их построения интегрирующих или дифференцирующих блоков, различия в рабочих масштабах времени или в способах замера выходных данных, а также в особенностях выходов для сопряжения машин с испытуемой аппаратурой и т. п. в классификационной схеме не учтены в целях ее упрощения.

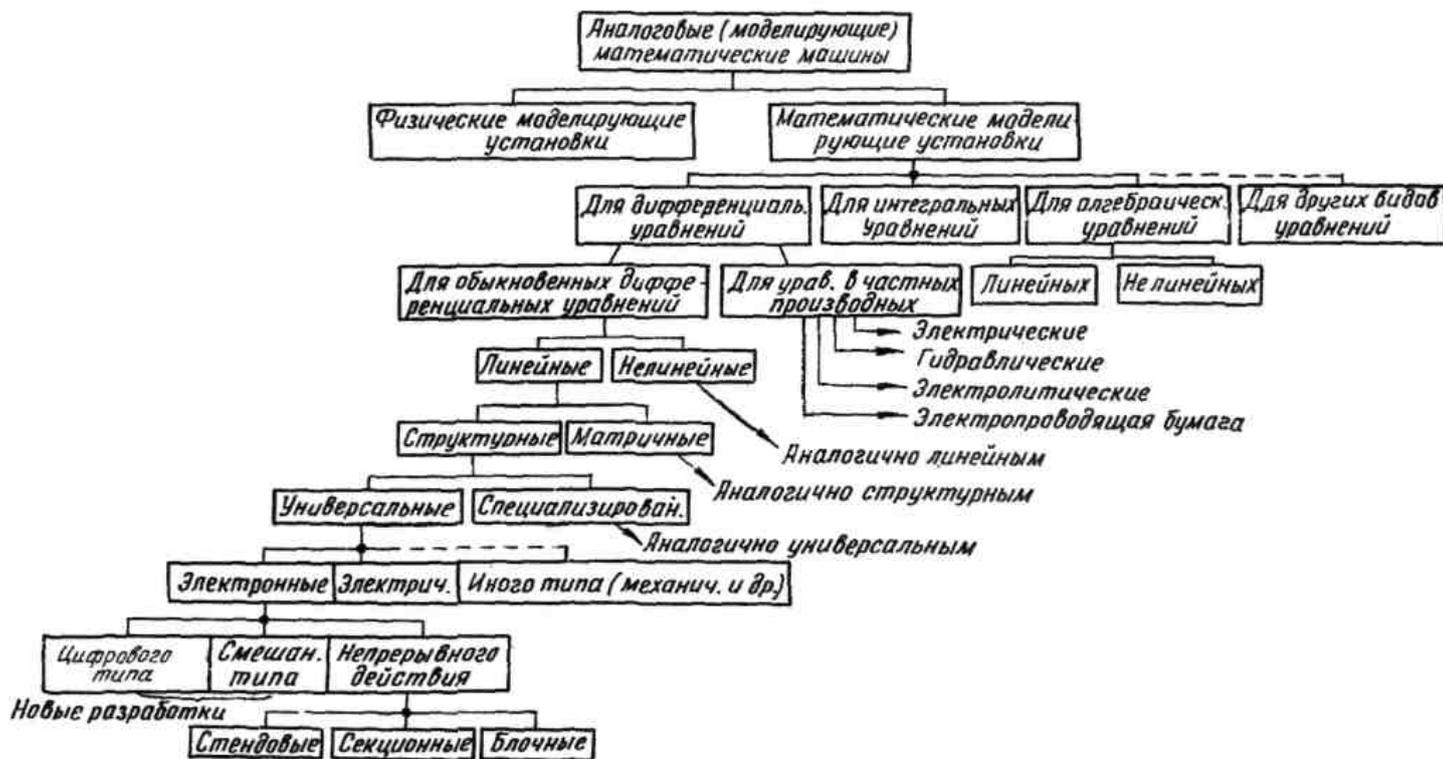


Рис. 1 Основная классификация аналоговых (моделирующих) математических машин непрерывного действия

Из приведенной классификации видно, что аналоговые, или, иначе, моделирующие установки представляют весьма обширную группу математических машин.

Рассмотрим прежде всего машины, имеющие в настоящее время наибольшее практическое применение.

К машинам такого типа относятся в первую очередь линейные и нелинейные электрические моделирующие

установки, предназначенные для исследования явлений и процессов, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Значение этих машин для решения многих практических задач весьма велико. Так, например, при их помощи исследуется движение тел и объектов, и в частности таких, как авиационные объекты.

Исследование динамики различных машин и механизмов, а также следящих систем и систем автоматического регулирования во всем их разнообразии также весьма эффективно проводится на этих машинах.

Наконец, изучение различных вопросов теории колебаний и в особенности вопросов теории устойчивости применительно к различным случаям их инженерного применения с успехом осуществляется на данных установках.

Помимо вышеуказанной группы электро моделирующих установок, большое практическое значение имеют также такие математические машины данного класса, которые предназначены для исследования систем, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных.

Применение таких машин весьма облегчает расчеты магнитных полей в электрической аппаратуре, электрических полей в электро-и радиодеталях, температурных полей в сооружениях и средах гидродинамики, определение распределения потоков жидкостей под плотинами, в нефтеносных пластах, у колодцев и т. п.; успешно исследуются также задачи обтекания тел несжимаемой жидкостью при циркуляции, задачи о кручении призматических стержней и ряд других, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных вида Лапласа, Пуассона или Фурье.

Из изложенного следует, что машины указанного класса для обоих рассмотренных выше видов имеют исключительно большое практическое значение для развития различных областей современной науки и техники. В последнее время появились также сведения о попытках их применения для анализа деятельности некоторых биологических систем (щитовидной железы, сердца).

Намечается также широкое использование данных машин (или специализированных вычислительных устройств, построенных на их элементах) для целей автоматического управления различными промышленными процессами или агрегатами.

Какие же основные требования предъявляются к математическим машинам указанного класса, предназначенным для работы в лабораториях и вычислительных бюро?

Общие требования

1. Удобство и достаточная простота постановки задачи на машине, т. е. удобство эксплуатации.

2. Точность решения задачи, достаточная для требований инженерной практики.

В большинстве случаев допустимы погрешности для точных установок около 1—2%, для типовых промышленных установок около 5—10%. Следует отметить, что погрешность решения задач на математических машинах зависит не только от свойств самой машины, но и от характера решаемой на ней задачи, а также от того, как оператор вводит ее в машину. Поэтому для характеристики самой машины правильнее говорить о точности ее блоков, осуществляющих отдельные математические операции. При этом погрешности, вносимые блоками, обычно в среднем бывают на порядок меньшими, чем погрешности в приборном решении задачи в целом.

3. Наглядность и достаточная точность индикации и регистрации выходных данных с машины. Дополнительная погрешность от регистрации должна быть минимально возможной.

4. Возможность и простота варьирования в широких пределах исходными данными задачи (коэффициентами, начальными условиями и т. п.) для выявления ее наилучшего решения.

5. Надежность в эксплуатации и стабильность во времени для получаемого решения.

6. Минимальная стоимость; возможно, малые габариты и вес.

7. Возможность построения из типовых стандартных блоков в целях улучшения условий эксплуатации и производства.

8. Наибольшая широта охватываемых задач при универсальном исполнении.

Дополнительные требования к моделирующим установкам для систем обыкновенных дифференциальных уравнений

1. Возможность работы в различных масштабах времени, в том числе и в натуральном (1 : 1), т. е. в том же темпе, как и для исследуемого явления или процесса.

2. Возможность сопряжения с реальной испытуемой аппаратурой в общую систему управления или автоматического регулирования (мощные выходные усилители, фильтры, площадки, вырабатывающие угловые перемещения приборов и другие переходные блоки).

3. Возможность выполнения транспортабельного варианта конструкции, удобного для перевозок в целях использования машины при натурных испытаниях.

Дополнительные требования к моделирующим установкам для систем дифференциальных уравнений в частных производных

1. Возможность и наглядность автоматического съема данных со всей области исследуемых величин.

2. Возможность реализации достаточно большого количества узловых точек (для интеграторов—сеток), а также их увеличения в определенной области решаемой задачи (введение так называемой «лупы»).

3. Возможность задания и легкого варьирования краевых условий.

4. Возможность решения одно-, двух- и трехмерных задач.

Естественно, что в разработанных и выпускаемых промышленностью машинах реализованы не полностью и не все из указанных выше основных требований, чем и определяется в известной степени несовершенство этих машин.

Объясняется это тем, что часть из этих требований иногда находится во взаимном противоречии друг с другом (например, стоимость и точность машины).

На основании проведенного анализа развития математических машин непрерывного действия в нашей стране для обоих из рассматриваемых нами видов можно сделать следующие выводы.

Вначале были предложены идеи и конструкции машин, построенных на механических принципах (А. Н. Крылов, 1903—1904 гг.; С. А. Гершгорин, 1925 г.). Затем для интеграторов обыкновенных дифференциальных уравнений начало развиваться электромеханическое направление, параллельно с которым несколько позднее появилось направление, связанное с применением электронных схем. Электромеханическое направление привело, в частности, к созданию нескольких образцов уникальных дифференциальных анализаторов. Однако ввиду большой гибкости и легкости создания электронных схем последние в настоящее время почти полностью исключают возможность построения в дальнейшем дифференциальных анализаторов, построенных только на электромеханическом принципе.

В тех же случаях, когда от схемы машины не требуется большого быстродействия, последняя может строиться также на сравнительно простых электрических узлах (потенциометрах, следящих системах, реле и т. п.), которые по точности работы и простоте своего устройства в ряде случаев оказываются более целесообразными, чем эквивалентные электронные схемы.

Таким образом, в настоящее время параллельно существуют два основных направления в создании машин-интеграторов обыкновенных дифференциальных уравнений: электронный и электрический варианты. Чаще же всего машины строятся на комбинированном принципе, т. е. частично на электронных схемах и частично на схемах, использующих электрические и электромеханические детали.

Развитие же электронных схем, применяемых в данных машинах, происходило у нас по линии перехода от усилителей переменного тока к усилителям постоянного тока, так как первые не обеспечивали работы машины в натуральном масштабе времени без существенного ее усложнения. Вначале усилители постоянного тока имели небольшой коэффициент усиления (без обратных связей), который постепенно увеличивался.

Для достижения лучшей точности операционных усилителей, что особенно важно для больших и сложных машин, в их схемах осуществился переход от ручной установки нуля в усилителе к его автоматической стабилизации. Схемы отрицательных обратных связей и ввода начальных условий для таких усилителей постепенно совершенствовались; также совершенствовались со временем и электрические схемы для ввода в машину графиков переменных коэффициентов.

После машин, предназначенных для решения линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, были разработаны новые образцы, которые допускают исследования на них как линейных, так и нелинейных систем. Эти образцы ввиду возрастания сложности задач, которые на них должны решаться, а также в соответствии с требованиями повышения точности, экономичности и удобства в эксплуатации постепенно совершенствуются как по своим схемам, так и по конструктивному выполнению.

В настоящее время уже имеются нелинейные интеграторы для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений (электро моделирующие установки) промышленных типов, подразделяющиеся на три основные группы: малогабаритные, широкого применения, но с ограниченным составом блоков; нелинейные образцы установок средней мощности; крупные машины большой мощности с повышенной точностью для основных функциональных блоков.

Для данной группы математических машин примерно аналогичная картина развития наблюдается и за рубежом.

Для машин-интеграторов дифференциальных уравнений в частных производных вначале наметилось два основных пути отхода от механического принципа. Первый путь — применение электрических схем-сеток; второй путь — применение гидравлических принципов. В течение длительного времени оба этих основных пути для данного вида машин развиваются параллельно, причем электрические интеграторы-сетки являются более простыми, но зато в отличие от гидравлических интеграторов менее приспособлены для решения уравнений вида Фурье.

В последнее время ввиду сложности своего конструктивного выполнения, особенно при построении двух- и трехмерных систем, гидравлические интеграторы при решении уравнений вида Лапласа, Пуассона начинают сдавать свои позиции электрическим машинам, которые имеют тенденцию к дальнейшему развитию. Электроинтеграторы-сетки выпускаются промышленностью в виде машины «ЭИ-12», которая, однако, нуждается в техническом усовершенствовании (машина не имеет автоматического съема напряжений с узловых точек, вывода данных на электронно-лучевой индикатор и т. п.).

За рубежом данный тип машин, т. е. интеграторов-сеток, выпускается также лишь в виде отдельных образцов, имеющих разную степень совершенства своего технического выполнения.

Однако в ряде европейских стран (Франция, Бельгия и др.) более, чем у нас, находят применение электролитические ванны и электропроводящая бумага, которые используются для решения задач, описываемых уравнениями Лапласа или Пуассона.

Для решения же задач, описываемых уравнением Фурье, последние (электролитические ванны и электропроводящая бумага) ввиду отсутствия у них достаточной распределенной электрической емкости или индуктивности использованы быть не могут, что и ограничивает область их возможного применения.

Перейдем теперь к выводам по рассмотрению особенностей структуры и технических характеристик основных из разработанных в СССР за пятую пятилетку электро моделирующих математических машин, предназначенных для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Всестороннему рассмотрению при этом были подвергнуты следующие машины:

1. Линейные, общего применения:

- а) «ЭМУ-3» и «ЭМУ-4» ИАТ АН СССР;
- б) «ИПТ-4», «ИПТ-5» и «МПТ-9» НИИ МПСС;
- в) машина типа «Оператор», КБ МПиСА;
- г) «МЛ-2» КБ МПиСА.

2. Нелинейные, малогабаритные:

- а) «ЭМУ-5» ИАТ АН СССР (рис. 2);
- б) «МН-7» КБ МПиСА (рис. 3).

3. Нелинейные средней мощности:

- а) «МПТ-11», «МН-1», «МН-2», «МН-3» КБ МПиСА (рис. 4, 5, 6 и 7 соответственно);
- б) электронный дифференциальный анализатор ЭДА Энергетического института АН СССР (рис. 8).

4. Нелинейные большой мощности:

- а) машина типа «Полет» КБ МПиСА (рис. 9);
- б) машина типа «МН-8» КБ МПиСА (рис. 10).

5. Специализированные, нелинейные:

- а) автомат тяговых расчетов «АТР-1» филиала КБ МПиСА, предназначенный для решения уравнения движения железнодорожного состава;
- б) электронная моделирующая установка «МН-9» КБ МПиСА для исследования динамики основных частей часового механизма (системы баланс-спираль).

Основные характеристики вышеуказанных машин приведены в табл. 1.

Все вышеуказанные машины построены на операционных усилителях постоянного тока, работающих в режиме глубоких отрицательных обратных связей.

Схемы таких усилителей, разработанных как в КБ МПиСА, так и в ИАТ АН СССР, являются в достаточной мере совершенными и по всем основным характеристикам не уступают известным современным зарубежным образцам¹.

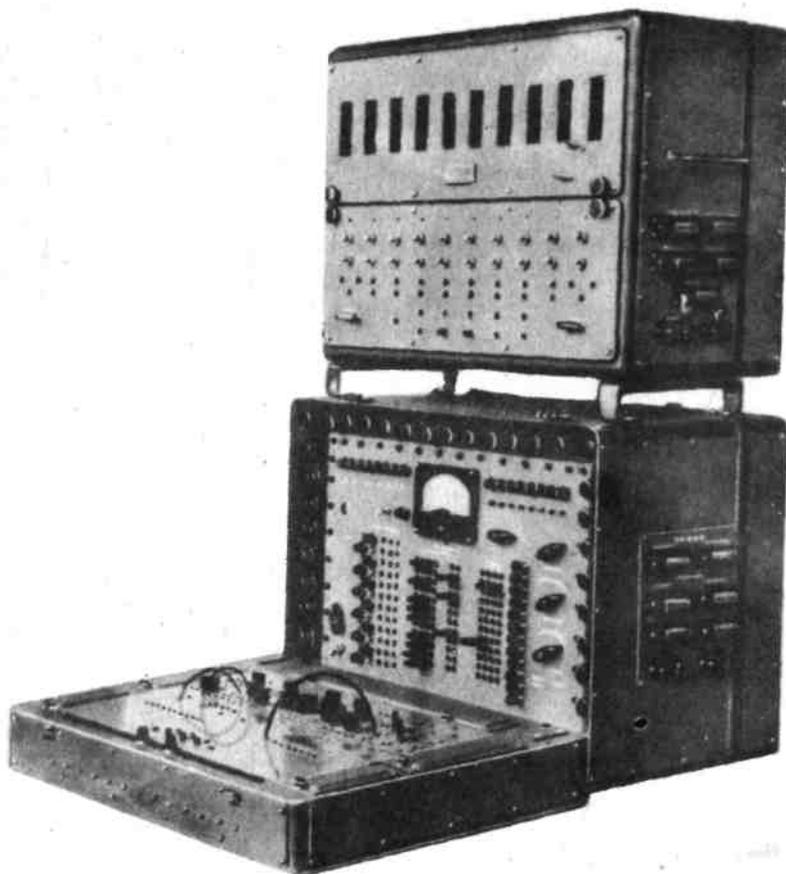


Рис. 2. Общий вид нелинейной моделирующей установки ЭМУ-5

В частности, этими организациями разработаны два оригинальных варианта усилителей с экономичным выходом.

По своей конструкции усилители выполняются в виде компактных легкоъемных блоков. На рис. 11 в качестве примера представлен общий вид усилителя «УПТ-15», разработанного в КБ МПиСА, имеющего индивидуальную автоматическую стабилизацию нуля при помощи схемы, в которой применен электромеханический вибратор.

На рис. 12 приведен общий вид типового усилителя «УПТ-4» (применяется в электромоделях типа ИПТ) и рядом с ним новый малогабаритный усилитель «УПТ-19», схема которого (рис. 13) построена на миниатюрных радиолампах типа «Дробь».

Усилитель «УПТ-19», разработанный в КБ МПиСА, предназначается для использования в новых малогабаритных электромоделирующих установках и, в частности, в установке «МН-М» (рис. 12, а также рис. 2 и 3 дают ясное представление о тенденции перехода от сравнительно крупных математических машин и их блоков к малогабаритным современным установкам и их деталям).

Габариты «ЭМУ-5» составляют 670x600x500 мм (линейная часть) и 670x500x330 мм (нелинейная приставка). Габариты «МН-7» 700x440x380 мм.

¹ Публикация об операционном усилителе постоянного тока с ручной установкой нуля имела в статье J. R. Ragazzini, R. H. Pandal, F. A. Russel в журнале «Proc. IRE». May, 1947, а об усилителе с автоматической индивидуальной стабилизацией нуля в статье A. Goldberg в журнале «RCA Review» № 2. June, 1950

**ОСНОВНЫЕ ОБРАЗЦЫ ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРУЮЩИХ УСТАНОВОК, РАЗРАБОТАННЫХ В СССР В ПЯТОЙ ПЯТИЛЕТКЕ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ, ОПИСЫВАЕМЫХ ОБЫКНОВЕННЫМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ
УРАВНЕНИЯМИ**

№№ по порядку	Наименование машины и ее тип	Основные технические данные	Конструктивные особенности	Разработчик
I. ЛИНЕЙНЫЕ ОБЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ				
1	Электронная моделирующая установка "ЭМУ-3"	Уравнения до шестого порядка с постоянными и переменными коэффициентами. 12 операционных усилителей с ручной установкой нуля. Кулачковый вариатор переменных коэффициентов. Структурный тип	Стендовая, уменьшенного габарита. Набор задачи шнурами между блоками	ИАТ АН СССР
2	Электронная моделирующая установка "ЭМУ-4"	Уравнения до седьмого порядка с постоянными и переменными коэффициентами. Вариатор коэффициентов с восемнадцатью перемещаемыми потенциометрами. 14 операционных усилителей с индивидуальной автоматической стабилизацией нуля. Имеет блок типичных нелинейностей (ограничение, люфт, зона нечувствительности). Может сопрягаться с универсальным нелинейным преобразователем и множительным устройством. Структурный тип	Стендовая. Набор задачи на центральном поле со «шведским коммутатором»	ИАТ АН СССР
3	Электронная модель "ИПТ-4"	Уравнения до шестого порядка с постоянными и переменными коэффициентами. 25 блоков переменных и 25 блоков постоянных коэффициентов (три значащие цифры). 33 операционных усилителя с ручной установкой нуля. Блок переменных коэффициентов на шаговом переключателе с равномерной разверткой по времени. Имеет электронно-лучевой индикатор. Может сопрягаться с комплектом электронных нелинейных блоков «КНБ» (три перемножения и три генератора нелинейных функций). Матричный тип	Стендовая. Набор задачи установкой блоков в ячейках и переключателей на панелях	НИИ МПСС
4	Электронная модель "ИПТ-5"	Уравнения до девятого порядка с постоянными и переменными коэффициентами (по 18 каждого типа). 18 операционных усилителей. Каждый может быть интегрирующим. Остальные характеристики соответствуют «ИПТ-4»	Блочная, разборная; легко транспортируется. Набор задачи шнуровыми соединениями между блоками	НИИ МПСС
5	Электронная модель "МПТ-9"	Уравнения до шестнадцатого порядка с постоянными и переменными коэффициентами (по 48 каждого типа). Блок переменного коэффициента — на шаговом переключателе с неравномерной разверткой по времени. 48 операционных усилителей с индивидуальной автоматической стабилизацией нуля, с суммированием до 12 величин на каждом. Имеет электронно-лучевой индикатор и может сопрягаться с комплектом электронных нелинейных блоков «КНБ». Структурный тип	Секционная. Набор задачи на центральном коммутационном поле. Имеет два пульта управления и может делиться на две и четыре части	НИИ МПСС
6	Электронная модель "Оператор"	Уравнения до десятого порядка с постоянными (110 блоков с трехзначной цифрой) и переменными коэффициентами (12 блоков ввода с перфоленты на 3000 шагов и 10 блоков фотоследящих систем). 36 операционных усилителей с индивидуальной автоматической, стабилизацией нуля. Имеет блок типичных нелинейностей (люфт и момент сухого трения). 18 регистрирующих приборов (электроискровых).	Стендовая из четырех частей. Набор задачи на отдельных коммутационных полях	КБ ММиП
7	Электронная модель "МЛ-2"	Уравнения до двенадцатого порядка с постоянными коэффициентами (144 блока с двухзначной цифрой). 26 операционных усилителей с ручной установкой нуля. Специализирована для решения линейных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами.	Стендовая, малогабаритная. Набор задачи установкой переключателей на поворотном барабане	КБ МПиСА

№№ по порядку	Наименование машины и ее тип	Основные технические данные	Конструктивные особенности	Разработчик
---------------	------------------------------	-----------------------------	----------------------------	-------------

II. НЕЛИНЕЙНЫЕ ОБЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

А. Малогабаритные нелинейные широкого применения

1	Электронная моделирующая установка "ЭМУ-5"	Уравнения до шестого порядка. Линейная часть содержит 12 операционных усилителей с автоматической стабилизацией нуля. В линейной части имеется восемь диодных ячеек для набора схем типичных нелинейностей люфта, ограничения или зоны нечувствительности. Нелинейная часть (приставка) содержит шесть фиксированных нелинейностей ($\sin x$, $\cos x$, x^2 , x^3) и два блока перемножения (диодные схемы). В нелинейной части имеется 12 усилителей с автоматической стабилизацией нуля и 12 усилителей с ручной установкой нуля. Вместо нелинейной приставки к линейной части может подключаться блок перемножения и генератор нелинейной функции от одной переменной	Настольная в виде двух основных блоков. Габариты линейной части: 670X600x500 мм (с закрытой крышкой). Габариты нелинейной приставки: 670X500X330мм. Коммутационное поле выполнено на откидной крышке линейной части. Набор задачи шнуровым соединением на коммутационном поле	ИАТ АН СССР
2	Электронная моделирующая установка "МН-7"	Уравнения до шестого порядка. Содержит 18 операционных усилителей с ручной установкой нуля (16 усилителей основных). Имеет восемь диодных ячеек для осуществления типичных нелинейностей вида люфта, момента сухого трения, зоны нечувствительности и ограничения. Содержит до четырех блоков перемножения и четырех универсальных блоков нелинейной функции одного переменного (диодная схема). В комплект входит электронно-лучевой индикатор на две кривых	Настольная. Габариты: 700 X 440 X 380 мм. Набор задачи шнуровыми соединениями на коммутационном поле, расположенном сверху под открывающейся защитной крышкой. занимаемая площадь на столе 0,5 м ²	КБ МПиСА

Б. Нелинейные средней мощности

1	Электро-модель "МПТ-11"	Уравнения до двенадцатого порядка. 12 блоков основных операционных усилителей. 12 блоков нелинейных зависимостей с реверсивным шаговым переключателем. 12 электронных блоков перемножения (диодная схема). 12 электронных блоков нелинейной функции одной переменной (диодная схема). 48 блоков постоянных коэффициентов (три значащие цифры.) В полный комплект входит 108 усилителей постоянного тока с индивидуальной автоматической стабилизацией нуля. Имеет электронно-лучевой индикатор	Блочная, разборная. Набор задачи шнуровыми соединениями между блоками. Имеет 2 пульта управления для одновременного решения двух задач. Поставляется в виде двух полукомплектов типа МПТ-11М	БК ММиП
2	Электро-модель "МН-1".	Уравнения до двенадцатого порядка. 36 блоков постоянных коэффициентов и 6 блоков переменных коэффициентов (с шаговыми переключателями). 20 блоков перемножения или деления (время-импульсная схема). 11 блоков нелинейной функции одной переменной (диодно-триодная схема). 5 дополнительных блоков фиксированных нелинейностей (тригонометрических). 7 блоков типичных нелинейностей (люфт, момент сухого трения, ограничение, зона нечувствительности). 3 дифференцирующих блока. 3 мощных усилителя со схемой экономичного выхода. 3 выходных фильтра. Всего в машине 173- усилителя с индивидуальной автоматической стабилизацией нуля. Схема управления рассчитана на элементарные логические операции по времени или по значению переменных. Машина имеет электронно-лучевой индикатор	Состоит из шести секций: одной центральной (линейной части), двух питания и трех для нелинейных блоков. Набор задачи шнуровыми соединениями на центральном коммутационном поле	КБ МПиСА

№№ по порядку	Наименование машины и ее тип	Основные технические данные	Конструктивные особенности	Разработчик
3	Электронная моделирующая установка "МН-2"-	Уравнения до шестого порядка. 12 блоков суммирующих усилителей. 10 блоков перемножения (диодная схема). 10 блоков нелинейной функции одной переменной (диодная схема). 6 блоков постоянных коэффициентов (три значащие цифры). 2 блока переменных коэффициентов (с шаговым переключателем). Всего в машине 79 усилителей с централизованной автоматической установкой нуля. Имеет электронно-лучевой индикатор. Имеется автоматическая настройка напряжений стабилизированных выпрямителей	Стендовая. Набор задачи шнуровыми соединениями на центральном коммутационном поле	КБ ММиП
4	Электронная моделирующая установка "МН-3"	Уравнения до девятого порядка. 20 блоков суммирующих усилителей. 30 блоков перемножения. 16 блоков нелинейной функции одной переменной. 8 блоков постоянных коэффициентов. 20 блоков переменных коэффициентов. Всего в машине 145 усилителей. В остальном «МН-3» соответствует машине «МН-2»	Соответствует машине «МН-2»	КБ ММиП
5	Электронный дифференциальный анализатор "ЭДА"	Содержит 38 усилителей для выполнения операций интегрирования, суммирования, умножения на постоянный коэффициент, перемены знака и нелинейных зависимостей. Каждый усилитель может быть интегрирующим. 4 блока перемножения (временная импульсная схема). 4 блока нелинейной функции одной переменной (временная схема). 22 потенциометра. Централизованная установка нулей усилителей при помощи схемы с конденсаторами	Стендовая. Набор задачи шнуровой коммутацией	Энергетический институт АН СССР (лаборатория чл.-корр. АН СССР И. С. Брука)
В. Нелинейные большой мощности				
1	Электронная моделирующая установка "Полет"	Уравнения до двенадцатого порядка. 46 блоков суммирующих усилителей. 40 блоков перемножения (диодная схема). 26 блоков нелинейной функции одной переменной (диодная схема). 20 блоков переменных коэффициентов (ввод с перфоленты). Всего в машине 370 усилителей с централизованной автоматической установкой нуля. 18 регистрирующих приборов (электроискровые)	Стендовая из пяти частей. Набор задачи на отдельных коммутационных полях	КБ ММиП
2	Электромоделирующая установка «МН-8»	Уравнения шестнадцатого и более высокого порядка (имеет 32 интегрирующих блока). При шестнадцатом порядке используется половина линейной части. Осуществляет до 48 операций суммирования 264 слагаемых, 48 умножений на постоянный коэффициент (с тремя десятичными разрядами), 36 умножений на переменный коэффициент (шаговый переключатель и кусочно-линейная аппроксимация), 12 точных перемножений искомым величин, 10 нелинейных зависимостей функции от одной переменной, 40 нелинейных зависимостей типа сигнатуры, 9 нелинейных зависимостей типичных характеристик: люфта, ограничения, зоны нечувствительности. Имеется возможность выполнения четырех функций с запаздывающим аргументом и четырех операций дифференцирования. Всего в машине имеется 400 операционных усилителей с индивидуальной автоматической стабилизацией нуля и усовершенствованной схемой их контроля. Для сопряжения с реальной аппаратурой имеются мощные усилители с экономичным выходом. Схема управления рассчитана на элементарные логические операции и имеет дополнительный контроль.	Состоит из 13 секций. Набор задачи — шнуровыми соединениями на коммутационных полях линейной части. Имеет 2 пульта управления, позволяющие одновременно решать на машине две различные задачи	КБ МПиСА

№№ по порядку	Наименование машины и ее тип	Основные технические данные	Конструктивные особенности	Разработчик
---------------	------------------------------	-----------------------------	----------------------------	-------------

III. Специализированные нелинейные установки

1	Электронная моделирующая установка "МН-9" для исследования динамики основных частей часового механизма	Уравнения второго порядка, описывающие движение системы «баланс-спираль» часовых механизмов. Имеет пять блоков суммирующего усилителя, 40 блоков постоянных коэффициентов (две значащие цифры) и девять блоков нелинейной функции от одной переменной. Имеет всего 28 усилителей с централизованной автоматической установкой нулей по схеме с конденсаторами. Отличается наличием электронной схемы для автоматической коммутации блоков машины в функции искомой переменной	Стендовая. Установка режимов работы осуществляется переключателями и рукоятками на лицевых панелях машины	КБ МПиСА
2	Электрическая моделирующая установка—автомат тяговых расчетов "АТР-1"	Уравнение второго порядка вида $\frac{d^2 s}{dt^2} = \zeta F(v)$. В это уравнение в качестве исходных данных задаются нелинейные зависимости тяговых и тормозных сил от скорости $F(v)$ и профиля пути. В результате решения получают величины $v = f_1(s)$ и $t = f_2(s)$. Точность решения тяговых задач около 1%, что обеспечивает расчет времени движения для грузовых поездов с точностью ± 1 мин., а для пассажирских поездов $\pm 0,25$ мин.	Настольная, малогабаритная. Установка режимов работы осуществляется переключателями и рукоятками на лицевой панели	Фиалиал КБ МПиСА

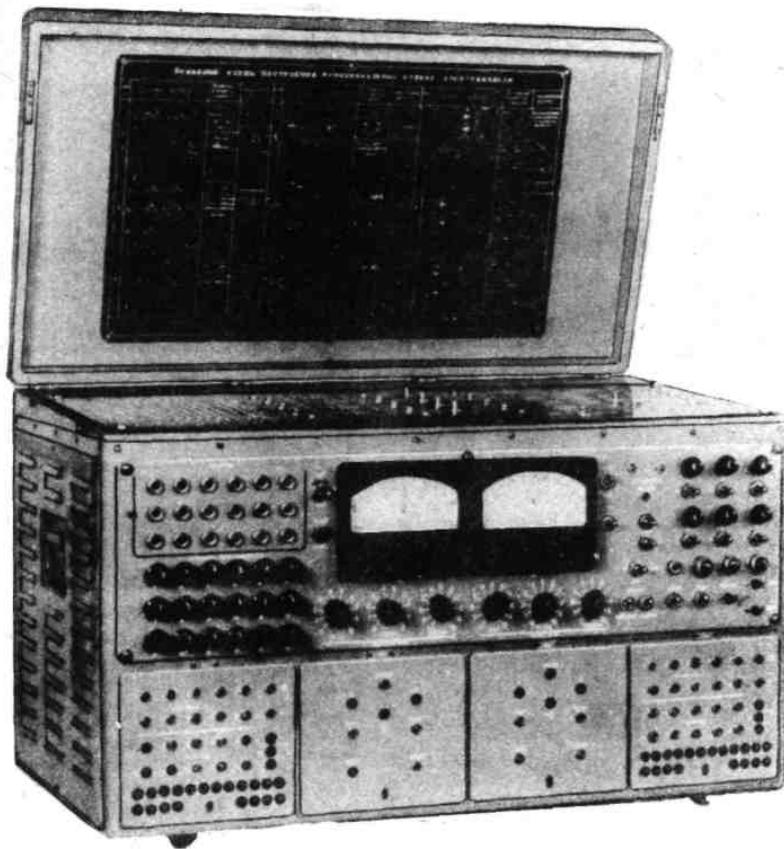


Рис. 3. Общий вид малогабаритной нелинейной установки МН-7

Помимо уменьшения габаритов аппаратуры, другой современной тенденцией, определяющей развитие электро моделирующих установок, предназначенных для исследования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, является постепенный переход в дальнейшем от схем, построенных на вакуумных радиолампах, к схемам, построенным на полупроводниковых элементах. Этим самым не только дополнительно сокращаются

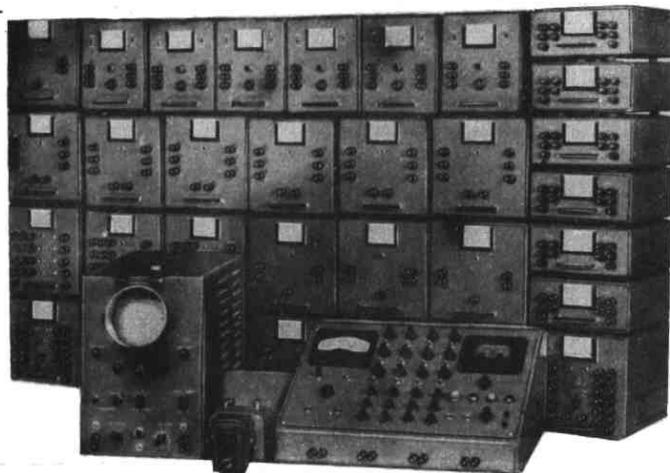


Рис. 4. Общий вид блочной нелинейной моделирующей установки МПТ-11

размеры аппаратуры, но, кроме того, значительно уменьшается мощность, потребляемая машиной от источников питания, а также значительно повышается надежность и долговечность работы ее схемы.

Впервые в наших разработках нелинейные функциональные блоки, построенные на схемах с германиевыми диодами, были созданы в КБ МПиСА в 1954—1955 гг. для варианта малогабаритной нелинейной установки «МН-7».

В 1955—1956 гг. была разработана еще более малогабаритная нелинейная электро моделирующая установка «МН-М», в схеме которой вакуумные радиолампы типа «Дробь» остались лишь в усилителях типа «УПТ-19» и в стабилизаторах ее источника питания. В остальной схеме этой установки вместо радиоламп применены слоистые кремниевые и германиевые диоды.

В качестве примера на рис. 14 приведены схемы для блока перемножения и блока нелинейной функции от одной переменной, построенные на слоистых полупроводниковых диодах.¹

Рассмотрение нелинейных машин средней мощности показывает на наличие у нас таких электро моделирующих установок, которые как по составу своих функциональных блоков, так и по выполнению

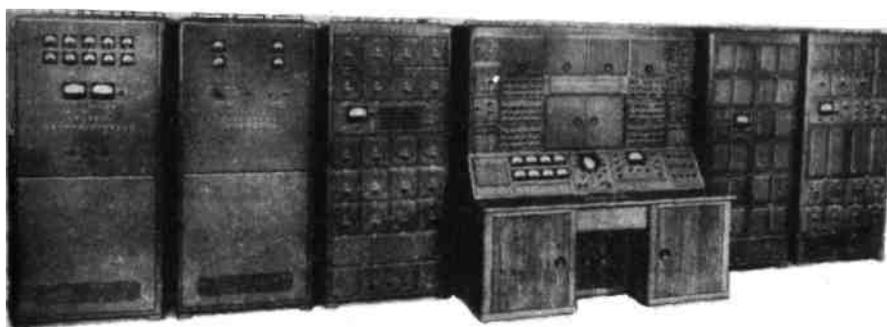


Рис. 5. Общий вид секционной нелинейной моделирующей установки МН-1

их схем и конструкций не уступают современным зарубежным образцам аналогичного типа. К этому выводу приводит, в частности, сравнение наших машин с теми, которые были экспонированы и о которых докладывалось на Первой международной конференции по математическим машинам непрерывного действия, состоявшейся в Брюсселе в период с 27 сентября по 2 октября 1955 г.²

Из сравнения данной группы нелинейных моделирующих установок с аналогичными современными зарубежными образцами следует, что линейная часть наших машин ничем практически им не уступает, а в части блоков переменных коэффициентов является даже более совершенной. Исключение составляют лишь электромеханические вибраторы, которые по надежности при длительной работе у нас хуже лучших зарубежных образцов (например, английской фирмы «Elliott»).

В части же схем нелинейных функциональных блоков имеется следующая картина: электронные схемы наших нелинейных блоков, таких, например, как блок перемножения и блок нелинейных функций от одной переменной, при примерно равных общих характеристиках являются более совершенными и построены на меньшем количестве радиоламп.

¹ О малогабаритных нелинейных моделирующих установках «МН-7» и «МН-М» изложено более подробно в докладе Г. М. Петрова, а об установках «ЭМУ-5» и «ЭМУ-6» — в докладе Б. Я. Когана.

² На конференции в Брюсселе были экспонированы одна машина от США, две машины от Англии и пять машин от Франции.

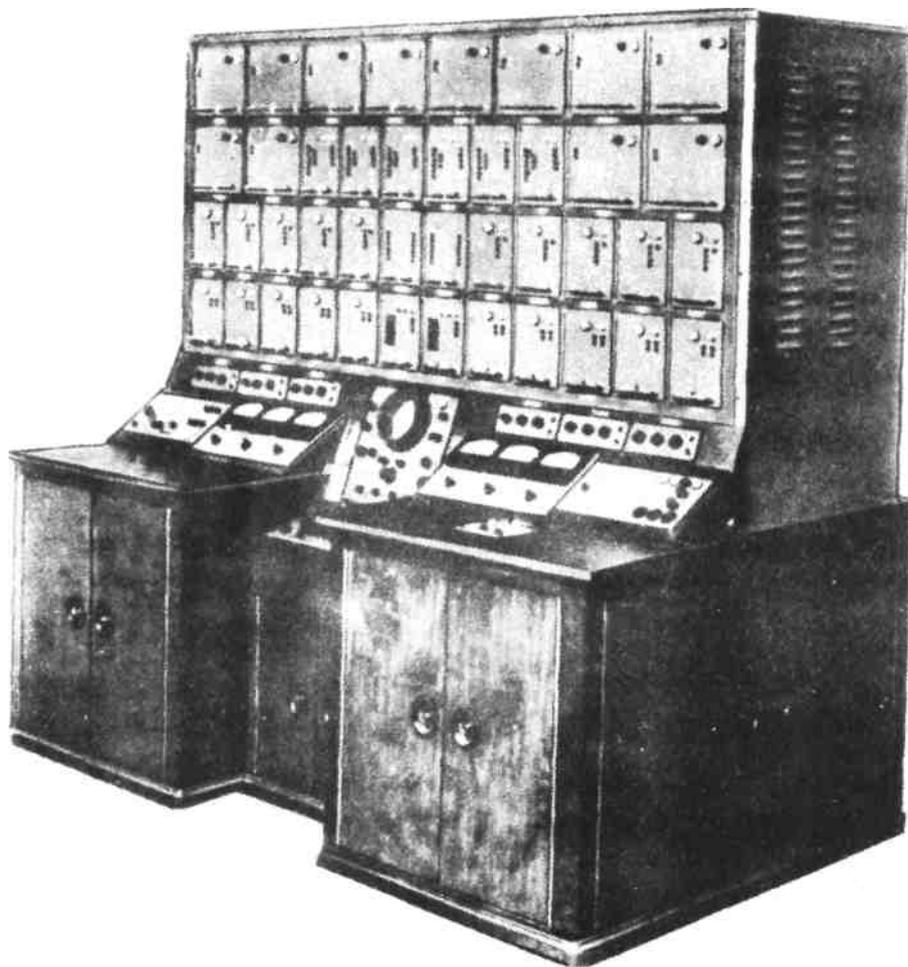


Рис. 6. Общий вид стендовой нелинейной моделирующей установки МН-2

Изложенное подтверждается рассмотрением сравнительных принципиальных схем блоков, приведенных на рис. 15 и 16.

Однако в случае построения для серийных машин таких же нелинейных блоков, но на электромеханических следящих системах (для математических машин с малыми частотными составляющими в результатах решения задачи) у нас имеется явное отставание от зарубежных образцов и в особенности от американских. Практически у нас для этих целей быстродействующие электромеханические следящие системы с электродвигателем почти не применяются и имеется лишь схема со следящей системой на реверсивном шаговом переключателе (в «МПТ-11»).

Более подробно следует остановиться на вопросе о нелинейных электромоделирующих установках большой мощности.

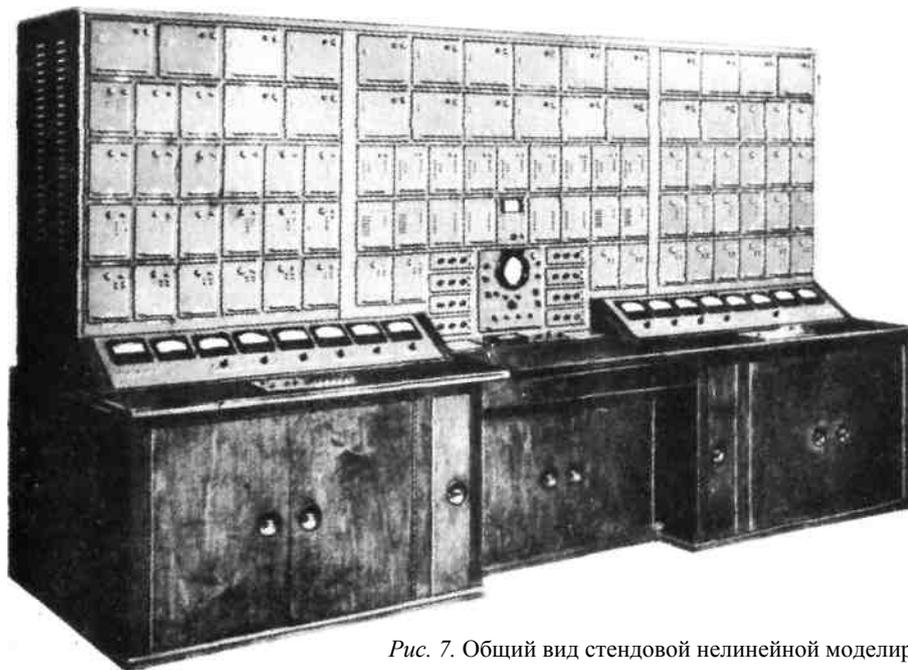


Рис. 7. Общий вид стендовой нелинейной моделирующей установки МН-3

Иногда высказывается мнение, что для решения больших и сложных задач достаточно будет включить на параллельную работу несколько малых моделирующих установок.

Однако практика эксплуатации этих машин показывает, что такое включение связано с большими неудобствами, в частности, ввиду значительных внешних кабельных соединений. Кроме того, оно весьма нежелательно с точки зрения наводок на схему различных помех и увеличения в ней числа контактных соединений, снижающих надежность ее работы.

Поэтому в соответствии с требованиями практики как за рубежом, так и в СССР, в последние годы было создано несколько образцов крупных нелинейных электро моделирующих установок. Интересно произвести их сравнительную оценку по имеющимся в технической литературе данным.

Электро моделирующая установка «МН-8» является самой крупной нелинейной электронной математической машиной непрерывного действия, разработанной и построенной в СССР (в КБ МПиСА) в течение 1954—1955 гг.

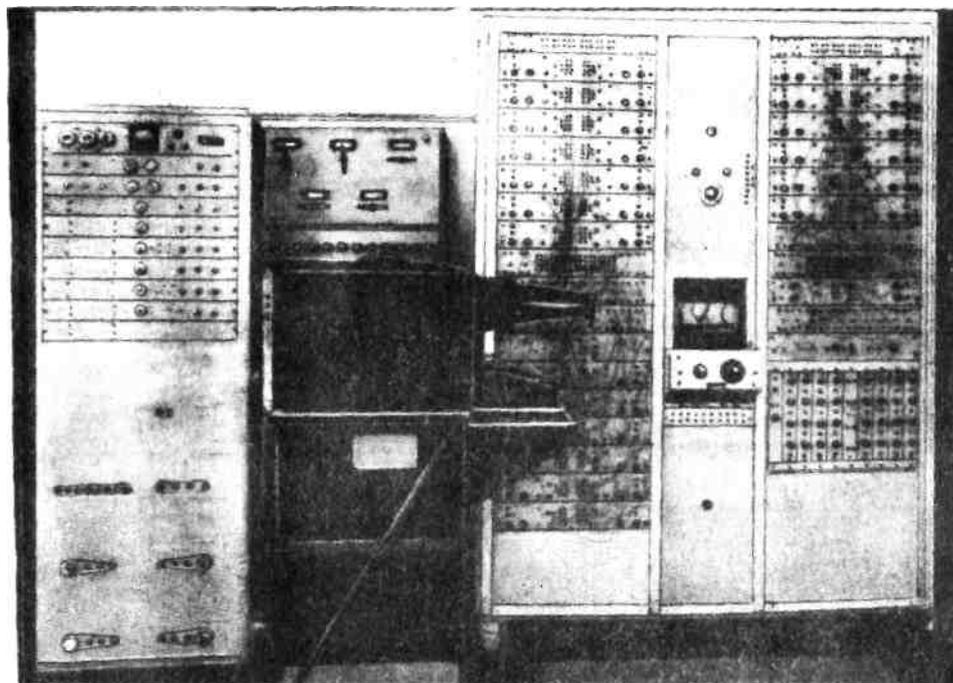


Рис. 8. Общий вид нелинейной моделирующей установки ЭДА

Среди известных зарубежных образцов электро моделирующих установок подобного типа, сравнимых с установкой «МН-8», можно назвать только три:

1) в 1951 г. была сдана в эксплуатацию электро моделирующая установка «Тайфун» (Typhoon) которая была разработана американской фирмой «Radio Corporation of America» для Военно-морских сил США. Эта машина строилась в течение трех лет;

2) в Англии фирмой «Elliott Brothers» совместно с «Royal Aircraft Establishment» была разработана электро моделирующая установка «Тридак» («Trydac» — Three Dimensional Analogue Computer), являющаяся электронно-гидравлическим имитатором для исследований по управляемым снарядам.

Изготовление этой машины было выполнено фирмой «Elliott Brothers». Этой же фирмой была построена аналогичная, но меньшая по своему составу установка «Адвак» (Adwac) для Австралии. Разработка и изготовление машины «Тридак» были выполнены в период 1950—1954 гг.;

3) установка «Конвайр» («Convaig»), разработанная в США. Некоторые данные о проекте этой установки были опубликованы в 1954 г

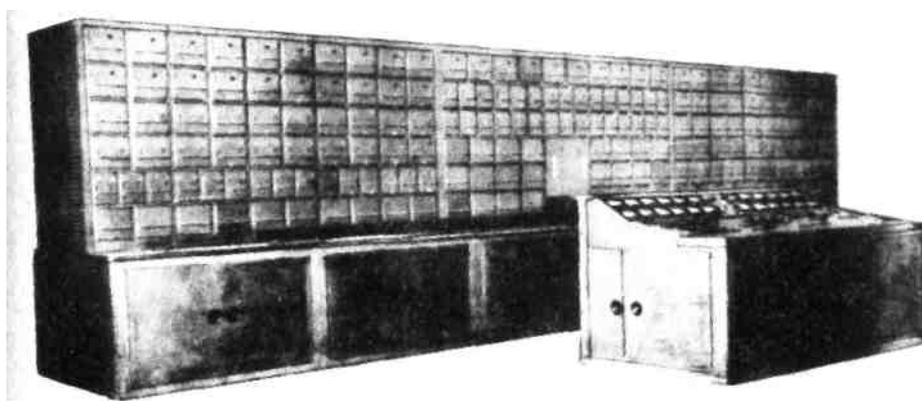


Рис. 9. Общий вид стендовой нелинейной моделирующей установки «Полет»

Все четыре вышеуказанные машины предназначены для исследования сложных динамических систем, процессы в которых описываются нелинейными дифференциальными уравнениями вида:

$$\frac{dx_i}{dt} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t),$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

В машине «МН-8» 32 прецизионных интегрирующих блока, а в машине «Тайфун» — 30. Данных о количестве интегрирующих блоков в машине «Тридак» и «Конвайр» не имеется.

Характерной особенностью электро моделирующей установки «МН-8» является то, что длительность исследуемых с ее помощью процессов в натуральном масштабе времени может быть как малой величиной, равной нескольким секундам, так и очень значительной — до 10 000 сек.

Это достигнуто соответствующим построением схемы интегрирующего блока (рис. 17).

В этом блоке дрейф выходного напряжения в режиме интегрирования создает погрешность, не превышающую $\pm 0,15\%$ за 2000сек. Кроме того, схема интегрирующего блока позволяет автоматически изменять масштаб времени одновременно для всех таких блоков установки в 10 раз (убыстрять процесс решения).

В машине же «Тайфун» максимальная длительность решения задачи 60 сек, а в проекте машины «Конвайр» есть ссылка только на то, что при ее создании было поставлено требование получения высокой стабильности схемы при длительной работе.

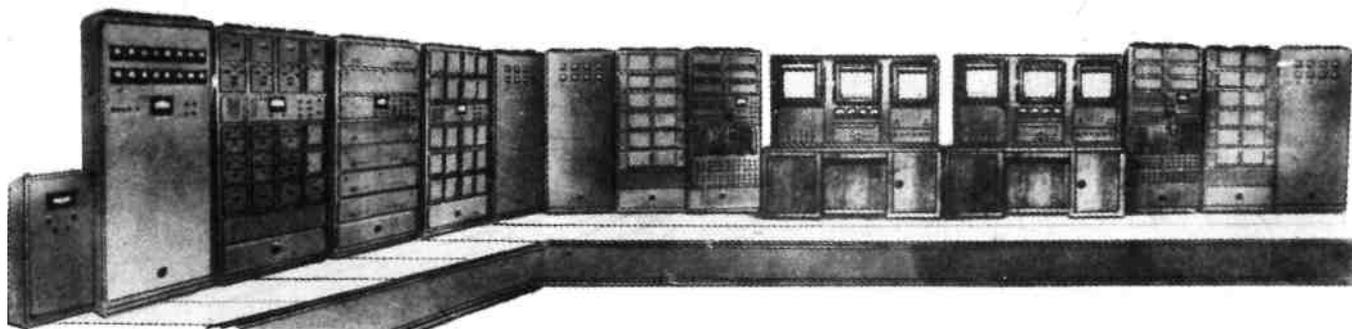


Рис. 10. Общий вид секционной нелинейной моделирующей установки МН 8

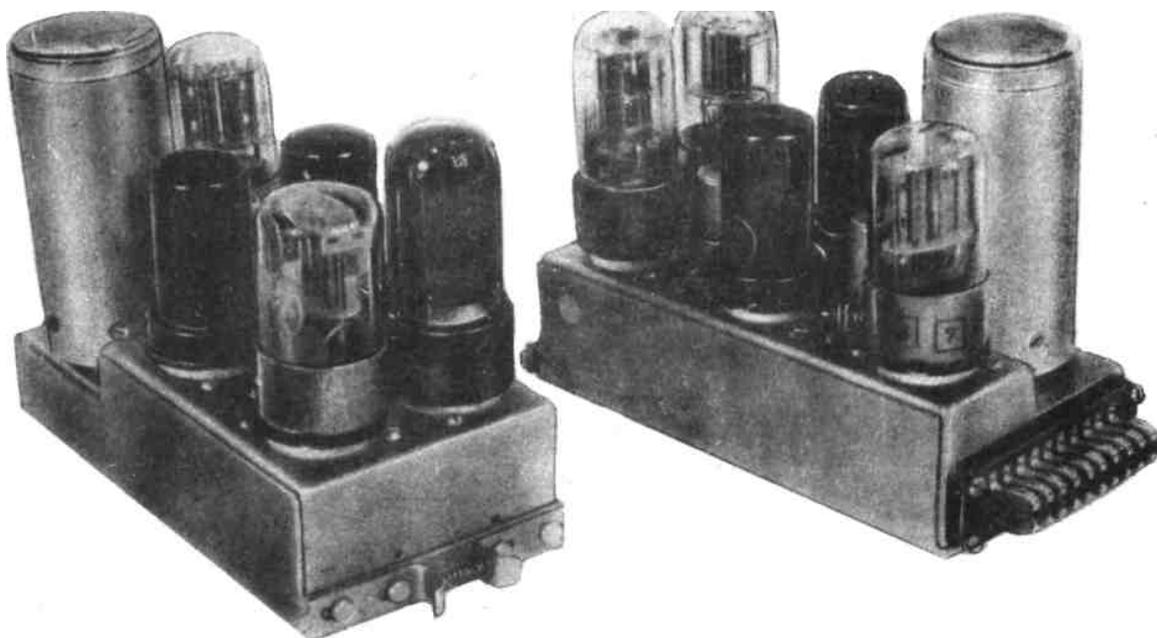


Рис. 11. Общий вид усилителя постоянного тока УПТ-15 с индивидуальной автоматической стабилизацией нуля

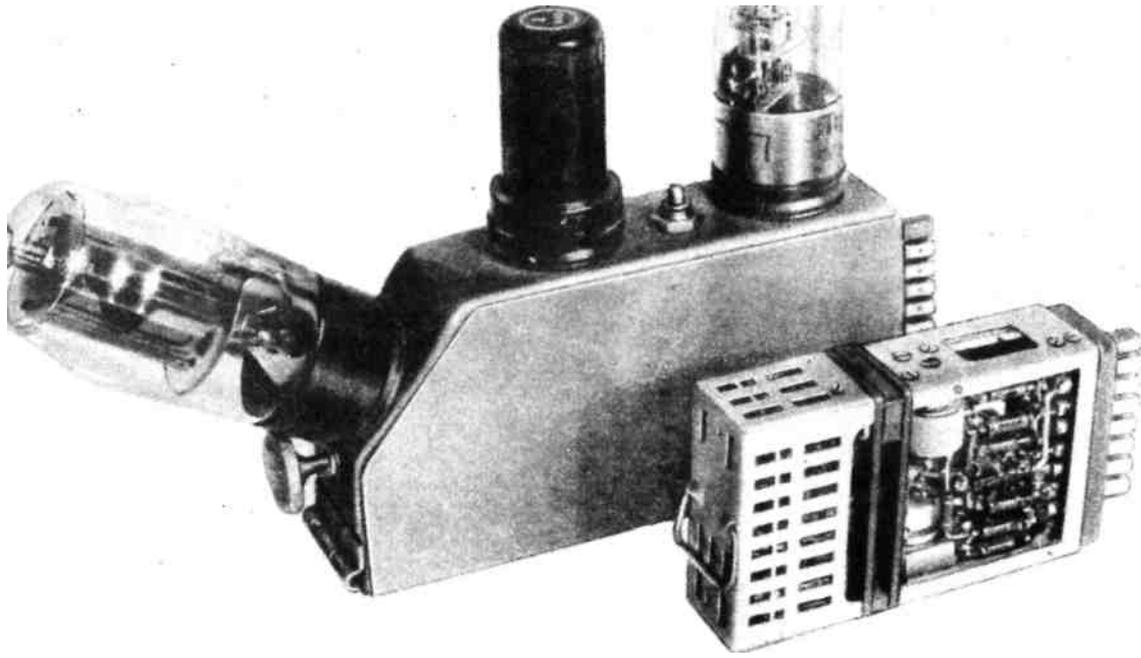


Рис. 12. Сравнение размеров нового малогабаритного усилителя УПТ-19 с типовым усилителем УПТ-4

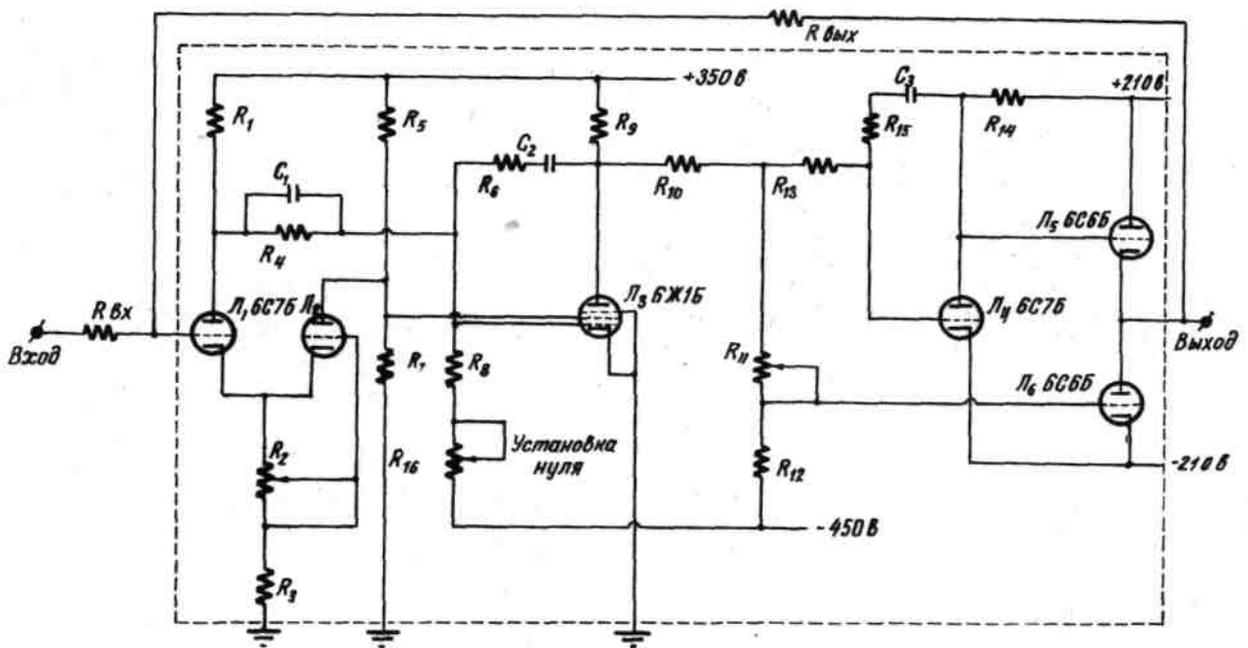


Рис. 13. Электрическая схема усилителя постоянного тока УПТ-19

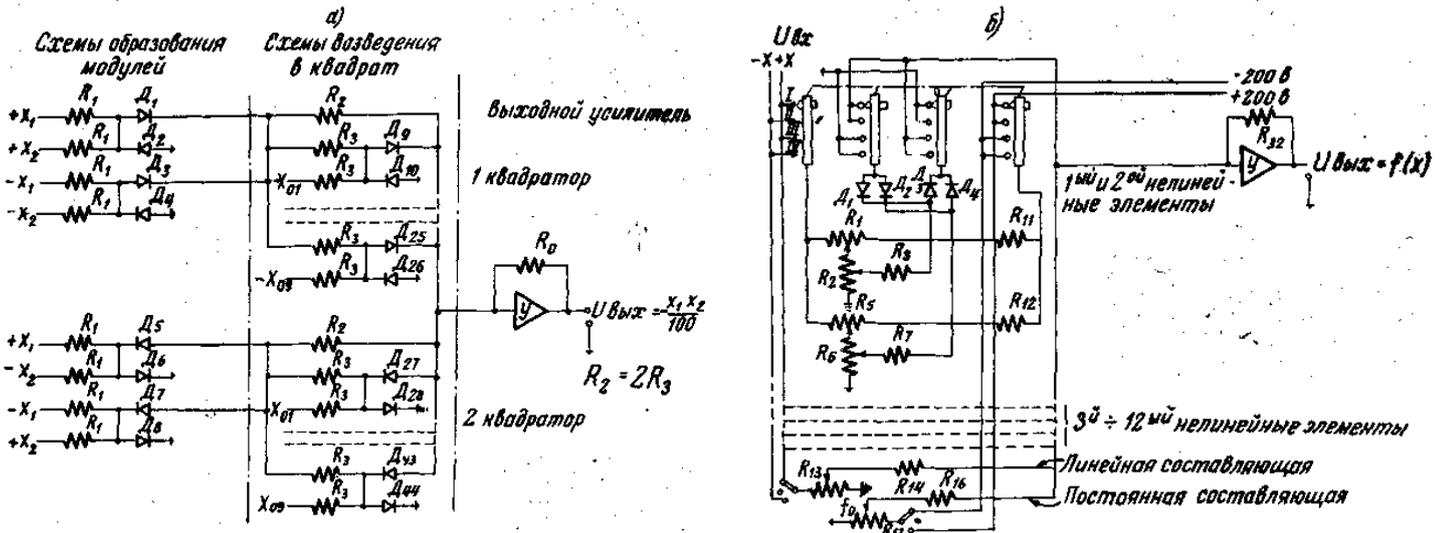


Рис. 14. Принципиальные электрические схемы блока перемножения (а) и блока нелинейной функции одной переменной(б), построенные с использованием полупроводниковых диодов

Формула, реализуемая схемой

$$x_1 x_2 = \frac{(x_1 + x_2)^2 - (x_1 - x_2)^2}{4}$$

I Фирма Reeves — США
(март 1954 г.)

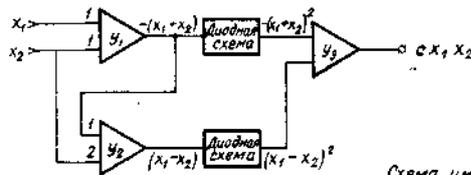


Схема имеет около 29 радиоламп
Шкала = 100 в

II Фирма Short Brothers & Harland Ltd — Англия
(1955 г.)

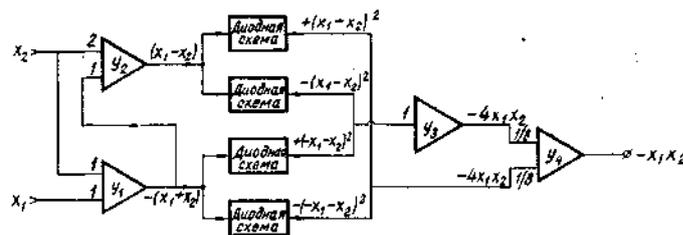


Схема имеет около 50 радиоламп
Шкала = 50 в

III КБ МПСА — СССР
(декабрь 1952 г.)

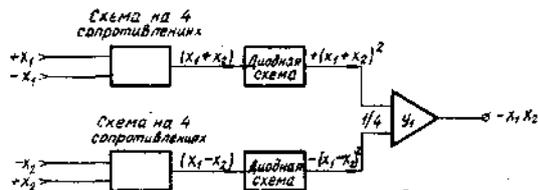


Схема имеет 14 радиоламп
Шкала = 100 в

Рис. 15. Варианты принципиальных схем блока перемножения, построенных на вакуумных диодах

Длительность работы машины «Тридак» в натуральном масштабе времени достигала в решаемых на ней задачах до 600 сек.

Все функциональные блоки четырех вышеуказанных электро моделирующих установок построены на усилителях постоянного тока с индивидуальной автоматической стабилизацией нуля.

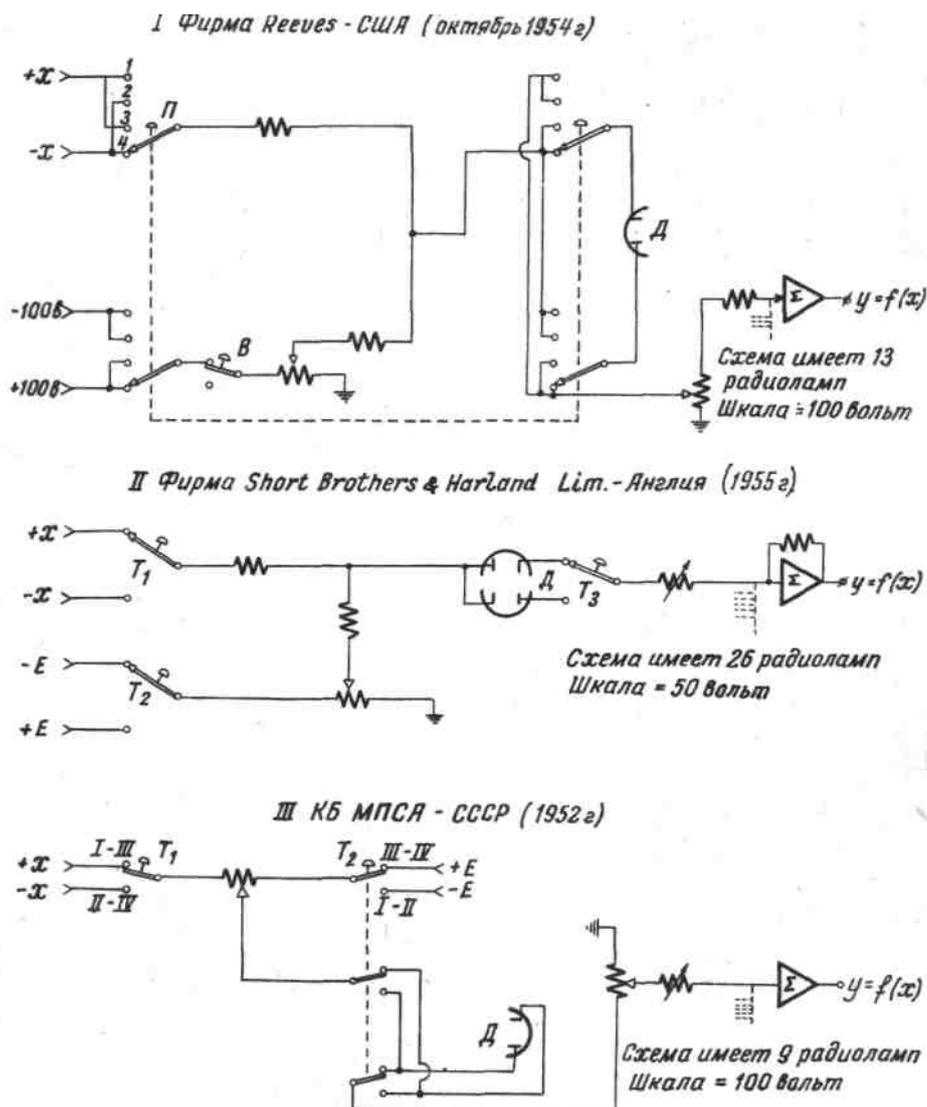


Рис. 16. Варианты принципиальных схем блока нелинейной функции одной переменной, построенных на вакуумных диодах

Количество таких усилителей в этих электро моделирующих установках соответствует данным, приведенным в табл. 2.

В машине «Тридак» имеются усилители с двумя типами преобразователей: с механическим вибропреобразователем (основной тип) и магнитным модулятором.

Во всех остальных установках применяются только механические вибропреобразователи.

Таблица 2

Наименование электро моделирующей установки	Количество усилителей
„МН-8“	400
„Тайфун“	445
„Тридак“	600
„Конвайр“	400 (предположительно)

Примечание. По своим основным данным, установка «Конвайр» близко стоит к новой машине фирмы «РИВС», устанавливаемой в 1956 г. в авиационном исследовательском центре американской фирмы «Райт» («Wright Air Development Center»).

Основные характеристики применяемых усилителей постоянного тока примерно одинаковы для всех четырех машин.

Однако для усилителя «УПТ-15», применяемого в машине «МН-8», имеются значительно лучшие данные по фоновой составляющей, которая равна 1 мв вместо 10 мв для усилителей других указанных машин.

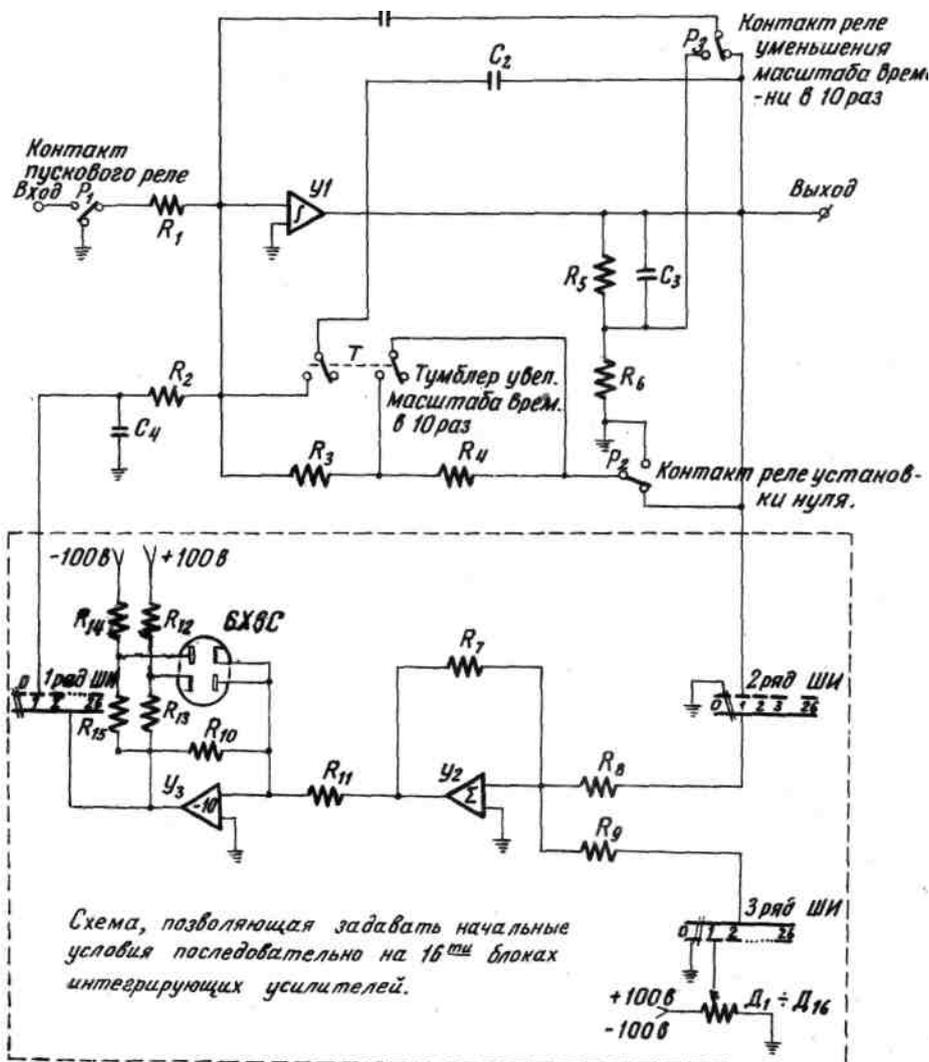


Рис. 17 Принципиальная схема блока интегрирования электро моделирующей установки МН-8

В машинах «Тридак» и «Конвайр» операция перемножения осуществляется в основном блоками с электро механической следящей системой. Точность выполнения операции перемножения на этих блоках $\pm 0,5$ — 1% . Полоса пропускания следящих систем около 5 гц. Таким образом, в этих машинах применяются блоки перемножения средней точности и с относительно плохой частотной характеристикой.

В электро моделирующей установке «Тайфун» имеются два типа блоков перемножения: блоки средней точности, выполненные на электро механической следящей системе, и электронные прецизионные блоки, позволяющие получить статическую точность для операции перемножения порядка $0,01\%$ (теоретически до $\pm 0,001\%$).

В электро моделирующей установке «МН-8» применены только прецизионные блоки перемножения, построенные по схеме двойного действия (рис. 18).

Эти блоки позволяют получать статическую точность операции перемножения около $\pm 0,01\%$.

О количестве блоков перемножения в рассматриваемых зарубежных машинах имеются данные только для машины «Тайфун», где их число составляет 67 для блоков обоих типов.

Блоков перемножения в «МН-8» меньше—здесь имеется возможность получать 12 операций точного перемножения переменных, однако при необходимости количество этих блоков в машине может быть увеличено.

Большое количество блоков перемножения в машине «Тайфун» объясняется, по видимому, спецификой некоторых из решаемых на ней задач.

Нелинейные преобразователи для тригонометрических функций в машинах «Конвайр» и «Тайфун» выполнены на базе синусно-косинусных потенциометров с сервоприводом.

В машине «Тридак» для управления положением движков некоторых нелинейных потенциометров служат девять мощных гидравлических приводов, что весьма громоздко. Кроме того, всем блокам с подобными следящими системами свойственна значительная инерционность. Имеется также указание на то, что в установке «Тридак» образование нелинейной функции от одной переменной осуществляется в некоторых блоках путем применения электронных диодных схем.

В электро моделирующей установке «МН-8» применены диодно-триодные электронные схемы для универсальных блоков, предназначенные для воспроизведения путем кусочно-линейной аппроксимации 24 отрезками нелинейных функций от одной переменной при точности набора функций $\pm 0,2\%$. Характерной особенностью этого блока (рис. 19) является то, что он позволяет набирать очень крутые фронты функции, а также набирать функции с резкими изломами, чего блоки зарубежных машин, построенные на диодных схемах, не обеспечивают.

В отличие от рассматриваемых зарубежных машин в составе «МН-8» имеется 48 точных блоков для ввода переменных коэффициентов (рис. 20), которые практически воспроизводят график переменного коэффициента методом кусочно-линейной аппроксимации.

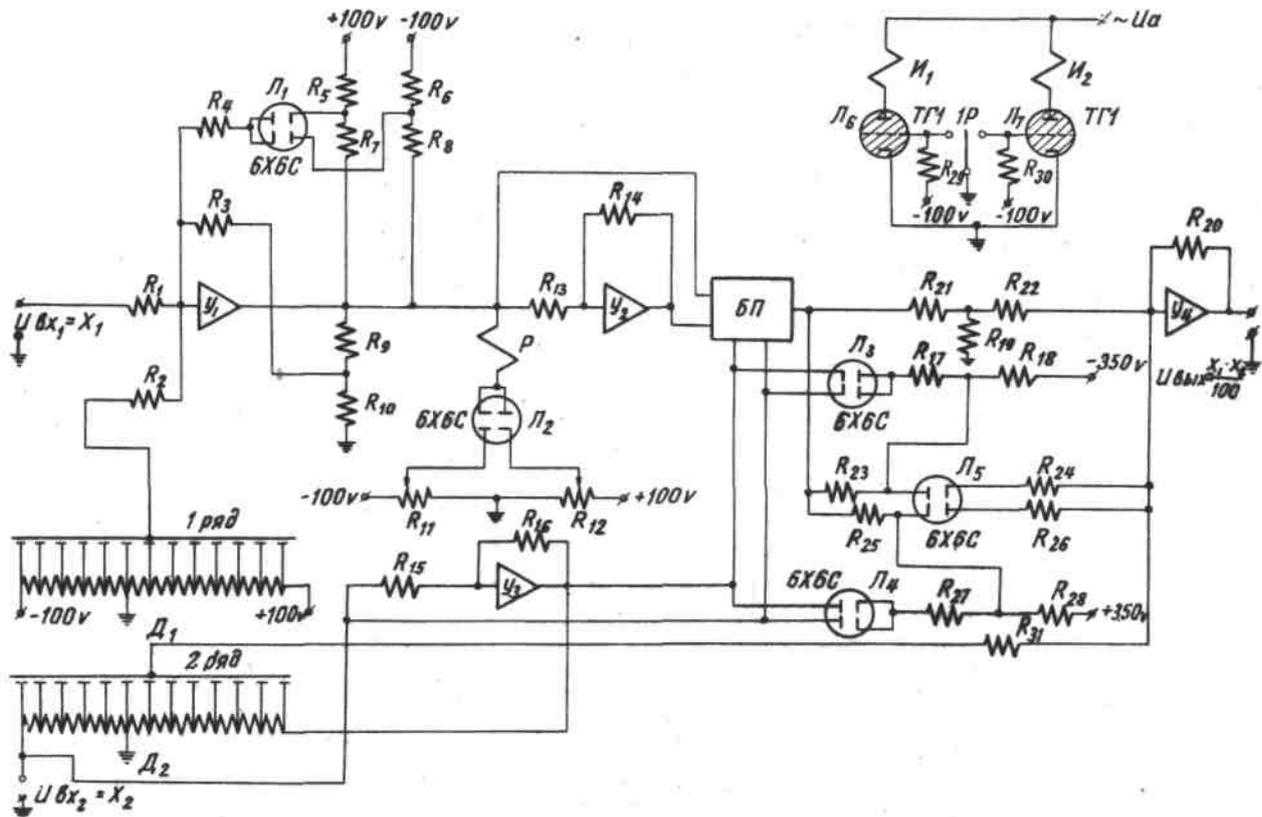


Рис. 18. Принципиальная схема блока перемножения повышенной точности

Кроме того, в зарубежных машинах не применяются специальные нелинейные блоки для выполнения нелинейных зависимостей типа сигнатуры.

В составе же «МН-8» имеются 40 таких блоков, которые существенно расширяют возможности этой машины в отношении воспроизведения широкого класса неоднозначных и разрывных нелинейных зависимостей, свойственных различным механическим и электромеханическим звеньям систем автоматического регулирования.

Электромоделирующая установка «МН-8» отличается также усовершенствованной схемой управления. Синхронизация работы всех ее функциональных блоков осуществляется с помощью электронного блока измерителя времени, построенного на базе десятичного цифрового счетчика. Процесс решения на электромодели может периодически повторяться или останавливаться в заранее заданные моменты времени (с точностью 0,1 сек), а также при достижении одной из искомых величин заданного значения или при ненормальной работе решающих блоков. В процессе решения задачи могут автоматически выполняться изменения в структуре моделируемой схемы, а также в значениях масштабных коэффициентов (в заранее установленные моменты времени).

Легко изменяется в 10 раз также масштаб времени, в котором воспроизводятся исследуемые процессы.

Управление работой машины «МН-8» осуществляется с пульта управления. В комплект установки входят два пульта управления, что позволяет одновременно исследовать на ней две независимые задачи (в пределах общего количества имеющихся в ее комплекте функциональных блоков).

Два пульта управления предусмотрены также и в машине «Конвайр».

Машина «МН-8», равно как и три другие установки, предназначена для совместной работы с реальной аппаратурой управления или регулирования. Для сопряжения с этой аппаратурой в ее состав входят мощные выходные усилители, имеющие экономичный выход. К установке легко можно подключить дополнительную аппаратуру, такую как электродинамические блоки, нагрузочные секции, внешние измерительные приборы и т. п.

Набор моделируемой системы уравнений в «МН-8» производится в соответствии с блок-схемой решения задачи на коммутационных полях, расположенных на секциях ее линейных блоков. Магистральные линии между секциями линейных блоков позволяют использовать в одной задаче блоки соседних секций. Такие же магистральные линии предусмотрены и в машине «Конвайр», к эксплуатационным удобствам которой следует отнести также съемные коммутационные поля. В «МН-8» съемные коммутационные поля не предусмотрены.

В крупных электромоделирующих установках при разработке необходимо учитывать удобства эксплуатации и стремиться к сокращению возможных ошибок операторов¹. Это требование в установке «МН-8» выполняется возможностью контроля правильности набора исходных данных и решения задачи по 40 контрольным точкам.

Для регистрации и контроля выходных величин в установке «МН-8» предусмотрены шесть быстродействующих электронных потенциометров, электронно-цифровой вольтметр, электронно-лучевой индикатор и другие измерительные приборы. В машине «Конвайр» результаты решения записываются на восьмиканальных самописцах. В машине «Тайфун» регистрирующие устройства включают в свой состав также два планшетных прибора.

Конструктивно «МН-8», так же и рассматриваемые современные зарубежные машины большой мощности, представляет собой установку структурно-секционного типа. В машине «Тайфун» все блоки размещены на 43 специальных стойках, имеющих одинаковую высоту.

¹ О методике проверки набора задач на электромоделирующих установках подробнее см. в докладе Э. А. Глузбергера

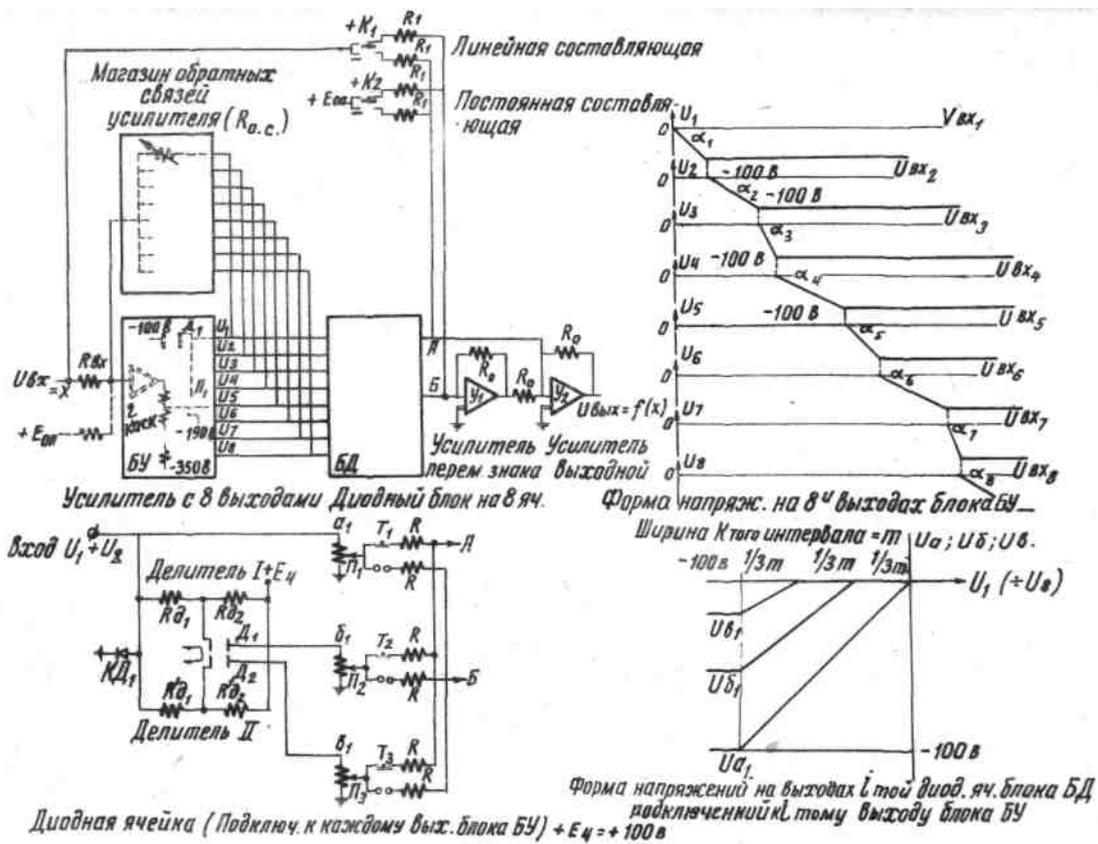


Рис. 19. Принципиальная схема диодно-триодного блока нелинейной функции одной переменной

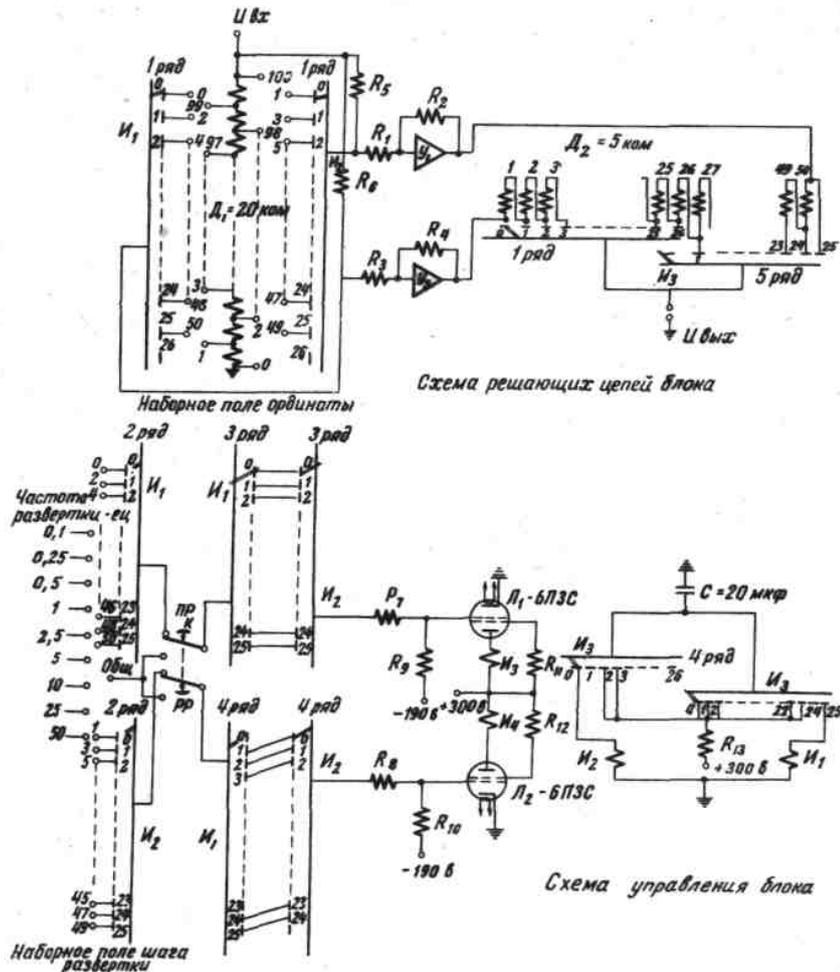


Рис. 20. Принципиальная схема блока переменного коэффициента

В машине «Тридак» имеются 44 стойки. Установка «МН-8» имеет всего 14 стоек (рис. 21). Ее конструкция позволила применить малогабаритные блоки, и в целом машина, несмотря на достаточно большой состав ее блоков, имеет незначительные габаритные размеры.

Дополнительно по рассматриваемым машинам можно привести также некоторые данные по числу применяемых радиоламп, потребляемой от источников питания мощности и занимаемой ими площади (см. таблицу 3).

Схема электро моделирующей установки «МН-8» содержит много высококачественных электрических деталей, существенно повышающих точность ее работы, уменьшающих габариты отдельных блоков и снижающих потребление от сети. К таким деталям прежде всего относятся германиевые плоскостные диоды, примененные в схеме секций питания в количестве около 8000 шт.

В машинах «Тайфун» и «Тридак» такие детали не применяются.

Таблица 3

Наименование установки	Число применяемых радиоламп	Потребляемая мощность в <i>кет</i>	Занимаемая площадь в м ²
МН-8	2750	35	50
Тайфун	4000	46	—
Тридак	8000	650	600
Конвайр	—	—	—

Примечание: Большая площадь, занимаемая машиной «Тридак», зависит от большого количества применяемых в ней функциональных потенциометров, специфики их следящих систем (гидравлический привод) и других факторов.

О применении же их в машине «Конвайр» неизвестно. Электро моделирующая установка «МН-8» предназначена для работы в нормальных лабораторных условиях при внутреннем охлаждении ее основных секций небольшими вентиляторами при температуре окружающего воздуха до +35° С и относительной влажности до 80%.

Зарубежные же машины «Тайфун», «Тридак» и «Конвайр» для их нормальной эксплуатации требуют помещения с кондиционированием воздуха.

Из приведенного сравнения можно сделать вывод, что разработанная в СССР нелинейная моделирующая установка большой мощности типа «МН-8» является вполне современной и по своим характеристикам в целом не уступает лучшим зарубежным образцам.

Рассмотрение некоторых наших работ по созданию специализированных моделирующих установок, которые в ряде случаев могут иметь большое практическое значение (табл. 1), приводит к мысли о недостаточности развития у нас данного типа машин. Среди этих машин можно отметить, например, автомат тяговых расчетов «АТР-1» (рис. 22), предназначенный для решения уравнения движения поезда¹, а также электро модель «МН-9», служащую для исследования динамики системы «баланс-спираль» часовых механизмов.

Однако знакомство с зарубежными работами в этой области показывает, что там специализированные электро модели применяются более широко и уже находят практическое применение, например, для исследования атомных энергетических установок (Англия, Франция), отработки различных двигательных агрегатов (США), проектирования амортизационной системы новых автомашин и расчетов их вибропрочности (Италия) и даже исследования некоторых биологических органов, таких как щитовидная железа и сердце (США), а также для других целей

Изложенное относится и к созданию специализированных машин для тренировки управляющего объектами персонала, к разработке коррелятивных анализаторов для выявления корреляционных связей в явлениях и процессах и т. п. При достаточном знании динамики исследуемого процесса создание таких машин вполне возможно и не представляет непреодолимых трудностей.

Весь вопрос заключается в достаточно широком распространении методов моделирования на ряд областей современной науки и техники и в привлечении к их материальному осуществлению большего числа организаций из различных промышленных министерств. Для пояснения сказанного в смысле возможностей техники математического моделирования для построения новых специализированных математических машин непрерывного действия в качестве примера приведем принципиальную схему коррелятивного анализатора (рис. 23).

Из этой схемы видно, что данная задача вполне разрешима и машина может быть построена на известных блоках универсальных электро моделирующих установок (в том числе и на усилителях постоянного тока). При этом такая схема может выявить как взаимную корреляцию, так и автокорреляцию для поступающих на ее вход сигналов, изменяющихся с низкой частотой, присущей электро моделирующим установкам.

В части создания у нас машин для исследования явлений и процессов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных, можно лишь отметить, что как разработка, так и выпуск таких машин осуществляются значительно более медленными темпами, чем других машин данного класса, хотя они имеют немаловажное значение для практического применения (табл. 4).

Особенно отстает в интеграторах-сетках (рис. 24) внедрение в их схемы достижений современной электронной техники для целей автоматизации задания и варьирования граничных условий, индикации, автоматического вывода результата решения и т. п.²

Гидроинтеграторы же (рис. 25) ввиду сложности своей конструкции могут иметь только небольшой производственный выпуск.

¹ Подробнее о машинах типа АТР-1 изложено в докладе Н.С. Николаева

² Подробнее о электроинтеграторах-сетках излагается в докладах Н. С. Николаева, Б. А. Волынского и Г. К. Кузминка

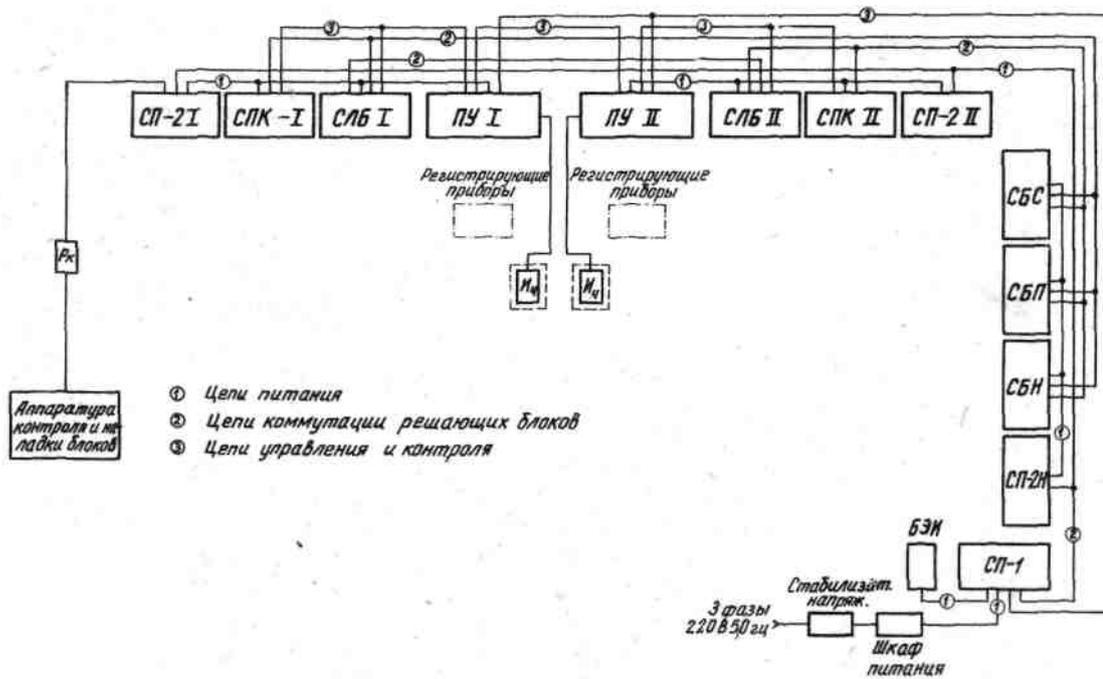


Рис. 21. Блок-схема электро моделирующей установки МН-

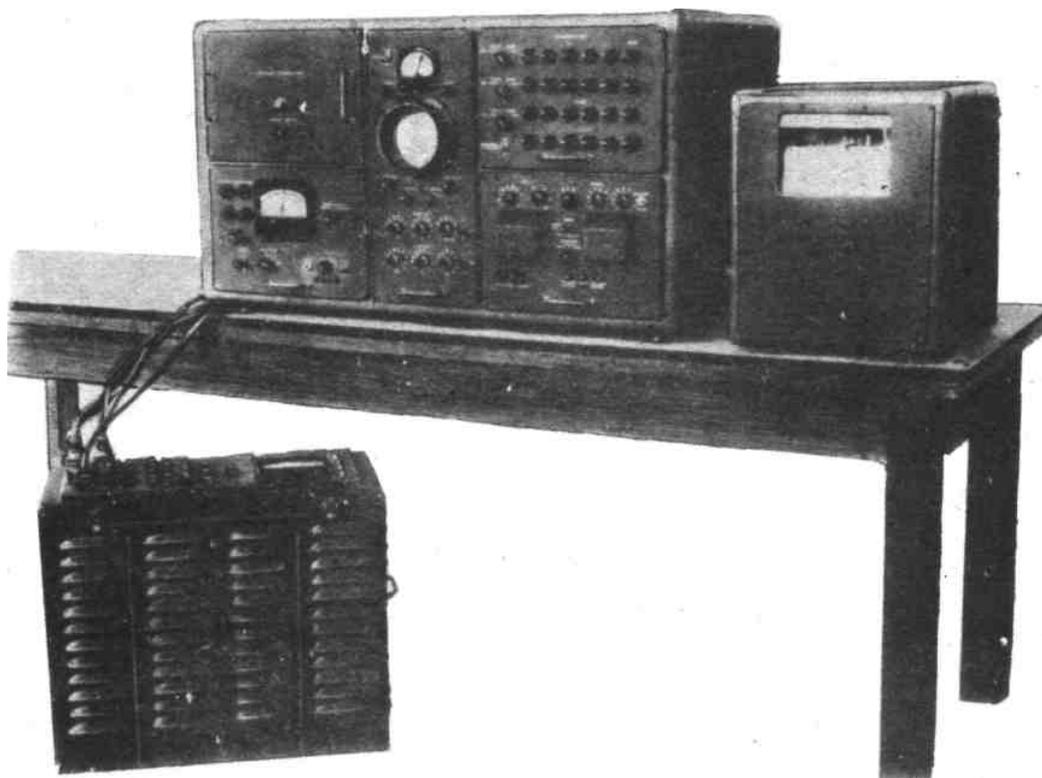


Рис. 22. Общий вид автомата тяговых расчетов АТР-1

При формулировке требований к современным электро моделирующим установкам общего применения было выдвинуто условие о том, чтобы эти машины допускали исследования на них возможно более широкого круга задач. В свете этого требования была высказана мысль о возможности использования машин, предназначенных для моделирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, также и для решения на них интегральных уравнений..

Актуальность такого применения машин диктовалась достаточно широким кругом задач, которые описываются интегральными уравнениями и могут быть решены на таких машинах.

**Основные образцы электро моделирующих установок,
разработанных в СССР для исследования систем, описываемых
дифференциальными уравнениями в частных производных**

Таблица 4

№ п/п	Наименование машины и ее тип	Основные технические данные	Конструктивные особенности	Разработчик
1	Гидравлические интеграторы «ИГ-1», «ИГ-3», «ИГ-4»	Интегратор «ИГ-4» является трехмерным интегратором для решения уравнений Фурье, Лапласа и Пуассона. Имеет 90 узловых точек. Интегратор «ИГ-1» имеет 100 точек, является двухмерным. Интегратор «ИГ-3» малогабаритный, для учебных целей (10 точек)	Стендовая конструкция	НИИСЧЕТМАШ ММиП (проф. Лукьянов).
2	Электрическая модель-сетка «ЭИ-12»	Для решения уравнений Лапласа и Пуассона. Имеет 448 узловых точек. Коэффициенты уравнений задаются двухзначным числом. Граничные условия задаются с точностью 0,5%	Стендовая конструкция	Лаборатория электро моделир. Энергетического института АН СССР
3	Электрические модели-сетки «ЭМ-5», «ЭМ-7», «ЭМ-8»	Пригодны для решения уравнений Фурье, чего нет в «ЭИ-12». Имеют трехзональную сетку и электронное управление заданием начальных и граничных условий	Стендовая конструкция	Лаборатория моделирования Института автоматики ВСНИТО
4	Специализированная уникальная сеточная электро модель «ЭИ-С».	Трехзональная сетка имеет около 13 000 узловых точек. Имеет возможность набора координаты, т. е. третьего измерения для исследуемой области. Имеет усовершенствованную схему управления, измерения и сигнализации	Большая стендовая конструкция	Филиал КБ МПиСА

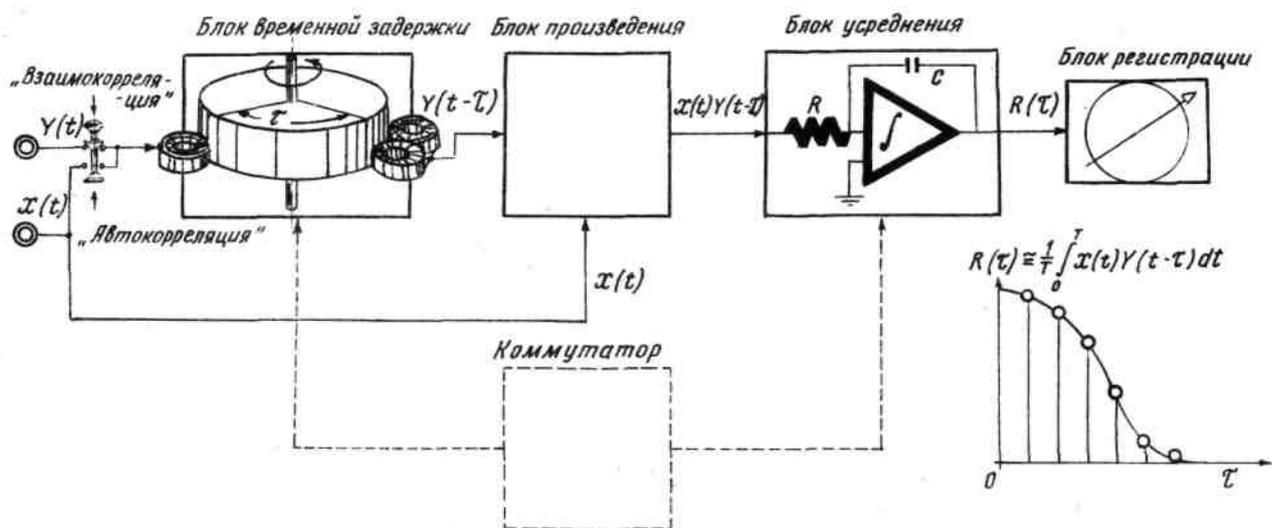


Рис. 23. Принципиальная схема коррелятивного анализатора

Наиболее типичными из таких задач являются:

- 1. Задачи гидродинамики и термодинамики.** Задача исследования движения вязкой жидкости в длинной трубе постоянного сечения. Исследование распределения температуры в цилиндре, имеющем теплообмен с окружающей средой. Расчет аэродинамических сил, действующих на колеблющееся крыло, и т. п.
- 2. Задачи теории упругости.** Например, задача о кручении сплошных и полых стержней.
- 3. Задачи геофизики.** Задача о рассеянии света в атмосфере
- 4. Задачи теории колебаний.** Задача об изгибных и крутильных колебаниях. Задача о совместных колебаниях крыла с сосредоточенными грузами. Задача об электромагнитных колебаниях в плоском неоднородном теле.

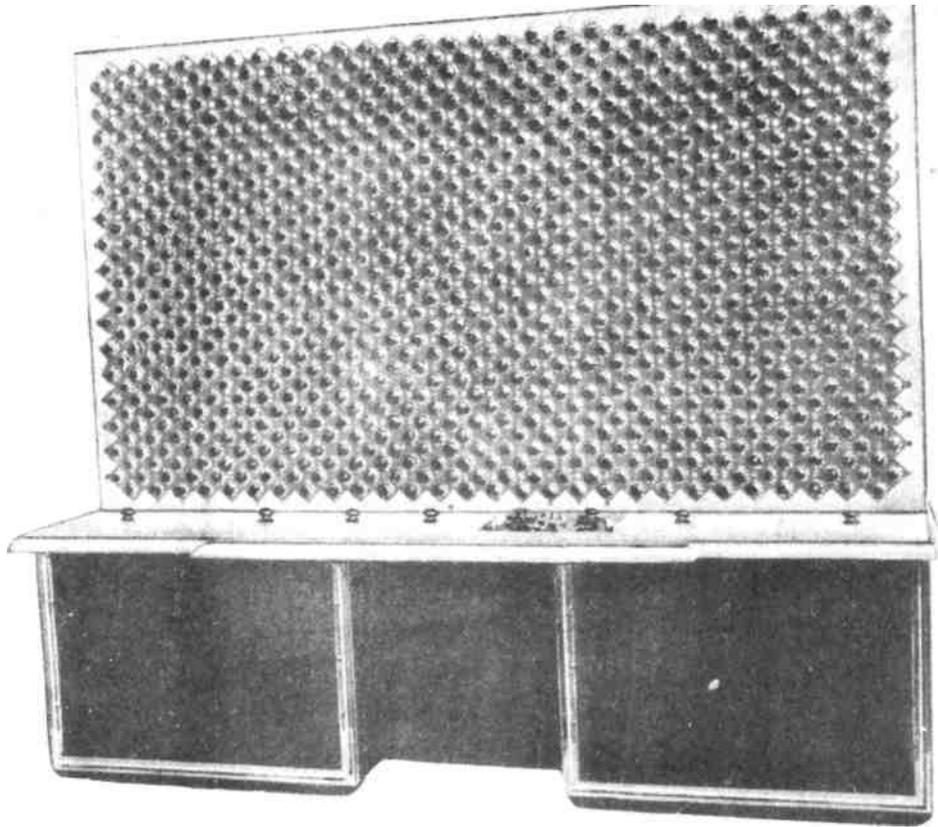


Рис. 24. Общий вид интегратора-сетки ЭИ-12

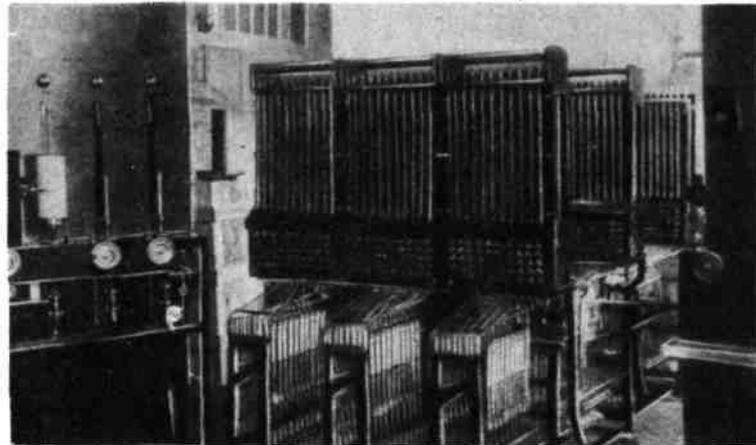


Рис. 25. Общий вид трехмерного гидроинтегратора ИГ-4

5. Задачи оптики и др.

Эти задачи приводят в основном к уравнению Фредгольма второго рода:

$$\varphi(x) = f(x) + \lambda \int_a^b K(x,s) \cdot \varphi(s) ds$$

и уравнению Вальтерра

$$\varphi(x) = f(x) + \lambda \int_a^x K(x,s) \cdot \varphi(s) ds$$

При разработке этого вопроса оказалось, что задача может быть разрешена, например, путем применения дополнительно к нелинейной электромоделю блока регистрации и воспроизведения, построенного в КБ МПиСА по схеме с конденсаторами (рис. 26).

В КБ МПиСА был проведен также ряд работ по решению на типовых электромоделях алгебраических и трансцендентных уравнений, а также краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. В

результате была разработана соответствующая методика и создана небольшая дополнительная аппаратура¹.

Одним из наиболее ценных свойств электромоделей, наряду с их работой в натуральном масштабе времени, является легкая возможность варьирования вводимых в их схему исходных данных для набранной на машине задачи. Последнее приводит к получению в короткое время и притом в наглядной форме многих решений для исследуемой задачи, что существенно облегчает поиск ее наилучшего решения. Этим ценным свойством данного класса математических машин исследователи пользуются повсеместно. Отсюда, естественно, возникает мысль, пользуясь этим методом, а также исходя из возможности построить весьма быстродействующие электронные схемы и частично используя логику цифровых машин, создать такую машину непрерывного действия, которая могла бы для заданной системы уравнений и определенных условий, наложенных на задачу, автоматически выбрать наилучшее ее решение.

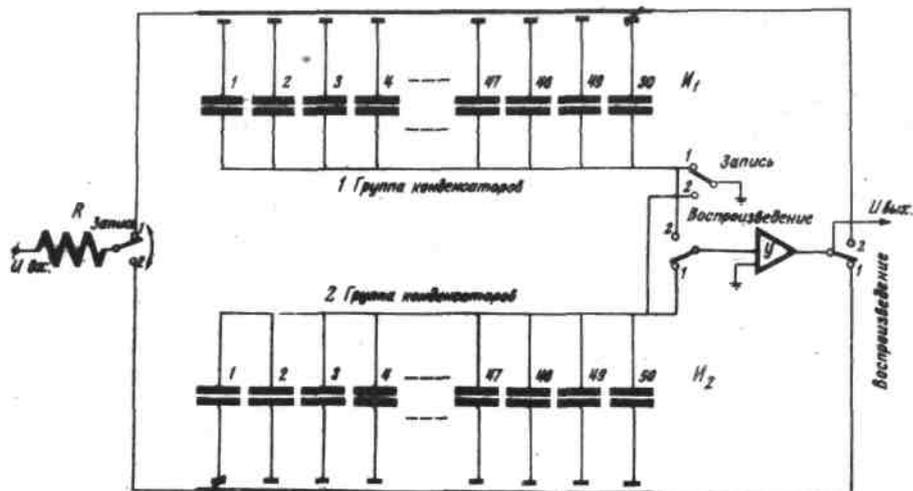


Рис. 26. Принципиальная схема блока записи и воспроизведения функций для решения интегральных уравнений на типовых электромоделях

Одна из возможных блок-схем построения указанной машины для решения подобных задач, разработанная в КБ МПиСА, представлена на рис. 27.

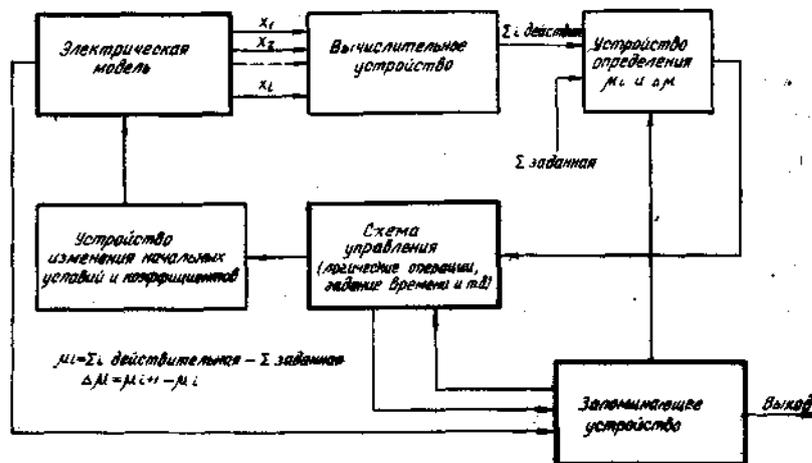


Рис. 27. Блок-схема математической машины, предназначенной для автоматического отыскания оптимального решения задачи

Характерной особенностью такой машины является обязательное наличие в ней некоторого запоминающего устройства и устройства автоматического сравнения каждых двух, как правило, смежных результатов. Оба эти устройства и схема управления, предусматривающая некоторые логические операции, несколько сблизжают указанную машину с автоматическими цифровыми машинами. Одной из основных трудностей ее создания является требующееся большое быстродействие такой схемы. Однако проводимые у нас работы, а также некоторые работы, выполненные в Англии Д. М. Маскау² по созданию электронных машин, работающих на частотах в десятки килогерц, позволяют надеяться на успешное решение данной проблемы.

В заключение целесообразно будет остановиться еще на вопросе о применении вычислительных устройств непрерывного действия в установках автоматического управления производственными процессами.

Актуальность и большое будущее таких устройств в настоящее время являются несомненными. Во многих случаях, когда производственные процессы протекают быстро и в то же время являются подверженными

¹ Более детально этот вопрос излагается в докладе И. М. Витенберга.

² «High Speed Electronic Analogue Computing Techniques». Журнал «Proceedings of the Institution of Electrical Engineers», № 5, 1955, сентябрь

эффективным внешним воздействиям, обычные установки автоматического регулирования (на заданную величину или на заданную программу), а также управляющий процессом персонал не могут обеспечить его необходимого протекания.

Тем более они не могут непрерывно определять и поддерживать некоторый оптимальный режим для такого процесса. В подобных случаях, когда к тому же требуется еще регулировать некоторые комплексные параметры процесса, вычисленные до этого из более простых первичных параметров контролируемых режимов, становится безусловно необходимым некоторый достаточно совершенный автоматический регулятор, основной частью которого является вычислительное или, иначе, математическое устройство (рис. 28).

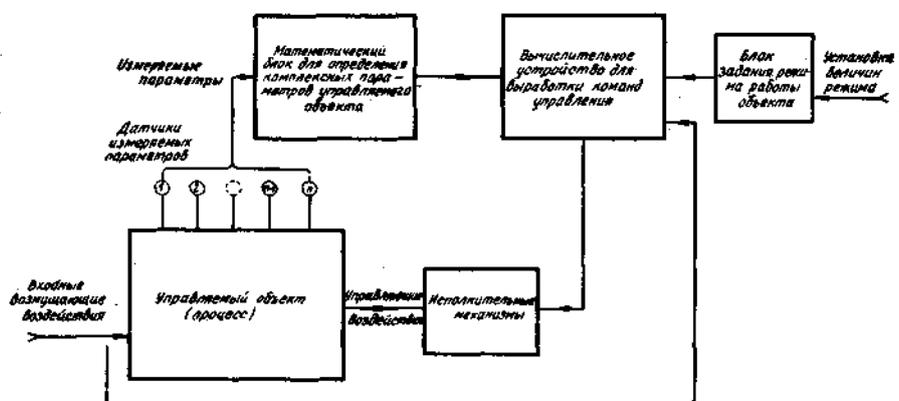


Рис. 28. Блок-схема комплексной установки автоматического управления режимом работы производственного объекта с применением специализированных вычислительных устройств

В последнем случае роль такого устройства сводится к вычислению (при необходимости) по первичным параметрам режима некоторого комплексного параметра, необходимого для контроля за работой объекта и его автоматического регулирования.

Кроме того, во всех случаях вычислительное устройство обязано сравнить полученный результат непосредственно или после его предварительного запоминания с заданным для процесса значением, и по результату сравнения выработать соответствующую команду на исполнительные механизмы, воздействующие на органы, управляющие процессом, или на установки его автоматических регуляторов. В более общем случае такие команды, вырабатываемые вычислительным устройством, должны соответствовать оптимальному (т. е. наилучшему со всех или по возможности со всех точек зрения) протеканию производственного процесса. Помочь разобраться в этой сложной проблеме, над которой в настоящее время уже работает ряд специалистов, может современная теория автоматического регулирования¹, а также выводы современной теории информации.

Построение такого вычислительного устройства, надо надеяться, является делом недалекого будущего.

К проблеме построения такого оптимизирующего устройства может быть с успехом отнесено многое из того, что говорилось ранее о быстродействующей машине, автоматически набирающей наилучшее решение для поставленной на ней задачи.

В связи с рассматриваемым вопросом интересно отметить еще одну идею, высказанную Н. Ziebolz и Н. М. Paynter². Некоторые называют предложенную ими идею «машиной будущего», имея в виду «предсказание» ею ожидаемого наперед результата по входным величинам на текущий момент времени. Такая «машина будущего» по существу является электро моделирующей установкой регулируемого объекта, работающей в ускоренном масштабе времени, но включенной в работу параллельно с объектом. Ее показание, соответствующее упрежденному моменту времени, сравнивается с заданным значением для регулируемых параметров, и в случае расхождения между этими величинами вырабатываются команды для управления объектом.

В данном направлении предстоит проделать еще много поисковых работ, чтобы добиться желаемого результата.

В частности, следует в первую очередь выявить объекты, для которых применение вычислительных устройств с целью автоматического регулирования производственным процессом будет давать необходимую эффективность. Затем следует тщательно изучить динамику этих объектов, в соответствии с чем можно будет разработать необходимое вычислительное устройство. Такими объектами, в частности, являются быстродействующие многоклетевые непрерывные прокатные станы, по которым в США приводятся уже подобные разработки.

В США известно также создание вычислительного устройства непрерывного действия для поддержания в крупной энергосистеме наилучшего режима путем распределения нагрузок между электростанциями в соответствии с состоянием потребления на различных фидерах системы; там же построено также вычислительное устройство для автоматического регулирования агрегатами аэродинамической трубы по некоторому результирующему параметру, определяемому из показаний отдельных датчиков.

Вычислительные устройства непрерывного действия, а также их отдельные блоки и элементы, несомненно, найдут применение и в других ведущих отраслях промышленности, таких, как химическая, нефтедобывающая, нефтеперерабатывающая, металлообрабатывающая, пищевая, текстильная, на транспорте, а также в других областях народного хозяйства.

В порядке подготовки к их разработке придется проделать еще одну подготовительную работу. Речь идет о создании таких узлов вычислительных устройств, которые обладали бы максимальной надежностью при длительной работе и были рассчитаны на тяжелые эксплуатационные условия, а для этого они должны быть

¹ Данный вопрос изложен в докладе А. А. Фельдбаума

² Possibilities of a Two-Time Scale Computing System for Control and Simulation of Dynamic Systems. Книга «Proceedings of the National Electronics Conference» том IX. 1953, сентябрь

построены с максимальным исключением из их схем таких элементов, как радиолампы, контактные соединения, электромеханические реле и т. п. Взамен этих деталей широкое применение должны получить полупроводниковые диоды и триоды, различные магнитные элементы, точные и малогабаритные проволочные сопротивления, нелинейные карборундовые сопротивления и т. п., которые, помимо надежности, должны дать аппаратуре уменьшение ее габаритов и снижение потребления от источников питания.

Первые шаги в этом направлении уже сделаны. В качестве такого примера можно привести разработку в КБ МПиСА малогабаритного блока перемножения, построенного с применением тиритов вместо электронно-ламповых квадраторов.

На рис. 29 видно, насколько сократились габариты такого блока по сравнению с блоком, построенным по схеме с электронно-ламповыми квадраторами.

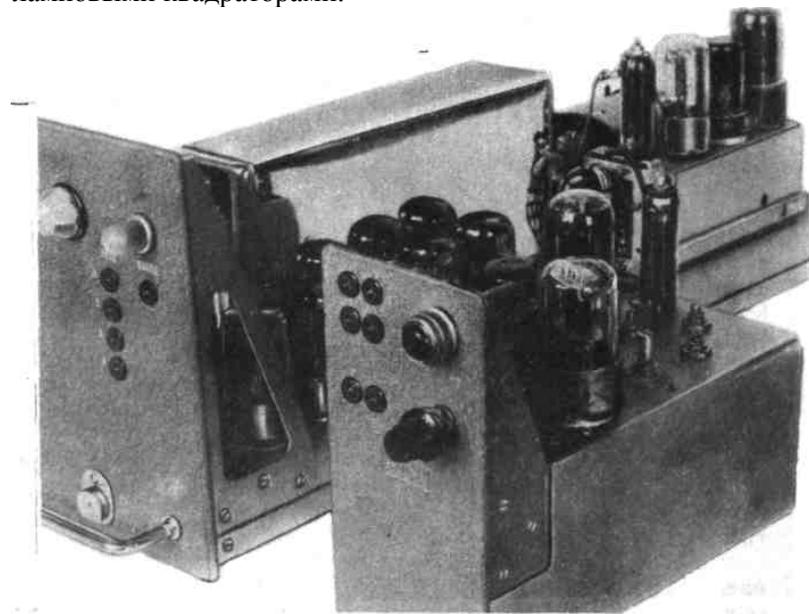


Рис. 29. Сравнение размеров нового блока перемножения, построенного с применением карборундовых сопротивлений (справа), с типовым блоком перемножения, построенным на квадраторах с вакуумными диодами (слева)

На рис. 30 приведена принципиальная схема нового блока перемножения с тиритами, рассчитанного на применение в вычислительных устройствах промышленных установок.

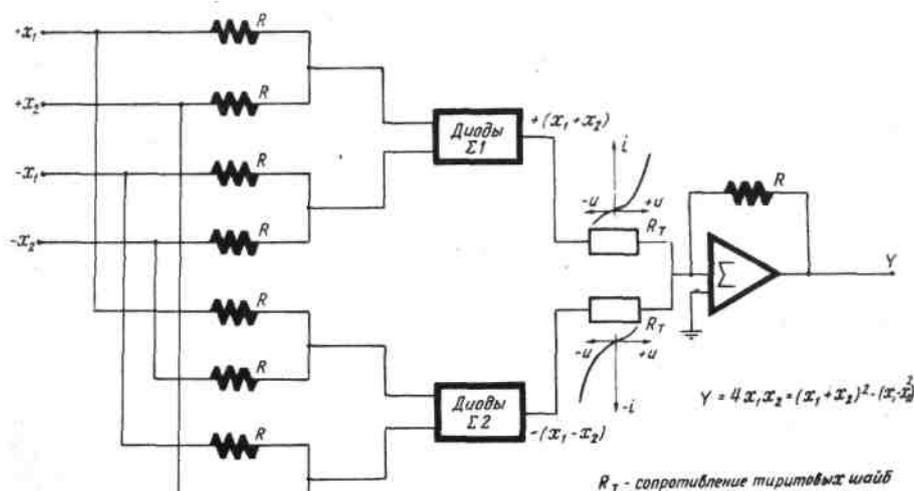


Рис. 30. Принципиальная схема блока перемножения, построенного с применением карборундовых сопротивлений (тиритовых шайб)

В заключение следует кратко остановиться на некоторых основных задачах, которые должны быть решены в целях дальнейшего развития техники математических машин непрерывного действия. К числу таких задач относятся:

1. Создание различных специализированных моделирующих математических машин, применяемых при разработке новых объектов и процессов в различных областях народного хозяйства, например, при разработке новейших энергетических установок, различных мощных станков (в том числе прокатных), новых конструкций автомашин, двигательных и других агрегатов, а также при исследованиях деятельности различных биологических органов, для тренировки персонала, который должен управлять новыми объектами, статистических исследований и т. п.

2. Создание нового класса быстродействующих математических машин непрерывного действия, предназначенных для автоматического отыскания оптимального решения задачи.

3. Разработка различных вычислительных устройств и их блоков (в том числе так называемых оптимизирующих автоматов), предназначенных для работы в автоматизируемых установках различных областей народного хозяйства.

4. Поисковые работы по изысканию новых принципов и методов, на основе которых могут строиться моделирующие установки. Сюда, в частности, можно отнести разработки, использующие для построения вычислительных схем высокочастотные контуры без усилителей, явление эффекта Ходжа и т. п.

5. Работы по дальнейшему повышению точности действия машин и их основных блоков (это относится прежде всего к сложным моделирующим установкам). В частности, целесообразна разработка новых схем и конструкций электромоделей, построенных на схемах дискретного действия или же по смешанным схемам.

6. Работы по повышению стабильности функционирования во времени, а также по улучшению их эксплуатационных свойств: уменьшению габаритов, снижению потребления, в особенности от стабилизированных источников питания и т. д. Сюда относятся, в частности, работы по всемерному применению в схемах машин полупроводниковых и магнитных элементов, прецизионных малогабаритных проволочных сопротивлений или нелинейных карборундовых сопротивлений, надежных и малогабаритных коммутационных элементов и т. п., а также работы по дальнейшему развитию блочного типа конструкции, допускающему легкую замену отдельных частей машины.

7. Увеличение промышленного выпуска машин и их стандартных блоков и связанное с этим удешевление моделирующих установок. Кроме того, массовый выпуск стандартных блоков машин в ряде случаев даст возможность потребителю самому создать схемы специализированных моделирующих установок для различных случаев их применения.

8. Создание более совершенных средств индикации и регистрации полученных результатов решения, а также различных переходных устройств между электромоделями и исследуемой аппаратурой. В частности, разработка устройств автоматического вывода и индикации искомых переменных с интеграторов-сеток, планшетных и многоканальных быстродействующих регистрирующих приборов и т. д.

Указанным выше далеко не исчерпываются те задачи, которые должны быть разрешены в этой перспективной области математического машиностроения.

Однако для разрешения только перечисленных задач необходимо будет проделать весьма большую научно-техническую работу.

Пройденный же нами путь составляет лишь сравнительно небольшую часть той работы, которая предстоит в будущем специалистам, создающим новые математические машины непрерывного действия.

Нет сомнений, что поставленные перед нами XX съездом КПСС задачи на шестую пятилетку в области математического машиностроения будут успешно разрешены. Будут созданы новые математические машины, а также вычислительные устройства для промышленных установок, находящиеся на современном уровне и удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к ним различными отраслями народного хозяйства нашей родины.