

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

Н А У Ч Н О - П О П У Л Я Р Н А Я С Е Р И Я

А. И. КИТОВ, Н. А. КРИНИЦКИЙ

ЭЛЕКТРОННЫЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ
МАШИНЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
А К А Д Е М И И Н А У К С С С Р
М о с к в а . 1958

Брошюра знакомит читателя с принципом устройства и действия электронных цифровых вычислительных машин. Дается обзор применения электронных вычислительных машин, в частности для решения математических и логических задач и для автоматического управления объектами.

Ответственный редактор *академик А. А. Дороницын*

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Глава I</i> НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КИБЕРНЕТИКИ.....	4
Возникновение кибернетики	4
Информация и сигнал.....	5
Мера количества информации.....	6
Некоторые примеры применения теории информации	9
Преобразование информации	10
Самоуправляемые системы	13
Краткие выводы	15
<i>Глава II</i> ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ МАШИН	16
Основные типы машин.....	16
Электронные вычислительные машины непрерывного действия	17
Электронные цифровые программно-управляемые машины. Представление чисел в машинах	22
Принцип действия электронных программно-управляемых машин	25
Технические принципы построения электронных цифровых машин	29
<i>Глава III</i> ОСНОВЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ	40
Порядок решения задач на машине	40
Контроль правильности вычислений.....	41
Программирование	42
Изменяемые программы. Разветвления программ. Циклические программы.....	50
<i>Глава IV</i> ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ МАШИН.....	56
Решение математических задач.....	56
Решение задач логического характера.....	57
Автоматическое программирование.....	58
Машинный перевод с одного языка на другой.....	60
Игра машин в различные игры.....	60
Другие задачи логического характера	62
Применение электронных цифровых машин для целей автоматического управления	63

Возникновение кибернетики

Для развития современной науки характерны два процесса.

Один из этих процессов можно назвать диссоциацией (расщеплением). Сущность его состоит в том, что научные дисциплины, ранее охватывавшие большие области явлений, распадаются на ряд самостоятельных наук, изучающих значительно более узкие области явлений. Диссоциация наук вызвана их постоянным развитием, в ходе которого изыскиваются более глубокие методы исследования, обнаруживающие коренные различия между явлениями или процессами, бывшими при прежних грубых методах изучения объектами одной науки. Вторая причина диссоциации состоит в быстром увеличении количества изученных фактов, в росте объема накопленных научных знаний.

Поясним сказанное на следующем примере.

Во времена Ньютона и Эйлера математика существовала как единая наука. В настоящее время математика представляет целый комплекс наук, таких как математический анализ, теория функций действительного переменного, теория функций комплексного переменного, высшая алгебра, векторный анализ, тензорный анализ, высшая геометрия, топология, номография, теория чисел и многие другие.

Однако наряду с диссоциацией происходит и другой процесс, противоположный диссоциации по своему характеру. Этот процесс можно назвать ассоциацией, объединением наук в новые научные области. Сущность ассоциации состоит в том, что в результате углубления научных методов и главным образом благодаря сопоставлениям результатов, даваемых различными науками, возникают новые точки зрения на явления, которые прежде считали не имеющими между собой ничего общего. Это позволяет установить общую точку зрения и применить общий метод к изучению таких явлений. Примером ассоциации может служить возникновение общей теории колебаний, рассматривающей с единой точки зрения такие явления, как механические колебания, акустические колебания (звук), геологические колебания, электромагнитные колебания (свет, радиоволны) и многие другие.

Примером ассоциаций наук является также наблюдаемое нами в настоящее время возникновение новой научной области, получившей название кибернетики.

Кибернетика изучает с единой общей точки зрения вопросы управления и связи в различных системах, которые до сих пор рассматривались в таких далеких друг от друга науках, как математика, логика, биология, психология, физиология, лингвистика, теория связи, теория автоматического регулирования, теория электронных цифровых программно-управляемых машин.

Слово «кибернетика» означает по-гречески — искусство кормчего. Название «кибернетика» для не существовавшей в то время науки было введено еще в 1843 г. крупным французским ученым А. М. Ампером, сделавшим попытку осуществить научную классификацию наук. Ампер считал, что должна существовать наука об управлении государствами и именно для нее ввел это название.

Однако кибернетика как область знания возникла лишь 100 лет спустя, в 40-х годах текущего столетия. Толчком к ее развитию послужило появление и быстрое совершенствование новых вычислительных средств — электронных программно-управляемых машин.

В 1948 г. вышла в свет первая книга, непосредственно посвященная вопросам кибернетики, — «Кибернетика или управление и связь в животном и машине». Написал ее профессор Колумбийского университета (США) математик Норберт Винер.

Винер определяет кибернетику как науку о «связи», «управлении» и «контроле» в машинах и живых организмах. Случаи, когда связь, управление и контроль осуществляются коллективами людей или людьми при помощи машин, также не исключаются им из рассмотрения.

Таким образом, кибернетика в понимании Винера имеет содержание, отличное от того, которое вкладывал в это слово А. М. Ампер.

При изучении работы электронных программно-управляемых машин была замечена некоторая аналогия, существующая между функциями таких машин и функциями человеческого мозга. Например, машина обладает свойством накопления и хранения чисел, что соответствует функции памяти человеческого мозга. Решение математических задач на электронной программно-управляемой машине осуществляется на основании тех же законов логики, которыми для этих целей пользуется человек.

Дальнейшее изучение этой аналогии показало, что сходство между функциями электронной программно-управляемой машины и функциями мозга действительно существует. В основе этого

сходства лежит тот факт, что как электронная программно–управляемая машина, так и мозг представляют собой самоуправляемые системы, работа которых состоит в обмене информацией (см. следующий раздел) между отдельными их частями и в преобразовании этой информации.

По своей физической природе, по характеру протекающих в них физических процессов, по своим возможностям и надежности в работе программно–управляемая машина и мозг, конечно, совершенно различны. Но и машина и мозг являются системами, принимающими, перерабатывающими, хранящими и передающими информацию. Некоторые коллективы людей можно рассматривать тоже как системы, принимающие, перерабатывающие, хранящие и передающие информацию.

Информация и сигнал

Как было сказано выше, кибернетика есть наука о связи, управлении и контроле в живых организмах, машинах, а также в некоторых коллективах людей.

Это определение требует уточнения. Кибернетика изучает живые организмы и машины исключительно с точки

зрения их способности воспринимать определенную «информацию», сохранять ее в «памяти», преобразовывать ее и передавать по «каналам связи».

В кибернетике понятие информации является весьма широким.

Так, читая книгу, читатель воспринимает информацию.

Сообщения, публикуемые в газетах, передаваемые по радио, получаемые человеком из разговора с другими людьми,— являются информацией.

«Сведения» о внешней среде и ее изменениях, получаемые мозгом человека или животного от органов чувств,— являются информацией.

«Указания», получаемые мускулатурой тела человека или животного от мозга, о том, какие движения должны быть произведены, также представляют собой информацию.

Исходные данные задачи, подлежащей решению, вводимые в электронную программно–управляемую машину, равно как и промежуточные или окончательные результаты решения задачи,— также не что иное, как информация.

Органы или приборы, вырабатывающие информацию, передают ее по назначению в виде сигналов. Среда, служащая для передачи сигналов, называется каналом связи. Например, при передаче телеграмм сигналами служат импульсы электрического тока, а каналом связи — металлический провод с необходимой аппаратурой. При передаче информации путем устной речи сигналами являются звуковые колебания, а каналом связи — воздух.

Сигналы, о которых мы сейчас говорили, представляют собой физические процессы, протекающие в среде, называемой каналом связи, причем характерно для этих процессов именно то, что они распространяются или перемещаются по каналу связи.

Процесс передачи информации может быть весьма сложным. Например, при передаче по радио информация сперва передается в виде звуковых сигналов диктором, говорящим перед микрофоном. В микрофоне звуковые сигналы преобразуются в электрические сигналы. В передатчике радиостанции электрические сигналы преобразуются в электромагнитные колебания — радиоволны. Последние радиоприемником опять превращаются в электрические сигналы, которые динамическим громкоговорителем или телефоном преобразуются снова в звуковые сигналы и лишь теперь достигают нашего уха. Преобразование сигналов, не сопровождающееся изменением содержания информации, которую они несут, называется перекодировкой информации.

Наряду с передачей информации часто приходится наблюдать и хранение ее. Мозг человека обладает способностью запоминать информацию. Речь, произносимую оратором, можно записать на магнитофонную пленку. Свои мысли и неотложные дела мы для памяти привыкли записывать в записной книжке.

Орган или прибор, служащий для хранения информации, называют запоминающим устройством или коротко — памятью.

В памяти информация хранится тоже в виде сигналов. Только в течение всего времени хранения информации эти сигналы за пределы памяти не распространяются.

Чаще всего сигналы, применяемые для «запоминания» информации, представляют собой более или менее устойчивые изменения среды, образующей запоминающее устройство. Так, при использовании в качестве запоминающего устройства ферромагнитной пленки, сигналами являются группы намагниченных участков этой пленки. Запоминание информации человеческим мозгом происходит в

результате возникновения устойчивых изменений в определенных его клетках или группах клеток.

Интересно отметить, что иногда передача информации осуществляется путем транспортировки запоминающего устройства, хранящего эту информацию. Каналом связи при этом является совокупность оборудования, с помощью которого осуществляется транспортировка. Примером такой передачи информации может служить почтовая связь.

Возможны также случаи хранения информации путем многократной передачи ее по некоторому каналу связи из одного конца его в другой и обратно (или циркуляции сигналов в замкнутом канале связи). Такой канал связи вместе с устройствами приема и обратной отправки («отражения») сигналов, несущих информацию, представляет собой запоминающее устройство. Примером такого динамического запоминающего устройства может служить запоминающее устройство, построенное из ртутных линий задержки, применяемое в некоторых электронных вычислительных машинах.

Ртутная линия задержки представляет собой трубку, наполненную ртутью. Сигналами, несущими информацию, являются звуковые колебания, возбуждаемые в ртути на одном конце трубки и воспринимаемые на другом. При возврате к первому концу колебания подвергаются усилению и вновь передаются ртути.

Из сказанного видно, что информация может находиться как в состоянии передачи (по каналу связи), так и в состоянии хранения (в памяти). Информация может также подвергаться преобразованиям, на чем мы остановимся в дальнейшем.

Подчеркнем сразу же, что передача и прием информации есть лишь один из видов связи между объектами. Во-первых, не между всякими объектами существует связь, состоящая в передаче информации. Во-вторых, не всякая связь между объектами является обменом информацией.

Мы знаем, что все явления и объекты мира существуют во взаимосвязи. Эта связь бесконечно многообразна. Кибернетика, изучающая лишь один из видов связи—обмен информацией,— не может претендовать и не претендует на то, чтобы быть наукой о всеобщей связи.

Мера количества информации

Раздел кибернетики, называющийся теорией информации, изучает информацию с количественной стороны. Это стало возможным благодаря тому, что удалось ввести понятие количества информации.

Рассмотрим систему событий A_1, A_2, \dots, A_n , обладающую тем свойством, что одно и только одно из событий этой системы должно произойти. Пусть p_1, p_2, \dots, p_n —соответственно вероятности наступления событий A_1, A_2, \dots, A_n (очевидно, $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$). Система событий A_1, A_2, \dots, A_n , рассматриваемых в совокупности с их вероятностями, называется конечной схемой. Конечную схему обозначают символом:

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 \dots & A_n \\ p_1 & p_2 \dots & p_n \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Всякая конечная схема содержит некоторую неопределенность. Известен перечень возможных событий, известна вероятность каждого события, но какое из событий в действительности произойдет — неизвестно.

Сообщение о результате испытания конечной схемы снимает эту неопределенность. Естественно считать, что количество информации, содержащейся в сообщении о результате испытания конечной схемы, равно величине неопределенности, содержащейся в этой конечной схеме. Эту неопределенность условились измерять величиной

$$m = -(p_1 \log_a p_1 + p_2 \log_a p_2 + \dots + p_n \log_a p_n). \quad (1.2)$$

Здесь a — некоторое положительное число, больше единицы. Ниже будет показано, что выбор числа a равноценен выбору единицы измерения.

Кроме того, принято, что если $p=0$, то

$$p \log_a p = 0. \quad (1.3)$$

Знак минус в правой части формулы (1.2) взят потому, что все слагаемые $p \log_a p$ неположительны (вероятность p , если не равна нулю, является положительным числом не больше 1, т. е. $\log_a p$ будет отрицательным числом или нулем, следовательно, и произведение $p \log_a p$ будет отрицательным числом

или нулем). Таким образом этот знак делает правую часть формулы (1.2) положительной.

Рассмотрим внимательно формулу (1.2) и убедимся в целесообразности выбранного нами способа измерения количества информации.

Предположим, что одно из событий A_1, A_2, \dots, A_n является достоверным. Например, событие A_1 . Тогда его вероятность будет равна единице, а вероятность каждого из остальных событий будет равна нулю. Конечная схема принимает вид:

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 \dots & A_n \\ 1 & 0 \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Очевидно, такая конечная схема не содержит никакой неопределенности и сообщение о результате ее испытания не будет содержать никакой информации.

Формула (1.2) дает именно этот результат:

$$m = -(1 \log_a 1 + 0 + \dots + 0) = 0.$$

Очевидно, наибольшую неопределенность содержит конечная схема, все события которой равновероятны. В случае такой конечной схемы, до ее испытания, труднее всего сделать сколько-нибудь обоснованное предположение о результатах испытания.

Исследуя на максимум величину m как функцию переменных p_1, p_2, \dots, p_n (эти выкладки здесь не приводятся), легко получить, что своего наибольшего значения m достигает при $p_1 = p_2 = \dots = p_n = \frac{1}{n}$, т. е. в случае равной вероятности событий, образующих конечную схему. При этом конечная схема принимает вид:

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 \dots & A_n \\ \frac{1}{n} & \frac{1}{n} \dots & \frac{1}{n} \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

Сообщение о ее испытании содержит количество информации, равное:

$$m = -\left(\frac{1}{n} \log_a \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \log_a \frac{1}{n} + \dots + \frac{1}{n} \log_a \frac{1}{n}\right) = \log_a n \quad (1.6)$$

Обратим особое внимание на простейший частный случай конечной схемы (1.5), именно на случай, когда $n=2$: При этом схема состоит из двух событий: A_1 и A_2 . Событие A_2 , применяя обозначение математической логики, можно записать символом $\overline{A_1}$ (это читается: не A_1). Конечная схема имеет вид:

$$\begin{pmatrix} A_1 & \overline{A_1} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Сообщение о результате ее испытания содержит количество информации, равное числу:

$$m^* = \log_a 2$$

Если мы положим $a = 2$ (в последней и во всех предыдущих формулах), то будем иметь:

$$m^* = \log_2 2 = 1$$

Тем самым мы выбираем единицу измерения количества информации.

Таким образом, за единицу количества информации принято количество информации, содержащееся в сообщении об испытании конечной схемы, состоящей из двух равновероятных событий. Эта единица получила название «бид».

Выбранная нами мера количества информации обладает еще тем свойством, что при подсчете с ее помощью количества информации, содержащегося в сообщении об испытании двух независимых между собой конечных схем, получается число, равное сумме количеств информации, содержащихся в сообщениях об испытании каждой из конечных схем в отдельности, т. е., как говорят, мера количества

информации обладает свойством аддитивности.

Ограничимся доказательством этого факта для простейшего случая, когда каждая из конечных схем состоит из двух событий. Доказательство в общем случае совершенно аналогично приводимому.

Итак, рассмотрим две конечные схемы:

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ p_1 & p_2 \end{pmatrix}; p_1 + p_2 = 1$$

$$\begin{pmatrix} B_1 & B_2 \\ q_1 & q_2 \end{pmatrix}; q_1 + q_2 = 1$$

Сообщения о результатах испытания этих конечных схем содержат соответственно следующие количества информации:

$$m_1 = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2) \quad (1.10)$$

$$m_2 = -(q_1 \log_2 q_1 + q_2 \log_2 q_2) \quad (1.11)$$

Очевидно, испытание обеих конечных схем (1.8) и (1.9) эквивалентно испытанию новой конечной схемы

$$\begin{pmatrix} A_1 \text{ и } B_1 & A_1 \text{ и } B_2 & A_2 \text{ и } B_1 & A_2 \text{ и } B_2 \\ p_1 q_1 & p_1 q_2 & p_2 q_1 & p_2 q_2 \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

Каждое событие конечной схемы (1.12) представляет сочетание одного из событий, входящих в конечную схему (1.8), с одним из событий, входящих в конечную схему (1.9). Вероятность наступления такого комбинированного события, как известно, равна произведению вероятностей наступления событий, входящих в комбинацию

Подсчитаем количество информации, содержащееся в сообщении об испытании конечной схемы (1.12):

$$m = -[p_1 q_1 \log_2 (p_1 q_1) + p_1 q_2 \log_2 (p_1 q_2) + p_2 q_1 \log_2 (p_2 q_1) + p_2 q_2 \log_2 (p_2 q_2)] \quad (1.13)$$

Представляя в этом выражении каждый логарифм произведения в виде суммы логарифмов сомножителей и выполняя затем несложные алгебраические преобразования, получаем:

$$m = -[p_1 q_1 \log_2 p_1 + p_1 q_1 \log_2 q_1 + p_1 q_2 \log_2 p_1 + p_1 q_2 \log_2 q_2 + p_2 q_1 \log_2 p_2 + p_2 q_1 \log_2 q_1 + p_2 q_2 \log_2 p_2 + p_2 q_2 \log_2 q_2] = -(q_1 + q_2)(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2) - (p_1 + p_2)(q_1 \log_2 q_1 + q_2 \log_2 q_2).$$

Учитывая условия

$$p_1 + p_2 = 1,$$

$$q_1 + q_2 = 1$$

а также формулы (1.10) и (1.11), получаем:

$$m = m_1 + m_2, \quad (1.14)$$

что и требовалось доказать.

Все сказанное выше убеждает нас в том, что способ измерения количества информации выбран нами целесообразно.

В заключение приведем два примера.

Во многие игры в качестве составного элемента входит метание кости, представляющей кубик, на гранях которого написаны цифры 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Пусть конечная схема состоит из шести событий, каждое из которых представляет выпадение одного

из указанных чисел при метании кости. Если кость изготовлена из однородного материала с возможной степенью точности, то все события можно считать равновероятными. Конечная схема имеет вид:

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \end{pmatrix}$$

Сообщение о результате метания кости содержит следующее количество информации:

$$m \approx \log_2 6 \approx 2,585 \text{ бидов.}$$

Или предположим, что кость, метания которой производят по-прежнему, имеет форму куба, но на одной из его граней написана цифра 1, а на пяти остальных — цифра 2. Теперь конечная схема состоит из двух событий:

A_1 (выпадение цифры 1) с вероятностью $\frac{1}{6}$ и A_2 (выпадение цифры 2) с вероятностью $\frac{5}{6}$:

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ \frac{1}{6} & \frac{5}{6} \end{pmatrix}$$

Сообщение о результате метания кости содержит меньше информации, чем в примере 1, а именно:

$$m = -\left(\frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} + \frac{5}{6} \log_2 \frac{5}{6}\right) = \log_2 6 - \frac{5}{6} \log_2 5 \approx 0,650 \text{ бидов.}$$

Некоторые примеры применения теории информации

Многие результаты, полученные методами теории информации, имеют непосредственное практическое применение. Коротко остановимся на некоторых из них.

Количество информации, передаваемой за единицу времени по некоторому каналу связи, называется скоростью передачи информации. Информация передается по каналу связи, как уже говорилось, путем передачи сигналов. Сигналы представляют некоторые процессы, протекающие в канале связи. Но канал связи не может быть полностью изолирован от воздействий внешней среды. Эти воздействия могут вызывать в нем процессы той же физической природы, что и сигналы, которые, взаимодействуя с сигналами, вызывают их искажение. Посторонние явления, протекающие в каналах связи и искажающие сигналы, получили название шумов или помех.

Итак, передача информации происходит в условиях наличия шумов, искажающих полезные сигналы. Иногда искажения сигналов достигают такой степени, что искажается информация, содержащаяся в сигналах. Шумы даже могут быть такими сильными, что сигналы становятся для приемника совершенно неразличимыми.

Надежностью передачи называется вероятность приема неискаженной информации. Весьма интересна доказанная в теории информации теорема, гласящая, что с увеличением скорости передачи ее надежность уменьшается и наоборот, — за счет уменьшения скорости передачи можно повысить ее надежность. Поясним этот результат простым примером.

Предположим, что гражданин Иванов, уезжая из Москвы в Ленинград, договорился с гражданином Петровым о следующем. Иванову может понадобиться одна из книг его личной библиотеки. В этом случае Иванов пришлет Петрову телеграмму с указанием названия нужной книги, Петров в квартире Иванова найдет нужную книгу и вышлет ее ему по почте. Проходит некоторое время и Петров получает от Иванова телеграмму следующего содержания: «Алепсей Толстой том 6 Хождение по мукам».

Телеграмма содержит искажение («Алепсей» — вместо «Алексей»), тем не менее содержание ее вполне ясно. Дело в том, что при передаче этой телеграммы количество информации, приходившееся на единицу времени, было сравнительно невелико.

Но, договариваясь между собой, Иванов и Петров могли поступить так: составить список книг Иванова и против наименования каждой из них поставить какую-нибудь букву. Тогда, вместо приведенной выше длинной телеграммы, Иванов мог послать Петрову телеграмму, состоящую всего из одной буквы (например, из буквы К, если бы эта буква обозначала вышеупомянутую книгу). Скорость передачи информации при пересылке такой телеграммы была бы во много раз больше, чем в первом случае, а надежность гораздо меньше. Искажение телеграммы (прием, например, буквы П, вместо К) полностью изменило бы содержание передаваемой информации. Петров мог бы вместо 6-го тома

сочинений Алексея Толстого выслать Иванову, например, Поваренную книгу.

Однако, пользуясь последним способом кодировки, Иванов все же мог значительно повысить надежность передачи информации. Для этого ему было бы достаточно передать телеграмму, состоящую не из одной буквы К, а из ста одинаковых букв К. Искажения отдельных букв такой телеграммы не помешали бы Петрову понять ее содержание. Конечно, необходимо, чтобы Петров заранее знал о способе передачи информации, которым будет пользоваться Иванов.

Приведенный пример, поясняя вышеназванную теорему, кроме того, приводит нас к выводу, что для «понимания» передаваемой информации приемник должен заранее располагать определенными сведениями, «знать» из каких событий состоит конечная схема и как будет закодировано сообщение о результате ее испытания. Действительно, не имея списка книг, в котором против названия каждой книги проставлена определенная буква, Петров не смог бы при втором способе кодировки понять смысла телеграммы Иванова. Точно так же и при первом способе кодировки информации Петров не понял бы телеграммы: «Высылай Двенадцать стульев Ильфа и Петрова», если бы ничего не знал о писателях Ильфе и Петрове. Может быть, вместо нужной книги он переслал бы Иванову в Ленинград дюжину стульев.

Сигналы, хранящиеся в «памяти», также подвержены действиям помех, которые могут исказить их, причем в ряде случаев может исказиться представленная ими информация. Например, записи, произведенные в записной книжке, могут стираться и становиться неразборчивыми.

В случае полного стирания отдельных слов смысл записи может измениться. Судьям и следователям, допрашивающим свидетелей, хорошо известно, как сильно может отличаться то, что запомнил очевидец, от того, что он видел в действительности. Значит человеческая память тоже подвержена влиянию помех.

Немалый интерес представляет также следующая теорема, доказанная в теории информации: скорость передачи информации по каждому каналу связи имеет максимум, при достижении которого она уже никаким способом не может быть повышена.

Максимум скорости передачи информации по каналу связи получил название пропускной способности канала связи, так как он представляет собой наибольшее количество информации, которое можно за единицу времени передать по каналу.

Последнюю теорему приходится учитывать при проектировании телефонных линий в больших городах и т. п.

При обучении человека различным наукам информация передается извне в его мозг по различным каналам. Во время слушания лекции таким каналом является слуховой нерв, во время чтения учебника, просмотра научного кинофильма или наблюдения опыта в лаборатории — зрительный нерв. При прохождении практики в лаборатории или на производстве каналами связи для передачи информации могут быть и другие нервы (осязательные, обонятельный, вкусовой и т. д.). При правильном обучении приходится пользоваться одновременно несколькими из этих каналов связи. Любопытно отметить, что наибольшей пропускной способностью, как это показали исследования, обладает слуховой нерв.

Читатель, относящийся к старшему поколению, вероятно, помнит так называемый лабораторный метод обучения, состоявший в том, что студенты изучали науки исключительно путем чтения учебников. Этот метод впоследствии был отменен как не оправдавший себя. Преимущества лекционного метода обучения перед лабораторным в некоторой степени зависят и от того, что пропускная способность слухового нерва как канала связи значительно выше, чем пропускная способность зрительного нерва.

Преобразование информации

Преобразование информации осуществляется путем изменения несущих или хранящих ее сигналов.

Мы уже знаем, что существуют преобразования сигналов, не изменяющие содержания представленной ими информации (перекодировка информации). Но возможны преобразования сигналов, сопровождающиеся закономерным изменением содержания отвечающей им информации. Такие преобразования сигналов и информации называют содержательными. Частным видом содержательного преобразования информации является ее логическое преобразование. Примером логического преобразования информации является ее преобразование, выполняемое при решении математических или логических задач.

Предположим, что нам задана информация:

Один гражданин купил 5 м сукна и 3 м сатина, заплатив за покупку 530 руб. Другой гражданин за 4 м сукна и 12 м сатина заплатил 520 руб.

Обозначая буквой x цену 1 м сукна, а буквой y — цену 1 м сатина, мы можем написать:

$$5x + 3y = 530$$

$$4x + 12y = 520.$$

Эти два уравнения содержат ту же самую информацию, которая прежде была заложена в словесную формулировку задачи. Переход от слов к алгебраическим уравнениям является перекодировкой, а не преобразованием информации.

Умножим первое уравнение на 4 и вычтем из него второе уравнение. Получим:

$$16x = 1600.$$

Разделив обе части этого уравнения на 16, получим:

$$x = 100.$$

Подставляя значение x в одно из исходных уравнений, находим:

$$y = 10.$$

В результате последних преобразований, произведенных нами над уравнениями (над сигналами), мы получили:

$$x = 100 \quad y = 10.$$

Эти сигналы обозначают информацию: 1 м сукна стоит 100 руб., а 1 м сатина 10 руб.

Мы видим, что исходная информация оказалась преобразованной. Для преобразования информации был необходим запас сведений из алгебры, т. е. для того, чтобы выполнить логическое преобразование информации, необходим некоторый предварительный запас информации.

Описанное здесь преобразование информации выполняется человеческим мозгом по законам логики. С точки зрения логики искомое решение всякой задачи (если эта задача вообще может быть решена) содержится в ее условии, т. е. количество информации, содержащейся в условии задачи, больше, чем ее количество в полученном ответе. Сущность решения задачи состоит в том, что решающий ее человек проводит ряд рассуждений, руководствуясь при этом законами логики, приводящими в итоге к искомому ответу. При этом для преобразования информации, содержащейся в условии задачи, необходимо привлечь дополнительную информацию о правилах этого преобразования. Результат преобразования полностью определяется содержанием исходной информации и законами логики. Отсюда происходит название — логическое преобразование информации.

Однако сказанное выше вовсе не означает, что в счетно-решающих машинах такой же результат может быть достигнут только путем тех же преобразований, которые выполняет человеческий мозг.

Содержательное преобразование информации может выполняться не только по законам логики, но и по другим различным законам. Иногда закон преобразования может быть задан в виде таблицы соответствия между сигналами, несущими исходную информацию, и сигнале ми, отвечающими преобразованной информации. При этом преобразование информации сводится к выбору результата из таблицы на основании поступающих исходных данных. В частном случае такая таблица может быть составлена в процессе эксперимента; например, таблица для получения информации о силе сопротивления воздуха движению самолета по информации о скорости движения самолета относительно воздуха и об атмосферном давлении. Необходимое преобразование информации может осуществляться также путем вычислений по специально подобранным формулам, заменяющим таблицы, и т. п. В управляющих системах информацию принято различать по назначению, по той роли, которую она выполняет в этих системах. Информацию, поступающую от чувствительного органа (устройства), называют осведомляющей информацией, а информацию, передаваемую управляющим органом (устройством) в управляемые органы (устройства), называют управляющей информацией. При этом говорят, что в управляющем органе происходит преобразование осведомляющей информации в управляющую.

Так, под влиянием внешних воздействий, органы чувств человека вырабатывают осведомляющую информацию, которая в виде сигналов передается по центростремительным нервам в центральную нервную систему. Например, если человек случайно прикоснулся рукой к горячему предмету, происходит описанный только что процесс. Мозг преобразует эту информацию в управляющую, которая передается по центробежным нервам мышцам руки. Под воздействием управляющей информации мышцы сокращаются и выводят руку из соприкосновения с горячим предметом. На этом, конечно, работа мозга не прекращается. Из мозга передается управляющая информация мышцам глаз. Глаза направляются на предмет, вызвавший ощущение боли. Из глаз в мозг поступает новая осведомляющая информация. Одновременно поступает информация и от других органов чувств. Эта информация преобразуется, в частности, и логически, причем используются и запасы информации, хранящиеся в памяти. Если окажется, что ожог вызван загоревшимся предметом, то мозг благодаря преобразованию информации поймет, что случился пожар и пошлет в мышцы управляющую информацию, под воздействием которой они придут в действие, и будут приняты меры к тушению пожара.

Аналогичные процессы преобразования информации происходят и в автоматах, построенных человеком. Например, автомат, выключающий электрическую линию переменного тока при коротком замыкании, построен по схеме, приведенной на рис. 1.

Электрический ток, вырабатываемый динамо-машиной, проходит через витки первичной обмотки трансформатора Tp и через рубильник поступает на линию. Если на линии произошло короткое замыкание, то ток, проходящий через первичную обмотку трансформатора Tp , резко возрастет и вызовет повышение напряжения в его вторичной обмотке.

Трансформатор Tp вырабатывает осведомляющую информацию в виде электрического тока вторичной обмотки. Эта информация поступает в преобразователь информации, состоящий из реле Pe . Реле отбалансировано таким образом, что только при достаточно высоком напряжении, поступающем на его электромагнит, происходит притягивание к последнему рычага реле, и тем самым осуществляется включение электродвигателя M . Двигатель M приходит в действие и выключает рубильник Py , тем самым выключая линию.

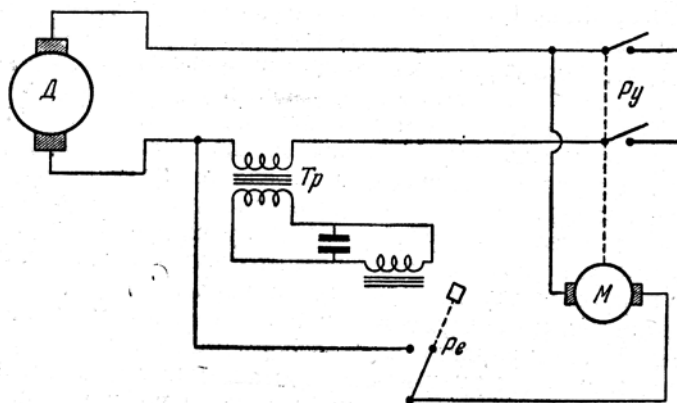


Рис. 1. Схема автомата для выключения линии переменного тока в случае короткого замыкания

Преобразование осведомляющей информации в управляющую в данном случае происходило в электромагните реле. Осуществлялось оно в виде преобразования сигналов: электрический ток определенного напряжения преобразовывался в магнитное поле определенной силы. Управляющая информация имела вид магнитных сигналов.

Из примеров видно, что управляющий орган представляет собой преобразователь информации. Он подвергает осведомляющую информацию содержательному преобразованию, а затем производит перекодировку полученных результатов таким образом, чтобы сигналы, несущие управляющую информацию, были способны воздействовать на управляемый орган.

Передача информации в виде сигналов всегда сопровождается некоторым расходом энергии. Количество энергии, необходимое для передачи информации, не зависит от содержания и количества информации, а определяется чувствительностью элемента, принимающего сигналы (информацию), свойствами каналов связи и характером сигналов, используемых для передачи информации.

В тех случаях, когда передача информации производится с целью управления большими количествами энергии (например, для управления атомной энергией), количество энергии, расходуемой

на передачу управляющей информации, во много раз меньше количества энергии, которой управляет эта информация. Это обстоятельство с выгодой используется при автоматическом управлении или управлении на расстоянии агрегатами, работа которых связана с расходом больших количеств энергии.

Необходимо отметить, что приборы или органы, осуществляющие преобразование информации, так же как и каналы связи и запоминающие устройства, подвержены влиянию внешних воздействий, посторонних по отношению к системе, в состав которой они входят. Эти воздействия (помехи) могут вызывать сбои в работе преобразователей информации, приводящие к искажениям выдаваемой ими информации.

Самоуправляемые системы

Особый интерес представляют разделы кибернетики, изучающие так называемые самоуправляемые или саморегулирующиеся системы. Такие системы могут быть искусственными, созданными человеком, и естественными, например организмы животных. Некоторые коллективы людей и объединения животных также являются саморегулирующимися системами.

В общем случае можно считать, что саморегулирующаяся система состоит из трех основных элементов: управляемого объекта, воздействующего на внешнюю среду; чувствительного элемента, на который влияют воздействия внешней среды и изменения состояния управляемого объекта, и регулятора или управляющего элемента. Регулятор по возможности должен быть изолированным от непосредственных воздействий внешней среды.

Упрощенная схема самоуправляемой системы приведена на рис. 2.

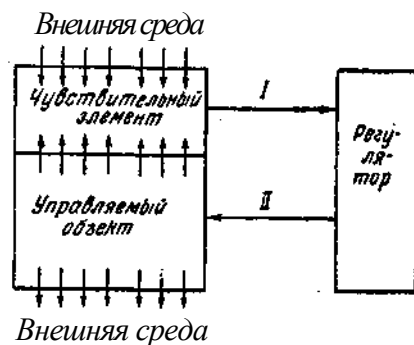


Рис. 2. Упрощенная схема самоуправляемой системы

Чувствительный элемент соединен с регулятором каналом связи *I*. По этому каналу связи осведомляющая информация, выработанная чувствительным элементом, поступает в регулятор. Здесь происходит ее преобразование в управляющую информацию, которая по каналу связи *II* передается управляемому объекту.

Необходимо отметить, что между управляемым объектом и регулятором в таких системах возникает так называемая обратная связь, обратное воздействие управляемого объекта на управляющий элемент (регулятор). Происходит это вследствие того, что чувствительный элемент воспринимает изменения состояния управляемого объекта, происходящие под влиянием управляющей информации, и посылает в регулятор осведомляющую информацию об этих изменениях.

Нередко в состав самоорганизующихся систем входит еще четвертый элемент — запоминающий (память).

В наиболее простых случаях чувствительный элемент и управляемый объект могут быть объединены в одно целое. Это имеет место, например, в такой простейшей самоуправляемой системе, как паровая машина с центробежным регулятором скорости.

Эта система как самоуправляемая способна воспринимать только один вид воздействия внешней среды — изменение нагрузки, приложенной к валу машины. Такое изменение нагрузки приводит к изменению скорости вращения вала.

Все остальные воздействия внешней среды остаются «непонятными» для нашей системы. При изменении скорости вращения вала машины изменяется скорость вращения соединенного с ним центробежного регулятора. Информация от машины к регулятору поступает в виде изменения скорости. Изменение скорости вращения центробежного регулятора приводит к тому, что грузы этого регулятора либо еще больше удаляются один от другого (если скорость возросла), либо сближаются (если скорость

уменьшилась). При этом осведомляющая информация, имеющая вид изменений скорости вращения, преобразуется в управляющую информацию, представленную в виде перемещения грузов регулятора. Грузы регулятора системой рычагов соединены с заслонкой, позволяющей увеличивать или уменьшать приток пара из котла в цилиндры машины.

Изучение самоуправляемых систем интересно, во-первых, потому, что проливает новый свет на ряд до сих пор не изученных вопросов физиологии, биологии, психологии и др. Но главный интерес состоит в том, что без этого невозможно построить сколько-нибудь сложные автоматы, применение которых в промышленности открывает совершенно новые широкие перспективы.

Автоматы, даже такие простые, как описанная выше машина с центробежным регулятором, заменяют собой не только физические, но и некоторые психические функции человека. Например, регулятор, открывающий и закрывающий заслонку паровой машины, выполняет не только функцию руки человека (открывания и закрывания заслонки), но и функцию его внимания, освобождая человека от необходимости непрерывно контролировать число оборотов вала машины.

Исследуя вопросы построения автоматов, выполняющих отдельные психические функции человека, кибернетика встала перед проблемой анализа умственных действий человека, с тем, чтобы разложить их на определенные элементарные преобразования информации.

Возник вопрос — какие виды умственной работы, выполняемой человеком, могут быть возложены на автомат. В поисках ответа на этот вопрос обратили внимание на то обстоятельство, что математика издавна занималась разработкой так называемых алгоритмов. Под алгоритмом при этом понимается четкое предписание, вполне понятное и не допускающее никакого произвола для его исполнителя, определяющее вычислительный процесс. Человек, даже не знающий той области математики, для решения задач которой разработан алгоритм, но понимающий содержащиеся в нем указания и точно их выполняющий, получает искомое решение задачи. Можно сказать, что наличие алгоритма позволяет решать задачи механически.

Для алгоритма характерны следующие три черты.

1. Определенность алгоритма, состоящая в четкости образующих его указаний, их полной понятности для исполнителя и полной однозначности.

2. Массовость алгоритма, состоящая в его применимости не к одной единственной, а к некоторому множеству систем исходных данных. Это значит, что алгоритм должен позволять решать любую задачу из некоторого класса задач, а не какую-нибудь единственную конкретную, задачу.

3. Результативность алгоритма, заключающаяся в том, что алгоритм предназначен для получения по исходным данным определенного отвечающего им результата и для всякой допустимой системы исходных данных всегда приводит к такому результату.

При этом математика требует, чтобы алгоритм была потенциально осуществимым, т. е. чтобы для любой допустимой системы исходных данных он приводил к искомому результату после выполнения конечного (хотя бы и очень большого) числа «шагов» (операций).

В качестве примера алгоритма можно привести известный алгоритм Эвклида, разработанный для решения задач следующего вида. Даны два натуральных числа a и b (т. е. два положительных целых числа). Требуется найти их общий наибольший делитель.

Алгоритм Эвклида может быть сформулирован в виде предписания, состоящего из четырех указаний.

Указание I. Проверь, какое из соотношений справедливо для чисел a и b .

- а) $a=b$
- б) $a<b$
- в) $a>b$

Перейди к следующему указанию.

Указание II. Если $a \neq b$, то любое из этих чисел дает искомый ответ. Остановись. Если же $a=b$, то перейди к следующему указанию.

Указание III. Если $a<b$, то перемени роли этих чисел, т. е. считай впредь число a — числом b , а число b — числом a . Перейди к следующему указанию.

Указание IV. Отними от числа a число b . Считай впредь вычитаемое числом a , а разность — числом b . Перейди к первому указанию.

Например, если требуется найти общий наибольший делитель чисел 12 и 18, то считаем

$$a=12 \quad b=18$$

и приступаем к выполнению алгоритма.

Выполняя указание I, мы устанавливаем, что $a < b$. Указание II требует в этом случае перехода к указанию III. По указанию III меняем роли чисел 12 и 18 полагая:

$$a=18 \quad b=12.$$

На основании указания IV выполняем вычитание

$$a-b=18-12=6$$

и полагаем

$$a=12 \quad b=6.$$

Переходим к указанию I и констатируем, что $a > b$.

Указание II опять требует перехода к указанию III, а последнее — к указанию IV. Выполнение указания IV дает:

$$a-b=12-6=6$$

$$a=6 \quad b=6.$$

Переходя к указанию I устанавливаем, что $a = b = 6$. Переходим к указанию II и видим, что искомым ответ (общий наибольший делитель) равен 6. Это указание предписывает нам теперь остановиться, прекратить дальнейшее выполнение алгоритма.

Алгоритм Эвклида может выполнять человек, не знающий, что такое общий наибольший делитель, но понимающий смысл указаний, образующих алгоритм, и умеющий их выполнять.

Каждое указание алгоритма предписывает некоторое простое преобразование информации, которое может быть выполнено не только человеком, но и машиной. Понятно, что умственная работа человека, правила выполнения которой сформулированы в виде алгоритма, может быть возложена на кибернетическую машину. Требование математики, заключающееся в потенциальной осуществимости алгоритма, должно быть при этом заменено требованием реальной осуществимости алгоритма за допустимое время. Вопрос о реальной осуществимости алгоритма за допустимое время решается рассмотрением в совокупности алгоритма и кибернетической машины, предназначенной для его выполнения. Если найдена кибернетическая машина, осуществляющая алгоритм за допустимое время, то эту машину, а также выполняемый ею алгоритм, называют эффективными.

Те умственные действия человека, которые выполняются по строго установленным правилам, т. е. по определенному «алгоритму», могут быть переложены на кибернетические машины.

Таким образом возникла еще одна область кибернетики, изучающая вопросы построения решающих и управляющих алгоритмов. Эта область кибернетики имеет огромное практическое значение. Недостаток места не позволяет нам остановиться на ней подробнее.

Краткие выводы

Центральным понятием кибернетики является понятие информации. Благодаря тому, что было введено это понятие, появилась возможность единого подхода к изучению явлений и процессов, ранее изучавшихся в очень далеких одна от другой областях науки.

Кибернетика изучает системы, действие которых основано на обмене информацией между их частями. Определение Винера, гласящее, что кибернетика является наукой о связи, управлении и контроле, можно считать полным, если при этом связью называется передача информации, управлением — содержательное, в том числе и логическое, преобразование информации (сопровожаемое часто ее перекодировкой), а контроль представляет обратную связь между управляемым объектом и регулятором.

Кибернетика как наука еще не вполне сложилась. Однако уже достаточно четко наметились следующие ее разделы.

Теория информации, изучающая информацию с количественной стороны.

Теория кибернетических машин, т. е. машин, работа которых основана на выработке, передаче и преобразовании информации.

Теория построения эффективных решающих и управляющих алгоритмов.

Электронные программно–управляемые машины, описанию которых посвящена остальная часть этой книги, являются кибернетическими машинами. Они, во–первых, позволяют осуществлять логическое преобразование информации; во–вторых, включенные в состав самоуправляемых схем они могут быть использованы в качестве регуляторов.

В социалистических странах применение программно–управляемых машин приводит к дальнейшему росту производительных сил. Являясь собственностью общества, эти машины используются в целях дальнейшего повышения благосостояния трудящихся.

Глава II

ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ МАШИН

Основные типы машин

Электронные вычислительные машины представляют сложные автоматические устройства, построенные из электронных и радиотехнических схем и деталей и предназначенные для выполнения большого количества различных операций над числами. Кратко и более обще эти машины можно определить как электронные автоматы для переработки информации.

Известно, что человечество с древних времен изыскивало средства для облегчения как физического, так и умственного труда.

В отношении физического труда это выступает совершенно отчетливо и представляется непрерывным техническим прогрессом орудий труда, средств передвижения и различного рода двигателей, т. е. машин, приводящих в движение другие машины. Весьма обширная область науки и техники, занимающаяся созданием и изучением различного рода двигателей, замечательна тем, что в ней имеют дело с большими количествами энергии. Закономерности, определяющие процессы преобразования и использования энергии, составляют основное содержание большого комплекса наук и технических дисциплин, объединяемых общим названием энергетика. К энергетике относятся, например, такие науки, как электротехника, теплотехника, термодинамика, гидродинамика, теория механизмов и машин и др. В последние годы энергетика ознаменовалась использованием атомной энергии.

Научно–технический прогресс с древнейших времен включал в себя и второе направление: развитие средств для механизации умственных функций человека. Это второе направление, в отличие от первого, энергетического, можно назвать кибернетическим направлением; длительное время эта линия развития не имела явно выраженного характера из-за того, что устройства, выполняющие отдельные умственные функции человека были весьма примитивными и не играли существенной роли. Это — различные метки, зарубки, камешки, конторские счеты, кости и тому подобные способы для обозначения или счета предметов, либо приспособления для облегчения счета.

Длительное время функции управления работой различных машин выполнялись полностью человеком.

Начиная с XVIII столетия, в технику постепенно внедряются приспособления, имеющие целью облегчить работу человека по управлению машинами, т. е. в технику начинают проникать элементы автоматизации. Первоначально приспособления, выполняющие функции человека по управлению машинами, естественно, были весьма примитивными. Одним из примеров такого рода приспособлений является ранее упомянутый центробежный регулятор скорости работы паровой машины, изобретенный Уаттом. Подобные приспособления обычно были органически слиты с основными устройствами энергетической машины и не имели самостоятельного значения, так как основные функции управления выполнялись еще человеком.

Резкий скачок в развитии машин и устройств, предназначенных для управления другими машинами, и вообще в развитии машин, предназначенных для переработки информации, произошел в середине XX столетия. С одной стороны, сама техника энергетических машин поднялась на такой уровень, что человеку стало уже не под силу успешно выполнять функции управления машинами из-за больших скоростей работы, кратковременности и сложности процессов. Это обусловило потребность в специальных автоматических (т. е. работающих без участия человека) устройствах управления, так как дальнейшее развитие техники упиралось в несовершенство человека как управляющего элемента машины. С другой стороны, развитие физики, электроники, радиотехники, математики и других

областей науки подготовило необходимые технические средства (реле, электронные лампы, радиотехнические детали и др.) и научные принципы для создания высокоэффективных автоматов, предназначенных для переработки информации и управления машинами.

Кроме того, в связи с развитием науки и техники усложнением задач, решаемых учеными и инженерами, резко возросла потребность в проведении сложных и трудоемких вычислительных работ и возникла острая необходимость в создании специальных высокопроизводительных устройств для выполнения такого рода работ. Это привело сначала к появлению различных ручных вычислительных приборов и приспособлений, затем к созданию настольных арифмометров и счетно-клавишных машин, а также мощных счетно-аналитических машин и, наконец, в последние годы к появлению быстродействующих электронных вычислительных машин.

Таким образом электронные вычислительные машины как устройства, специально предназначенные только для переработки информации, имеют две основные области применения: переработка информации для человека и по заданию человека; переработка информации, автоматически поступающей из внешних источников (без участия человека), и выдача результатов (опять автоматически без участия человека) для управления другими машинами.

За машинами первой группы может быть сохранено название собственно вычислительных машин, так как они выдают результаты буквально в виде чисел, т. е. «вычисляют» результаты, а за машинами второй группы уже прочно укоренилось название управляющих машин.

Такое разделение машин на две группы, вообще говоря, не является строгим. Есть управляющие машины, которые, наряду с автоматическим управлением объектами, выдают результаты и в числовой форме для анализа их человеком, и есть вычислительные машины, которые исходные данные для расчетов получают автоматически путем непосредственной связи с внешними измерительными устройствами, а результаты выдают в числовой форме.

Электронные вычислительные машины делятся на два основных типа: машины непрерывного действия и машины дискретного действия или цифровые. Это деление обусловлено способом представления величин в машинах

Электронные вычислительные машины непрерывного действия

В машинах непрерывного действия участвующие в вычислениях величины представляются в виде непрерывных значений каких-либо физических параметров, например в электронных машинах в виде значений напряжения электрического тока, силы тока, фазы и т. п. В механических вычислительных устройствах непрерывного действия (такие устройства, называемые дифференциальными анализаторами, имели распространение раньше до появления электронных машин) участвующие величины представляются в виде углов поворота валов, длин перемещения определенных деталей. Очевидно, что точность работы машин непрерывного действия как электронных, так и механических и других типов не может быть высокой, поскольку точность измерения физических параметров, представляющих величины, ограничена и при повышении требований к точности измерения резко возрастает сложность и стоимость измерительных устройств.

В электронных машинах непрерывного действия отдельные операции над величинами выполняются при помощи специальных электрических схем, каждая из которых предназначена для выполнения только одной операции. Типовыми операциями являются: сложение, вычитание, умножение, деление, дифференцирование, интегрирование, получение тригонометрических, логарифмических и экспоненциальных зависимостей.

Электронная вычислительная машина непрерывного действия представляет собой набор различных функциональных блоков, выполняющих перечисленные выше операции.

Эти блоки при помощи специальной системы коммутации могут соединяться между собой в последовательности, соответствующей характеру решаемой задачи. В зависимости от типа и сложности задачи меняется количество блоков, участвующих в решении, и порядок соединения блоков между собой. Все величины в электронных машинах непрерывного действия представляются электрическими параметрами (как правило, напряжениями), поэтому передача данных от одних блоков к другим осуществляется при помощи электрических сигналов и не требует дополнительных преобразований.

Так как состав и количество блоков в каждой конкретной машине ограничены, то ясно, что любая электронная машина непрерывного действия может решать только ограниченный класс задач как по сложности, так и по типу (последнее определяется типами блоков, имеющихся в наличии). Другими словами, машины непрерывного действия являются машинами специализированными.

Существуют электронные вычислительные машины непрерывного действия, предназначенные для решения различных классов задач. Из них основными являются машины для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. Иногда машины этого класса называются электронными дифференциальными анализаторами, но чаще для них употребляется название «электронные модели» — в связи с возможностью моделировать на этих машинах различные физические процессы.

Электронные вычислительные машины непрерывного действия, используемые для целей моделирования, позволяют решать дифференциальные уравнения в так называемом реальном масштабе времени.

Поясним это важное свойство подробнее. Как известно, процесс решения дифференциального уравнения или системы дифференциальных уравнений сводится к тому, что бы найти зависимость между функцией и аргументом, описываемую заданным дифференциальным уравнением. Эта зависимость может быть получена в виде аналитического выражения, в виде таблицы или графика, наконец, в виде двух характеристик какого-либо реально протекающего физического процесса, одна из которых соответствует аргументу, а другая — функции.

Различные динамические процессы, т. е. процессы движения физических объектов (самолетов, снарядов, частиц вещества и т. д.) описываются уравнениями динамики, т. е. обыкновенными дифференциальными уравнениями, и исследование этих процессов сводится к решению соответствующих уравнений. Так как в уравнениях динамики в качестве независимого переменного или аргумента участвует текущее время, то при решении требуется выяснить, как изменяется та или иная физическая величина (скорость, ускорение, путь) в зависимости от времени.

В электронных вычислительных машинах непрерывного действия, используемых для решения дифференциальных уравнений, в качестве независимого переменного используется также текущее время, т. е. процесс решения сводится к получению зависимости изменения какой-либо величины изображаемой например напряжением, от времени. Это совпадение физической природы величины, изображающей независимую переменную, как в уравнениях динамики, так и на электронных моделях является не случайным, а обусловлено тем, что сам процесс решения задачи на модели представляет собой определенный динамический процесс, описываемый решаемыми уравнениями. Наукой давно уже установлено, что некоторые динамические процессы различной физической природы, такие, например, как движение твердого тела в пространстве и движение электрического тока в определенной схеме, могут описываться одними и теми же дифференциальными уравнениями. В этом заключается сущность аналогии процессов различной физической природы.

Так как некоторые различные физические процессы могут описываться одними и теми же дифференциальными уравнениями, то представляется возможным исследовать и изучать процессы одной природы, производя эксперименты с процессами другой природы.

Для воспроизведения в лабораторных условиях наиболее удобными являются электрические процессы, и поэтому именно электронные модели получили наибольшее распространение.

Следует заметить, что отмеченная аналогия в процессах различной физической природы проявляется, вообще говоря, не абсолютно точно. Одинаковые дифференциальные уравнения описывают различные процессы с большей или меньшей степенью приближения. При более тонком и тщательном изучении явлений всегда начинают выступать различия, связанные с действием второстепенных факторов. Поэтому метод моделирования, а в связи с этим и метод решения уравнений на электронных машинах непрерывного действия, принципиально не может быть точным методом.

Таким образом видно, что для того, чтобы решить на машине непрерывного действия то или иное уравнение или систему уравнений, необходимо из различных функциональных блоков, входящих в состав машины, образовать динамическую систему, в которой зависимости между отдельными параметрами описывались бы заданными уравнениями.

В работе таких систем основную роль играет принцип обратной связи. Об этом принципе мы упоминали в общем виде в предыдущей главе, посвященной общему обзору кибернетики; сейчас мы рассмотрим его применительно к работе электронных вычислительных машин непрерывного действия.

Пусть, например, требуется решить следующее дифференциальное уравнение 2-го порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + x \frac{dx}{dt} - x + \sin t = 0$$

Мы видим, что в данное уравнение входят в качестве независимого переменного величина t качестве

искомой функции x .

Приведем уравнение к виду:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + x \frac{dx}{dt} + \sin t = x$$

В уравнении выполняются следующие действия: дифференцирование ($\frac{dx}{dt}$ и $\frac{d^2 x}{dt^2}$), получение синуса ($\sin t$), умножение и сложение. Для решения заданного уравнения нам потребуется два дифференцирующих блока, один блок для образования функции синуса, один множительный блок и два суммирующих блока. Схематически обозначим эти блоки в виде прямоугольников, к которым подходят несколько стрелок, обозначающих величины, участвующие в операции, и выходит стрелка, обозначающая результат операции (рис. 3).

Соединив указанные блоки в последовательности, соответствующей порядку выполнения действия в уравнении, получим функциональную схему машины, которая будет решать данную задачу. Перед решением задачи эта функциональная схема коммутируется из блоков, входящих в комплект электронной вычислительной машины непрерывного действия. Эта схема показана на рис. 4.

На приведенной схеме верхняя горизонтальная линия условно обозначает источник напряжения, представляющего в определенном масштабе независимое переменное. Как показывает само название, независимое переменное должно изменяться независимо от других величин равномерно во времени. В электронных моделях, решающих задачи в реальном масштабе времени, таким независимым переменным является текущее время, которое равномерно растет, начиная с момента включения прибора.

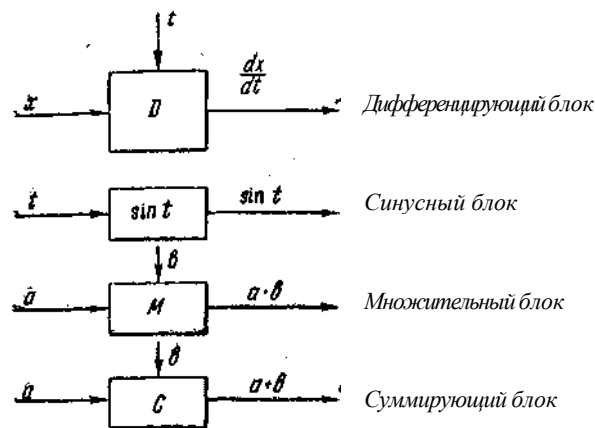


Рис. 3. Обозначения основных блоков вычислительной машины непрерывного действия, применяемые при составлении схемы настройки

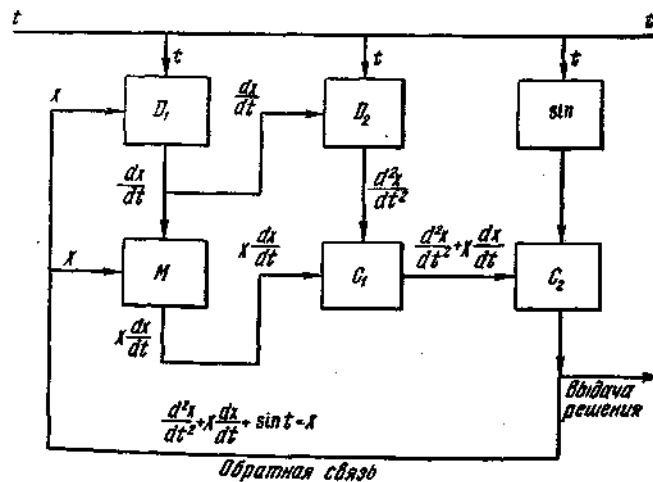


Рис. 4. Схема настройки электронной вычислительной машины непрерывного действия для решения дифференциального уравнения

Значения независимого переменного на нашей схеме поступают сразу в три блока: в дифференцирующие блоки D_1 и D_2 и в функциональный блок для получения синуса.

В дифференцирующие блоки поступают также функции, которые должны быть продифференцированы: в блок D_1 — величина x и в блок D_2 — величина $\frac{dx}{dt}$

Полученная величина первой производной $\frac{dx}{dt}$ с блока D_1 поступает в множительный блок M , где производится умножение $\frac{dx}{dt}$ на x , и произведение поступает в суммирующий блок C_1 . На второй вход суммирующего блока C_1 поступает вторая производная $\frac{d^2x}{dt^2}$. Сумма $\frac{d^2x}{dt^2} + x \frac{dx}{dt}$ с блока C_1 поступает на один вход второго суммирующего блока C_2 . На второй вход C_2 поступает с синусного блока функция $\sin t$, и на выходе блока получается сумма

$$\frac{d^2x}{dt^2} + x \frac{dx}{dt} + \sin t ,$$

равная величине x (согласно заданному уравнению). Эта величина в виде обратной связи подается на входы блоков D_1 и M , где она используется в качестве исходной величины для выполнения операций.

Наша простейшая структурная схема машины непрерывного действия показывает достаточно наглядно особенности процесса решения задач на машинах этого типа.

Обратим внимание на наличие обратной связи, подающей значение величины x на один из входов дифференцирующего блока D_1 и множительного блока M . Благодаря наличию этой связи машина, составленная по данной схеме, будет представлять собой замкнутую систему, движение которой описывается заданным уравнением.

После того как машина включена и независимое переменное начнет изменяться, равномерно увеличиваясь от начального значения, вся система придет в движение, и кривая изменения напряжения на выходе суммирующего блока C_2 даст нам решение заданного уравнения.

Из схемы между прочим видно, что определение положения обратной связи в подобной замкнутой системе является условным; обратной связью можно было бы с таким же успехом назвать любую связь между отдельными блоками системы.

Основным физическим параметром, при помощи которого представляются величины в электронных машинах непрерывного действия, является напряжение электрического тока. Различные величины задачи представляются напряжениями в заданных заранее масштабах. Заранее также определяются и пределы изменения отдельных величин в задаче и соответственно пределы изменения напряжений.

Достоинством электронных машин непрерывного действия является сравнительная простота конструкции, простота подготовки задач для решения на машинах и высокая скорость решений. Эти машины находят широкое применение в различных научно-исследовательских учреждениях, конструкторских бюро, на заводах для быстрых прикидочных инженерных расчетов, не требующих высокой точности.

Весьма важной областью применения электронных машин непрерывного действия является использование их в качестве электро моделирующих установок для испытаний и регулировки различных систем автоматического управления в лабораторных условиях. Это достигается путем сопряжения аппаратуры этих систем с электро моделирующей установкой.

На рис. 5 показана схема такого сопряжения электронной модели с реальной аппаратурой автоматического управления самолета — автопилотом.

Обычно исследование динамических систем путем решения дифференциальных уравнений, описывающих их движение, производится на начальном этапе разработки этих систем. После того, как аппаратура автоматического управления спроектирована и построена, возникает необходимость проверить и отрегулировать ее в рабочих условиях. Раньше, до применения электро моделирующих установок, это делалось путем натуральных испытаний всего объекта в комплексе (самолета с автопилотом, управляемой ракеты, турбины и т. д.).

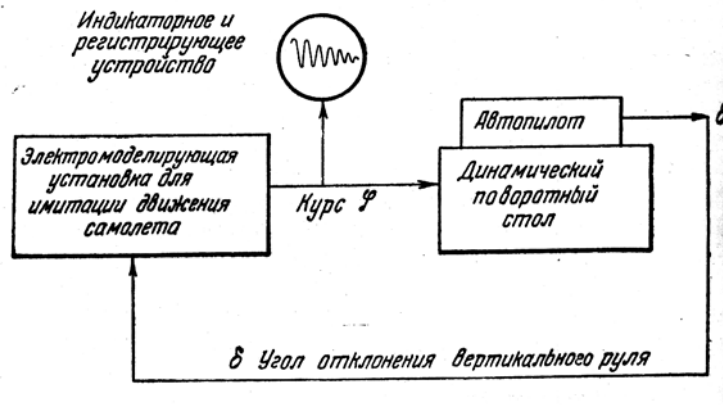


Рис. 5. Схема сопряжения автопилота с электронной моделью

Естественно, что путь натуральных испытаний является весьма дорогим и не дает возможности всесторонне изучить испытываемую аппаратуру. Это связано с кратковременностью испытаний, невозможностью создать всегда желаемые условия опытов (например, для самолетов или ракет), ограниченностью серий испытаний, необходимостью иметь сложную телеметрическую и регистрирующую аппаратуру. Эти трудности существенно удорожают и удлиняют сроки создания систем автоматического управления сложных объектов. Применение электро моделирующих установок позволяет произвести испытание и отработку аппаратуры автоматического управления в лабораторных условиях при значительной экономии материальных средств и времени.

В процессе лабораторного испытания электро моделирующая установка решает дифференциальные уравнения движения самолета. Допустим для простоты, что мы исследуем простейший случай, когда самолет движется прямолинейно, равномерно, в горизонтальной плоскости. Дифференциальное уравнение, которое должно решаться электро моделирующей установкой, будет описывать колебания самолета по курсу, т. е. будет давать зависимость угла курса самолета φ от действующих на самолет моментов относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести самолета.

С выхода электро модели на серводвигатель поворотного стола поступает значение курсового угла, которое непрерывно обрабатывается серводвигателем поворотного стола, так что поворотный стол все время поворачивается на угол, равный курсовому углу φ . Автопилот, закрепленный на поворотном столе, фиксирует при помощи своих чувствительных элементов (например, гироскопов) возникающие при этом угловые ускорения так же, как если бы он находился на летающем самолете. Назначение автопилота состоит в том, чтобы автоматически управлять движением самолета. Автопилот в зависимости от курсового угла φ и некоторых других величин, характеризующих движение самолета (например, производных от курсового угла), вырабатывает значение углов поворота вертикальных рулей δ . Угол δ снимается в виде напряжения с автопилота и вводится в наш случай в электро модель (а в реальном полете подается на рулевую машину самолета). Электро модель решает уравнение с новым значением угла поворота руля δ , вырабатывает новое значение курсового угла φ , которое поступает на поворотный стол и в конечном счете воспринимается автопилотом. Автопилот вырабатывает новое значение угла поворота руля и т. д. Таким образом электро модель и автопилот образуют замкнутую систему автоматического регулирования, моделирующую процесс колебаний самолета по курсу. Автопилот при этом работает в реальных условиях, что позволяет произвести его действительную проверку и регулировку.

Из описания принципа действия электро моделирующей установки, включающей в себя реальную аппаратуру какого-либо регулятора, видно, что необходимыми свойствами, которыми должна обладать вычислительная машина, входящая в эту установку, являются непрерывность решения и получение результатов в реальном масштабе времени.

В зависимости от сложности системы дифференциальных уравнений, описывающих движение моделируемого объекта (самолета, ракеты, турбины, часового механизма и др.), применяются различные типы электро моделирующих установок: линейные и нелинейные модели, с постоянными и переменными коэффициентами.

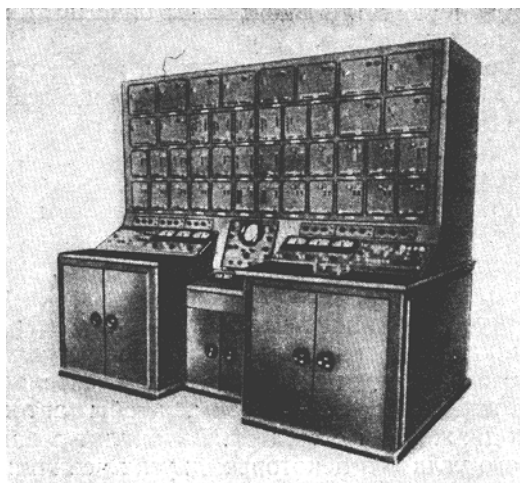


Рис. 6. Электронная вычислительная машина непрерывного действия МН-2.

На рис. 6 приведена фотография советской электронной модели МН-2, обеспечивающей возможность решения нелинейных дифференциальных уравнений до 6-го порядка включительно.

Электронные цифровые программно-управляемые машины. Представление чисел в машинах

Электронные цифровые вычислительные машины (ЭЦВМ) представляют собой весьма сложные автоматические агрегаты, состоящие из большого количества электронных и электрических схем и деталей.

ЭЦВМ служат для выполнения большого количества арифметических, логических и других операций над числами по определенной, заранее составленной программе

К числу арифметических операций относят обычно четыре действия арифметики: сложение, вычитание, умножение, деление. Примерами логических операций могут быть: сравнение двух чисел и выбор большего или меньшего числа; определение знака числа; определение значения какой-либо части числа (например, старшего разряда, целой части и т. д.).

Числа в ЭЦВМ представляются последовательностью своих цифр в какой-либо позиционной системе счисления. Примером позиционной системы является общепринятая десятичная система счисления, в которой каждая единица старшего разряда равна десяти единицам ближайшего младшего разряда. Название «позиционная система» происходит от того, что в этих системах значение каждой цифры числа определяется не только изображением этой цифры, но и тем местом — позицией, которое она занимает в общем изображении числа.

Помимо десятичной системы, существуют и применяются различные другие позиционные системы: двоичная, троичная и т. д. Название системы счисления, как нетрудно видеть, происходит от того числа, которое принято за основание системы счисления. В десятичной системе основанием является число десять. Основание определяет соотношение между единицами соседних разрядов, а также количество различных между собой цифр, применяемых для изображения чисел в соответствующей системе счисления. В десятичной системе используется десять цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Наибольшее распространение в ЭЦВМ получила двоичная система счисления. Основанием этой системы является число два, и в ней применяются только две различные цифры 0 и 1. Единица каждого старшего разряда в этой системе вдвое больше единицы ближайшего младшего.

Приведем несколько примеров изображения чисел в двоичной системе.

Десятичная система	Двоичная система	Десятичная система	Двоичная система
0	0	6	110
1	1	7	111
2	10	8	100
3	11	9	1001
4	100	10	1010
5	101		

Например, число 37 будет иметь в двоичной системе вид 100101. В этом нетрудно убедиться, если представить это число в виде суммы степеней основания с соответствующими коэффициентами, подобно тому, как мы это делаем в десятичной системе. В десятичной системе $37 = 3 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0$. Напомним, что всякое число в нулевой степени равно единице. В двоичной системе это разложение по степеням основания будет иметь вид:

$$100101 = 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 32 + 4 + 1 = 37.$$

Двоичная система обладает рядом существенных преимуществ перед десятичной и другими системами счисления с точки зрения применения в электронных цифровых машинах. В двоичной системе используется минимально возможное количество различных цифр (всего две: 0 и 1), и поэтому физическое представление каждого разряда двоичного числа осуществляется наиболее просто: для этой цели может быть использован любой прибор, обладающий двумя различными устойчивыми состояниями. Можно условиться при этом, что одно состояние будет соответствовать представлению нуля, а другое — единицы. Создание приборов, обладающих только двумя различными устойчивыми состояниями, так называемых двухпозиционных приборов, работающих по принципу «да» или «нет», значительно проще, чем многопозиционных приборов. Кроме того, двухпозиционные приборы работают более надежно.

Электронные лампы, широко применяемые в ЭЦВМ, наиболее надежно и устойчиво работают в режиме «да» или «нет», когда одно состояние лампы является состоянием полной проводимости (ток насыщения), а второе — состоянием полной непроводимости (лампа заперта). При этом возможные отклонения в параметрах ламп меньше сказываются на характере изменения сигналов.

Вторым преимуществом двоичной системы является простота арифметических действий.

Правила сложения одноразрядных двоичных чисел сводятся к следующему:

$$0+0=0; \quad 0+1=1; \quad 1+0=1; \quad 1+1=10$$

Правила умножения также чрезвычайно просты и иллюстрируются следующей двоичной таблицей умножения:

$$\begin{array}{ll} 0 \times 0 = 0 & 1 \times 0 = 0 \\ 0 \times 1 = 0 & 1 \times 1 = 1 \end{array}$$

Действия с многоразрядными, или, как принято говорить с многозначными двоичными числами, выполняются так же, как и с многозначными десятичными числами, и состоят из ряда элементарных действий над отдельными разрядами с аналогичными правилами переноса в старший разряд или занятия единицы из старшего разряда (при вычитании).

Рассмотрим несколько примеров выполнения арифметических действий в двоичной системе:

$$\begin{array}{r} + 10101 \\ \quad 10010 \\ \hline 100111 \end{array} \qquad \begin{array}{r} +21 \\ \quad 18 \\ \hline 39 \end{array} \qquad \begin{array}{r} -1001001 \\ \quad 0110010 \\ \hline 0010111 \end{array} \qquad \begin{array}{r} -73 \\ \quad 50 \\ \hline 23 \end{array}$$

Операция умножения многозначных двоичных чисел сводится к умножению множимого на каждый разряд множителя и сложению полученных частичных произведений. Так как в любом разряде множителя может быть либо нуль, либо единица, то в процессе умножения множимое либо переписывается на соответствующее разрядное место (когда в данном разряде множителя стоит единица), либо на соответствующих разрядных местах ставятся нули и производится переход к следующему разряду множителя:

$$\begin{array}{r} \times 10101 \\ \quad 01011 \\ \quad 10101 \\ \quad 10101 \\ \quad 10101 \\ \hline 1110011 \end{array} \qquad \begin{array}{r} \times 21 \\ \quad 11 \\ \quad 21 \\ \hline 231 \end{array}$$

Деление двоичных чисел производится по тем же правилам, что и в десятичной системе счисления.

$$\begin{array}{r}
 111100 \overline{)101} \\
 \underline{101} \quad 1100 \\
 0101 \\
 \underline{101} \\
 000
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 60 \overline{)5} \\
 \underline{5} \\
 10 \\
 \underline{10} \\
 00
 \end{array}$$

В электронных цифровых машинах применяются указанные правила арифметических действий, однако для удобства фактической реализации их в машинах используются некоторые специфические приемы выполнения этих действий. Это относится, в частности, к операции вычитания и деления. На этих приемах мы останавливаться не будем, так как они не имеют принципиального значения.

Заметим, что знаки чисел в машинах представляются при помощи нулей и единиц, причем нуль обычно соответствует положительному знаку, а единица — отрицательному.

Наряду с очевидными преимуществами, рассмотренными выше, двоичная система имеет и некоторые недостатки по сравнению с десятичной системой. К числу недостатков в первую очередь следует отнести то, что она не является общепринятой, и поэтому возникает необходимость перевода исходных данных задачи из десятичной в двоичную систему и необходимость обратного перевода результатов решения задачи из двоичной в десятичную систему. Этот недостаток особенно сильно проявляется в случае применения машин не для научных или инженерных расчетов, а для различных экономических и плановых, так как для плановых расчетов характерно большое количество исходных данных и результатов решения.

Перевод чисел из одной системы счисления в другую осуществляется обычно при помощи самих машин и выполняется весьма быстро, но на это приходится все же затрачивать определенное количество машинного времени.

В связи с этим в некоторых машинах используют так называемую двоично–десятичную систему счисления. В этой системе числа представляются по существу в десятичной системе, но каждая десятичная цифра изображается четверкой двоичных цифр. Поэтому переход к собственно десятичной системе в «чистом виде» осуществляется весьма просто: достаточно произвести поразрядный перевод числа.

Вторым недостатком двоичной системы является ее малая «емкость», состоящая в том, что сравнительно небольшие целые числа требуют для своих представлений большого количества разрядов.

Упомянем еще восьмеричную систему счисления, применяемую в ЭЦВМ в качестве вспомогательной системы при подготовке задач к решению на машинах. В этой системе основанием является число восемь и используется восемь различных цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Достоинством ее является то, что она по «емкости» (по количеству разрядов при изображении целых чисел) близка к десятичной и позволяет весьма просто переходить к двоичной системе (поразрядный перевод восьмеричных цифр в двоичные числа дает сразу перевод всего восьмеричного числа в двоичное число).

С конструктивной (технической) стороны двоичные числа в электронных машинах представляются комбинациями электрических сигналов. В простейшем случае определенный провод — канал — представляет один какой–либо разряд двоичного числа. Наличие высокого уровня напряжения на этом проводе обозначает, например, единицу в данном разряде, а наличие низкого уровня напряжения обозначает нуль. Для представления и передачи n –разрядного числа используются соответственно n проводов. Этот способ называется способом параллельного представления чисел; при этом все разряды числа представляются и передаются одновременно.

Существует и другой способ представления и передачи чисел, применяемый в так называемых машинах последовательного действия. В этих машинах для передачи всего числа используется один провод и число передается по этому проводу последовательно разряд за разрядом в виде отдельных электрических импульсов. Ясно, что параллельный способ передачи чисел быстрее, чем последовательный, однако он требует больше аппаратуры, в частности больше параллельных каналов для передачи разрядов.

Принцип действия электронных программно-управляемых машин

Ознакомившись со способом представления чисел в электронных цифровых машинах, перейдем теперь к рассмотрению принципа действия этих машин.

Электронные цифровые машины выполняют арифметические и логические операции над числами. К арифметическим операциям относятся сложение, вычитание, умножение и деление. Логическими операциями называют обычно операции, выполняемые с целью проверки наличия или отсутствия каких-либо признаков у чисел. Например, проверка равенства числа нулю, проверка знака числа, сравнение данного числа с другим, проверка равенства нулю некоторых разрядов числа и т. д. Подобные логические операции человек — вычислитель выполняет в уме, оценивая получающиеся промежуточные результаты для определения хода дальнейших вычислений.

Арифметические и логические операции над числами в электронных цифровых машинах выполняются чрезвычайно быстро — в миллионные доли секунды. Однако для достижения общей высокой скорости решения задач недостаточно, чтобы каждая отдельная операция выполнялась очень быстро. Необходимо еще, чтобы эти операции выполнялись автоматически в нужной последовательности и в большом количестве без вмешательства человека. Это обеспечивается в машинах применением программного управления, сущность которого сводится к тому, что электронная цифровая вычислительная машина в принципе воспроизводит тот же порядок решения задач, который выполняется и человеком — вычислителем, решающим задачу с помощью настольной ручной вычислительной машины.

На рис. 7 показана схема ручного вычислительного процесса. В этом процессе участвуют следующие элементы.

1. Исходная информация, включающая начальные данные задачи и необходимые справочные материалы таблицы, графики и т. д.

2. Правила решения задачи, расписанные в виде расчетного бланка. Этот бланк вместе с некоторыми устными указаниями о порядке заполнения граф бланка, даваемыми ми вычислителю перед решением задачи, представляют собой программу вычислений.

3. Ручной счетный прибор, предназначенный для выполнения отдельных арифметических действий.

Вычислитель устанавливает на счетном приборе вручную два исходных числа, нажимает клавишу, указывающую какое действие нужно выполнить (например, сложение), включает прибор для выполнения действия и затем записывает в расчетный бланк результат операции. Выполнив одно действие, вычислитель переходит к выполнению следующего. Таким образом, весь процесс решения задачи расчленяется на отдельные операции, выполняемые вычислителем в определенной заранее заданной последовательности.

Из изложенного видно, что с точки зрения принципа действия в вычислительном процессе участвуют три основных элемента:

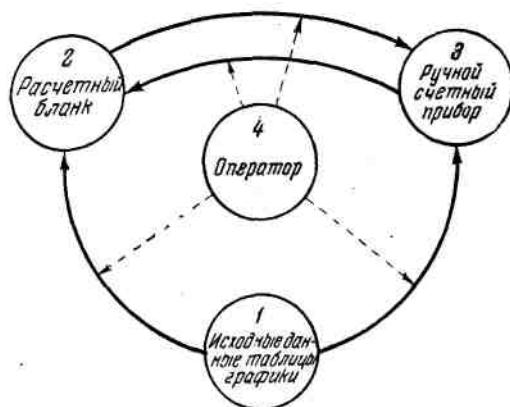


Рис. 7. Схема вычислительного процесса, осуществляемого вычислителем «вручную».

Сплошными линиями показаны направления переноса чисел, пунктирными — управляющие воздействия оператора

запоминание и хранение информации (как исходных, так и промежуточных данных и программы вычислений), для этой цели служат расчетный бланк, таблицы, графики и т. д;

выполнение отдельных операций над числами, это осуществляется при помощи счетного прибора;

управление последовательностью операций, а также работой счетного прибора в процессе каждой

операции, эти функции выполняются человеком — вычислителем.

На рис. 8 показана упрощенная блок-схема электронной цифровой вычислительной машины. Как видно из рисунка, вычислительная машина содержит аналогичные по назначению части.

1. Запоминающее устройство, предназначенное для приема, хранения и выдачи исходной информации, промежуточных величин, результатов решения. В запоминающем устройстве хранится также в специальном кодированном виде и программа решения задачи, определяющая порядок работы машины (об этом подробно будет сказано в дальнейшем). Запоминающее устройство в ЭЦВМ с

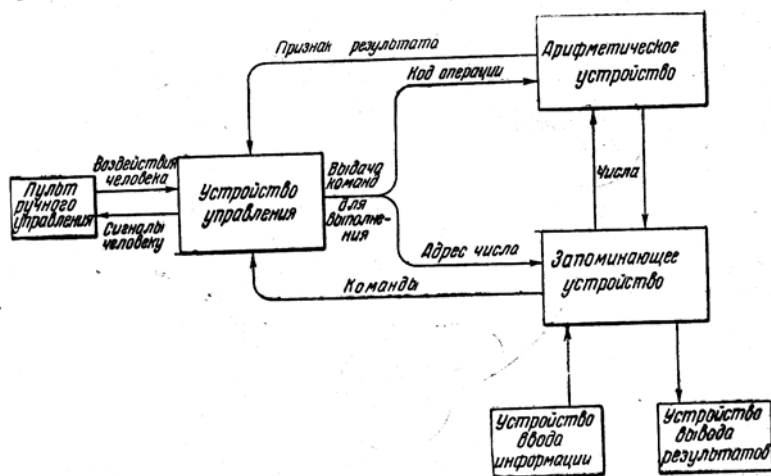


Рис. 8. Упрощенная блок-схема электронной цифровой программно-управляемой машины

функциональной точки зрения состоит из отдельных ячеек, в каждую из которых может быть помещено одно число. При проектировании машины, исходя из ее назначения, выбирают, какими числами (по количеству разрядов) она должна оперировать, и соответственно предусматривают размер ячеек в запоминающем устройстве, т. е. количество разрядов в ячейке.

Например, машины, предназначенные для научных расчетов, должны иметь высокую точность вычислений и поэтому в них ячейки имеют большое количество разрядов (обычно по 30—40 двоичных разрядов, что приблизительно соответствует 8—11-значным десятичным числам). Обычно в машине все ячейки запоминающего устройства имеют одинаковый размер — одинаковое количество разрядов. Все ячейки запоминающего устройства машины перенумерованы подряд, и каждой ячейки присвоен постоянный номер.

2. Арифметическое устройство, предназначенное для выполнения вычислений. Арифметическое устройство в любой электронной цифровой вычислительной машине может выполнять ограниченное количество основных операций над числами. Состав этих операций выбирается при проектировании машины на основе анализа типовых вычислительных процессов, для выполнения которых создается машина. Обычно к числу основных операций относятся указанные нами раньше операции: четыре действия арифметики и ряд логических операций.

3. Устройство управления, предназначенное для управления вычислительным процессом. Каждую операцию машина выполняет по определенной команде. Команда — это комбинация управляющих сигналов, заставляющая машину выполнять определенную операцию. Последовательность команд составляет программу работы машины. Программа решения задачи составляется человеком — программистом — заранее и записывается на специальном бланке в условном числовом коде. Каждая команда после записи на бланк представляет собой по внешнему виду некоторое число, а вся программа — последовательность чисел.

Программа работы машины, представленная в виде последовательности чисел, вводится в запоминающее устройство машины таким же образом, как и обычные числа, и хранится в запоминающем устройстве машины.

В процессе решения задачи команды программы поочередно выбираются из запоминающего устройства устройством управления. Каждая выбранная команда соответствующим образом расшифровывается устройством управления и выдается для выполнения в различные части машины.

Каково же содержание и строение отдельной команды? Существует много различных способов построения команд, но все они в своей основе имеют единую структуру: каждая команда содержит две основные части — операционную и адресную. Операционная часть команды показывает, какую

операцию должна выполнить машина по команде, адресная часть — откуда следует взять числа, над которыми должна быть выполнена указанная операция, и куда нужно записать результат операции.

Все основные арифметические и логические операции выполняемые машиной, перенумерованы, и каждая операция имеет свой постоянный номер, называемый кодом операции. Этот номер операции и указывается в операционной части команды при ее написании. Кроме того, в операционную часть команды могут входить отдельные двоичные разряды для записи специальных сигналов, изменяющих характер выполнения данной операции, например, вызывающих остановку машины после выполнения данной команды.

Таким образом, при написании команды указывают: в операционной части — код операции, а в адресной части — номера ячеек, содержащих исходные для операции числа, и номер ячейки, куда нужно записать результат операции. Например, может быть составлена команда следующего вида:

01 0026 0072 0136

Число 01 в левой клетке обозначает код операции (обычно операция сложения имеет код 01). Числа 0026 и 0072 обозначают, что нужно взять первое слагаемое из ячейки с номером 0026, а второе слагаемое из ячейки с номером 0072. Число 0136, записанное в четвертой клетке команды, обозначает, что результат нужно записать в ячейку с номером 0136.

Это пример так называемой трехадресной команды, в которой указываются сразу три адреса: адреса двух исходных чисел и адрес результата операции. Существуют также машины с одно-, двух-, четырех- и пятиадресными командами. Соответствующим машинам присваивают названия одно-, двух- и т. д. адресных машин.

В одноадресных машинах полная арифметическая операция выполняется, как правило, не по одной команде, как случае трехадресных, а при помощи нескольких команд. Например, одна команда вызывает одно число, вторая команда вызывает второе число и выполняет операцию третья команда отсылает результат по заданному адресу. Устройство управления машины обеспечивает последовательное выполнение команд программы и управляет работой машины в процессе выполнения каждой команды — в течение такта работы машины.

Рассмотрим порядок выполнения отдельной команды в трехадресной машине. Очередной такт работы машины начинается с выборки устройством управления из запоминающего устройства следующей по очереди команды. Для этого устройство управления имеет в своем составе специальный счетчик команд, который ведет постоянный счет количества выполненных команд, точнее, ведет постоянную регистрацию (запоминание) номеров выполненных команд. (Под номерами команд понимают номера ячеек запоминающего устройства, в которых хранятся эти команды).

Таким образом, счетчик команд всегда указывает номер ячейки запоминающего устройства, откуда должна быть выбрана следующая команда. После выборки очередной команды, эта команда поступает в устройство управления машины, которое ее расшифровывает и выдает для исполнения в соответствующие устройства машины. Код операции направляется в виде комбинации двоичных сигналов по определенным проводам в арифметическое устройство и настраивает это устройство на выполнение требуемой операции. Из адресной части команды поочередно выделяются первый, второй и третий адреса и направляются в специальный блок местного управления запоминающего устройства, который расшифровывает значение адреса и подключает соответствующую ячейку к выходу запоминающего устройства для выдачи содержимого этой ячейки.

Сначала из команды выделяется первый адрес и из запоминающего устройства выдается число, хранящееся в ячейке, соответствующей первому адресу; это число поступает в арифметическое устройство. Затем в блок местного управления запоминающего устройства направляется второй адрес команды, и запоминающее устройство выдает число, которое хранилось в ячейке с номером, равным второму адресу команды. Второе число также поступает в арифметическое устройство.

Получив оба числа, арифметическое устройство выполняет заданную операцию и выдает результат в запоминающее устройство, которое к этому моменту подготовилось к приему числа в ячейку, имеющую номер, равный третьему адресу команды. Записью результата операции в соответствующую ячейку запоминающего устройства заканчивается выполнение данной команды, и устройство управления переходит к выполнению следующей команды программы. В счетчике команд автоматически прибавляется единица и производится выборка следующей команды из ячейки запоминающего устройства, имеющей номер на единицу больше, чем предыдущая команда.

Таким образом, выполняются команды арифметических и логических операций. В каждой из них, как правило, участвуют два исходных числа и получается одно число, являющееся результатом операции.

Помимо этого, существуют так называемые команды управления и вспомогательные команды. Эти команды служат для пуска или остановки машины, переписи чисел из одного места запоминающего устройства в другое, для приема исходных данных и выдачи результатов операции, а также для изменения порядка выполнения команд программы. Последнее является чрезвычайно важным с точки зрения принципа работы электронных цифровых вычислительных машин. Команды, служащие для изменения порядка выполнения команд программы, носят название команд условного и безусловного перехода. Команда безусловного перехода, будучи поставлена в определенном месте программы, показывает, к какой команде программы перейти после выполнения данной команды. Обычно команды программы выполняются подряд до тех пор, пока не встретится команда условного перехода или команда безусловного перехода. Команда условного перехода осуществляет переход к той или иной команде программы в зависимости от выполнения некоторого условия. Если рассматривать трехадресную команду условного перехода, то она может, например, меть следующее строение и назначение.

В двух первых адресах указывают номера ячеек запоминающего устройства, где хранятся два некоторых числа, которые должны сравниваться между собой. По команде условного перехода производится выборка обоих чисел и сравнение их между собой. Если первое число больше второго, то происходит переход к команде, номер которой указан в третьем адресе команды условного перехода. Если же второе число больше первого, или равно ему, то после команды условного перехода выполняется следующая по порядку команда. Такое строение команды условного перехода имеет машина «БЭСМ».

Команда безусловного перехода указывает номер следующей команды, к которой должен быть совершен переход после выполнения данной команды¹ независимо от каких-либо условий.

Команда условного перехода в машине «Стрела» также является трехадресной, но имеет несколько иное строение. В первых двух адресах указываются номера ячеек памяти, хранящих две команды программы, к которым может быть совершен переход после команды условного перехода; третий адрес не используется. Выбор той или иной команды из указанных двух команд осуществляется в зависимости от результата операции, выполнявшейся непосредственно перед командой условного перехода.

Большинство команд арифметических и логических операций в машине «Стрела» построено таким образом, что, помимо результата операции, эти команды выдают и дополнительный признак, называемый сигналом ω (омега), характеризующий некоторые альтернативные свойства числа, являющегося результатом выполнения данной команды. Под альтернативными свойствами мы понимаем такие свойства, которые могут либо быть, либо не быть, т. е., условно говоря, признак ω может быть равен либо 0, либо 1. Например, в машине «Стрела» операция сложения выполняется так, что, если результат сложения отрицателен, то признак ω равен 1, а если положителен (или нуль), то ω равен 0.

При умножении, например, признак ω равен 1, если абсолютная величина произведения больше или равна единице, и ω равен нулю, если произведение по абсолютной величине меньше единицы. Конструкцией машины могут быть предусмотрены подобные и другие правила образования признака ω при выполнении различных команд как арифметических, так и логических операций. Важно, что при выполнении этих команд, помимо собственно результатов операций, арифметическим устройством вырабатывается еще и дополнительный сигнал ω , характеризующий выполнение или невыполнение определенного условия в результате операции. Этот сигнал ω передается из арифметического устройства в устройство Управления, которое использует его при выполнении команды условного перехода для определения номера следующей команды, подлежащей выполнению. При этом команда условного перехода работает по правилу: если предыдущая команда дала признак ω , равный единице, то следующей выполняется команда, номер которой указан во втором адресе команды условного перехода; если предыдущая команда выработала признак ω , равный нулю, то следующей выполняется команда программы, номер которой указан в первом адресе команды условного перехода.

Таким образом команда условного перехода в обеих описанных модификациях («БЭСМ» и «Стрела») позволяет произвести выбор того или иного направления в продолжении вычислений в зависимости от некоторого условия. Это весьма важное свойство современных электронных программно-управляемых машин, обеспечивающее полную автоматизацию их работы. Как известно, в процессе сложных вычислений часто приходится решать вопрос, как вести вычисления дальше, после того как получили те или иные промежуточные результаты. Выбор этих направлений можно возложить на машину благодаря наличию команды условного перехода, если соответствующим образом запрограммировать получение результатов с определенными признаками и поставить после этого команды условного перехода.

Помимо выбора одного из нескольких возможных направлений хода вычислений, команда условного перехода (а также команда безусловного перехода) применяется и для того, чтобы обеспечить значительное сокращение количества команд в программе по сравнению с действительным числом операций, выполняемых

при решении задачи. Для этого при помощи условного перехода (или безусловного перехода) производят многократное повторение одного и того же участка программы для выполнения одной и той же последовательности операций над различными исходными числами. При этом в программе получаются так называемые циклы. Подробнее о методике применения команд условного и безусловного переходов, построении циклов и других вопросах программирования мы расскажем в специальной главе.

Отметим, что благодаря наличию команд условного перехода электронные программно-управляемые машины представляют собой саморегулируемые системы переработки информации с замкнутой цепью воздействий, т. е. могут рассматриваться как своеобразные системы автоматического регулирования с обратной связью. Прямая связь — управляющая — существует между устройством управления, с одной стороны, и арифметическим устройством, с другой стороны: устройство управления выдает команды, которые выполняются арифметическим устройством. Обратная связь — информационная — существует между арифметическим устройством и устройством управления: арифметическое устройство выдает сигналы о наличии тех или иных признаков у результатов операций (признак результата), обуславливающие выбор той или иной команды для дальнейшего выполнения. Эта обратная связь показана на рис. 8 стрелкой, идущей от арифметического устройства к устройству управления. Таким образом, электронные цифровые программно-управляемые машины представляют собой наиболее характерный тип кибернетических машин. Они, во-первых, оперируют только с информацией в двоичном или другом цифровом коде, во-вторых, обладают памятью и, в-третьих, работают по принципу обратной связи, автоматически осуществляя управление процессом переработки информации.

Технические принципы построения электронных цифровых машин

Перейдем к рассмотрению основных конструктивных (технических) принципов построения электронных цифровых машин. В машинах двоичные цифры, нуль или единица, представляются высоким или низким уровнем напряжения электрического тока на определенном проводе. Для того, чтобы зафиксировать и сохранить во времени то или иное значение напряжения, необходимы фиксирующие элементы. Основным фиксирующим элементом в электронных цифровых машинах является триггер. Схема триггера показана на рис. 9. Триггер состоит из двух электронных ламп (триодов), у которых катоды соединены вместе и через сопротивление R_3 подключены к земле. Аноды и сетки обеих ламп соединены крест-накрест между собой, как показано на рис. 9: анод первой лампы — с сеткой второй лампы, а анод второй лампы — с сеткой первой.

Триггер может находиться в одном из двух фиксированных устойчивых состояний. Одно состояние соответствует тому, что одна лампа (например, левая) полностью заперта (не проводит ток), а вторая лампа полностью открыта (через нее идет максимальный ток). Второе состояние соответствует обратному положению: левая лампа открыта, а правая заперта.

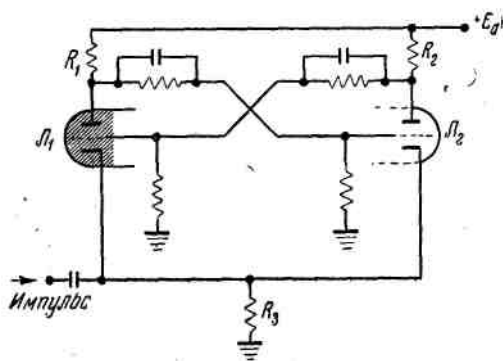


Рис. 9. Принципиальная схема триггера

Действительно, допустим, что в некоторый момент обе лампы открыты, т. е. проводят одинаковый ток. Под влиянием случайных причин в одной из ламп может произойти изменение тока, например, пусть в левой лампе ток несколько возрастет. При этом увеличится падение напряжения на сопротивлении R_1 и уменьшится потенциал сетки лампы L_2 . В связи с понижением напряжения на сетке L_2 уменьшится ток через эту лампу и уменьшится падение напряжения на сопротивлении R_2 . Следовательно возрастет напряжение на аноде лампы L_2 и на сетке лампы L_1 . Повышение напряжения на сетке L_1 вызовет увеличение тока через эту лампу и дальнейшее понижение напряжения на аноде лампы L_1 и на сетке лампы L_2 . В связи с этим ток через лампу L_2 еще более уменьшится, а ток через лампу L_1 возрастет. Этот процесс будет развиваться лавинообразно до тех пор, пока лампа L_2 не окажется полностью запертой, а через лампу L_1 будет идти максимальный ток. При

этом на аноде лампы L_2 будет максимальное напряжение, равное анодному напряжению E_a , что может условно соответствовать единице B в противоположном положении, когда лампа L_2 открыта, а лампа L_1 заперта, на аноде лампы L_2 будет минимальное напряжение, представляющее условно нуль.

Триггер может находиться в каждом устойчивом состоянии неопределенно долго. Для переброса триггера из одного состояния в другое достаточно подать, например, импульс тока (сигнал высокого напряжения) в общую точку соединения катодов ламп. При этом кратковременное повышение катодного напряжения не окажет влияния на лампу, которая до этого была заперта, в то же время открытая лампа будет этим сигналом заперта, так как повышение напряжения на катоде равносильно понижению напряжения на сетке, что приводит к уменьшению тока через лампу. Уменьшение тока в открытой лампе приведет к повышению напряжения на ее аноде, а следовательно, и на сетке запертой лампы, что приведет к открытию последней. Ток через эту лампу вызовет падение потенциала анода этой лампы и потенциала сетки другой лампы, что приведет к уменьшению тока через лампу, ранее полностью открытую и т. д. Процесс будет развиваться до тех пор, пока лампа, ранее открытая, не будет полностью закрыта, а закрытая — открыта, т. е. триггер «перебросится», и на аноде одной из ламп, принятом за выход схемы, изменится значение двоичной цифры (0 или 1).

Каждый триггер может представлять собой один из разрядов двоичного числа, т. е. представлять одну цифру. Для того чтобы представить n -разрядное двоичное число, нужно n триггеров. Такое сочетание триггеров называется регистром, или запоминающим устройством для хранения одного многоразрядного двоичного числа. Соединяя между собой триггеры в цепочку таким образом, чтобы выход одного триггера был соединен со входом следующего, можно получить так называемый счетчик, т. е. схему, осуществляющую счет числа импульсов, последовательно поступающих на вход младшего разряда схемы.

Комбинацией счетчиков, регистров и некоторых других электронных схем можно получить сумматоры, т. е. устройства для сложения и вычитания двоичных чисел. Так как операции умножения и деления сводятся к ряду сложения и вычитаний со сдвигами, то, используя схемы сумматоров, регистров и схемы для сдвига, можно получить устройства для умножения и для деления чисел.

Арифметические устройства машин включают в себя схемы для сложения, вычитания, умножения и деления двоичных чисел и для выполнения нескольких других операций, а также регистры для приема исходных чисел и для выдачи результата операции.

Рассмотрим некоторые принципы построения запоминающих устройств электронных цифровых машин.

Следует заметить, что в любой ЭЦВМ в действительности имеется два вида запоминающих устройств: оперативная память и внешняя память; последняя называется чаще внешним накопителем.

Оперативная память имеет обычно небольшой объем (1000—4000 чисел), но высокую скорость приема и выдачи отдельных чисел по любому адресу. Внешний накопитель имеет огромную емкость (сотни тысяч и миллионы чисел), но может выдавать и принимать числа только большими группами. Оперативный накопитель связан непосредственно с арифметическим устройством и работает в процессе выполнения операций, выдавая исходные числа и принимая результаты операций. Внешний накопитель непосредственно с арифметическим устройством не связан, а связан с оперативной памятью и является по существу резервом оперативной памяти. В процессе вычислений происходит обмен информацией между оперативной памятью и внешним накопителем. Таким образом все необходимые для ближайшего ряда вычислений данные заблаговременно переписываются в память из накопителя, а результаты вычислений выводятся из памяти в накопитель, освобождая память для новой информации.

Наибольшее распространение в ЭЦВМ получили запоминающие устройства, основанные на использовании магнитной записи. Принцип работы магнитных запоминающих устройств сводится к следующему. Поверхность специальным образом подготовленных лент и барабанов покрывается тонким слоем ферромагнитного материала, который и является носителем информации. Размеры лент и барабанов и основные материалы, из которых они приготовлены, в различных машинах могут сильно различаться. Применяются узкие ленты шириной 3—4 см широкие ленты шириной до 20 см. Длина лент может составлять несколько сот метров. Применяются как небольшие магнитные барабаны диаметром 5—10 см, так и большие диаметром до 1 м. Длина барабанов также колеблется в широких пределах от 10—15 см до 1 м. Запись и считывание с магнитных лент (рис. 10а) и барабанов (рис. 10б) осуществляются при помощи так называемых записывающих и считывающих головок. Эти головки представляют собой специальной формы электромагниты с очень небольшим зазором между полюсами, расположенными в непосредственной близости от поверхности магнитной ленты или барабана. Для записи единицы в обмотку записывающей головки подается импульс тока одного направления, для записи нуля — импульс тока противоположного направления. Следует заметить, что магнитные ленты и барабаны в процессе

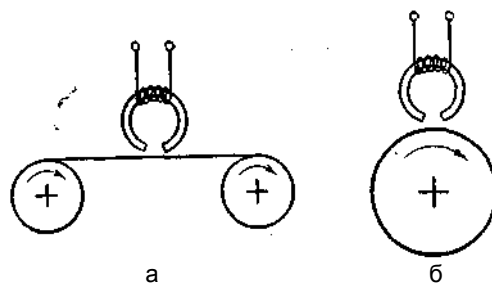


Рис. 10. Схемы запоминающего устройства:
 а — на магнитной ленте; б — на магнитном барабане

записи и считывания данных движутся так, что под головкой за время подачи импульса тока проходит определенный участок поверхности ленты или барабана. В результате на данном месте поверхности появляется намагниченный участок той или иной полярности — так называемая магнитная отметка.

Головки располагаются в один ряд вдоль образующей барабана или поперек ленты, так что запись информации происходит как бы отдельными параллельными дорожками, число которых равно числу записывающих головок. Считывание данных происходит в обратном порядке. При движении под считывающей головкой определенного участка ленты или барабана в обмотке головки индуцируется напряжение той или иной полярности, в зависимости от полярности магнитной отметки, проходящей в данный момент под головкой. Это напряжение соответствующим образом усиливается, формируется и передается в другие части машины в качестве сигнала определенного разряда двоичной цифры.

Магнитные отметки на лентах и барабанах имеют размеры от долей миллиметра до нескольких миллиметров, располагаются в один ряд от 5—10 до 80—100 отметок (на длинных барабанах или широких лентах).

Магнитные запоминающие устройства являются хорошо освоенными и надежными устройствами. Они обладают большой емкостью.

Емкость магнитных лент может достигать до нескольких миллионов двоичных единиц. Емкость небольших магнитных барабанов составляет несколько тысяч двоичных единиц, емкость больших барабанов достигает также до миллиона двоичных единиц. Достоинством магнитных запоминающих устройств является также способность к длительному сохранению информации. Например, магнитные ленты, будучи намотаны на катушки, вынимаются из машины с записанными на них результатами решения задач и могут долгое время храниться в архиве. Недостатком магнитных запоминающих устройств является сравнительно низкая скорость работы — большая затрата времени, потребного для записи или считывания отдельного числа по заданному адресу, так как отыскания нужного числа связано с механическим перемещением ленты или барабана. Наличие механических движущихся частей и необходимость точного соблюдения размеров зазоров между головками и поверхностью лент и барабанов усложняет изготовление устройств и их эксплуатацию. Магнитные ленты используются в электронных цифровых машинах в качестве внешних накопителей; магнитные барабаны используются и как внешние накопители, и в качестве оперативной памяти в некоторых машинах, имеющих невысокую скорость работы.

В настоящее время во многих современных быстродействующих машинах в качестве основной оперативной памяти используются запоминающие устройства на электронно-лучевых трубках. Электронно-лучевая запоминающая трубка (рис. 11) по конструкции напоминает обычный телевизионный кинескоп, только вместо флюоресцирующего экрана в ней находится специальный экран из диэлектрика и сигнальная пластина.

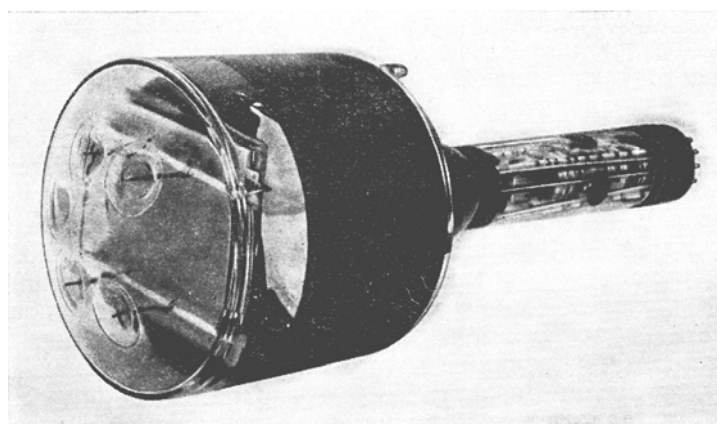


Рис. 11. Электронно-лучевая запоминающая трубка

Электроны, испускаемые катодом, формируются в узкий пучок и направляются специальной отклоняющей системой в определенную точку экрана. В зависимости от скорости падающего потока электронов в данной точке экрана образуется положительный или отрицательный заряд.

Если скорость потока велика (больше некоторого критического значения), то количество вторичных электронов, выбиваемых из диэлектрика, больше количества падающих электронов, и в данном месте образуется положительный заряд. Если скорость падающего потока меньше некоторого критического значения, то число падающих электронов превышает число вторичных электронов, выбиваемых из диэлектрика, и тогда образуется отрицательный заряд.

Принимают, что заряд одного знака соответствует записи единицы, а заряд противоположного знака соответствует записи нуля. Диэлектрик обладает свойством охранять образованные на нем заряды более или менее длительное время, что используется для хранения записанной информации. При необходимости длительного сохранения данных применяется периодическое восстановление зарядов.

Управление скоростью падающего потока электронов и соотношением между количеством остающихся и количеством вылетающих с данного участка экрана электронов осуществляется различными схемами и способами.

Иногда перед диэлектрическим экраном ставят управляющую сетку, которая выполняет роль, аналогичную управляющей сетке в электронной лампе. Иногда управляют скоростью потока электронов путем подачи определенных напряжений на металлическую пластину, находящуюся позади диэлектрического экрана.

Для записи или выборки числа по заданному адресу в электронно-лучевых запоминающих системах необходима точная фиксация направления потока электронов в определенную точку экрана, что требует высокой стабильности напряжений на отклоняющей системе трубки. Это является недостатком данного типа запоминающих устройств, так как здесь имеет место отход от качественного принципа «да» или «нет», положенного в основу работы электронных цифровых машин.

Запоминающие системы на электронно-лучевых трубках строятся таким образом, что каждая трубка служит для запоминания одноименных разрядов двоичных чисел, а количество трубок в системе определяет разрядность чисел, представимых в машине. Емкость таких запоминающих устройств в разных машинах различна и составляет 1024, 2048 и 4096 чисел. При емкости памяти, равной 1024 числам, на экране каждой электронно-лучевой трубки размещены 32 ряда «запоминающих» точек, по 32 точки в каждом ряду. Если емкость памяти равна 2048 числам, то экран каждой трубки разделен на 32 ряда в каждом из которых расположены 64 запоминающих точки. При емкости памяти, равной 4096 числам, экран каждой трубки состоит из 64 рядов, в каждом из которых по 64 запоминающих точки.

Основным достоинством подобных запоминающих систем является высокая скорость работы и возможность записывать и считывать числа в любом порядке. Это достигается благодаря тому, что безинерционный электронный поток может быть направлен практически мгновенно в любую выбранную точку диэлектрического экрана.

Считывание данных осуществляется также путем направления электронного луча в требуемую точку экрана. Если в данной точке был положительный заряд, то он разряжается, и на металлической пластине, находящейся позади диэлектрического экрана и представляющей собой как бы вторую обкладку конденсатора, образуется импульс определенной полярности. Если же в данной точке был заряд другого знака, то на металлической пластине либо не появляется никакого импульса, либо появляется импульс противоположной полярности.

Одним из наиболее важных и перспективных типов запоминающих устройств электронных цифровых машин являются устройства на ферритовых магнитных сердечниках.

Ферриты представляют собой новый вид магнитных материалов, принадлежащих к группе керамических материалов. Ферриты появились и получили широкое распространение в последние годы. Как известно, ранее применявшиеся магнитные материалы были металлами и обладали весьма низким удельным сопротивлением. У ферритов удельное сопротивление в тысячи раз выше, чем у металлов, и поэтому в ферритовых сердечниках не образуются заметные паразитные вихревые токи даже при работе на высоких частотах.

Магнитные свойства ферритов были известны сравнительно давно (с 1878 г.), но только после войны были найдены ферриты с высокими значениями магнитной проницаемости, получившие широкое применение.

Для техники электронных цифровых машин представляют интерес ферриты с нелинейными магнитными характеристиками — ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса.

Эти ферриты замечательны тем, что сердечники, приготовленные из них, могут находиться в двух устойчивых состояниях намагниченности. Для того чтобы перемагнитить, например ферритовый стержень или

кольцо, необходимо создать магнитное поле определенной напряженности. Если же магнитное поле имеет напряженность меньше, чем некоторое критическое значение, то феррит не перемагнитится даже при многократном и длительном приложении этого магнитного поля. Запоминающие устройства на магнитных ферритовых сердечниках представляют собой агрегаты, состоящие из большого количества (до сотен тысяч) ферритовых кольцевых магнитов, расположенных правильными рядами в виде плоской или пространственной решетки (рис. 12).

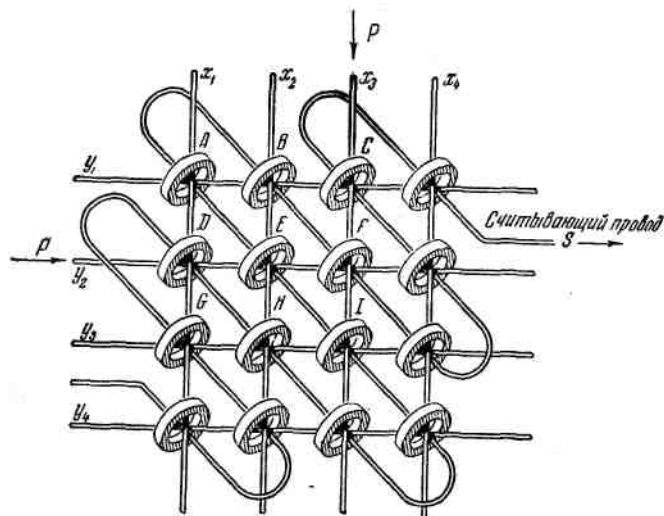


Рис. 12. Схема запоминающего устройства на ферритовых сердечниках

Каждый сердечник служит для запоминания одной двоичной цифры: нуля или единицы. Одно направление намагничивания соответствует нулю, а другое — единице. Сердечники пронизаны проводниками, играющими роль обмоток для намагничивания сердечников. При помощи этих проводов производится запись и считывание записанной информации. Провода пронизывают сердечники вдоль вертикальных (x_1, x_2, x_3, x_4) и горизонтальных (y_1, y_2, y_3, y_4) рядов. Сущность записи и считывания данных сводится к тому, что, если поданы напряжения на ряды проводов (на рис. 12 — обозначены буквой P), то перемагничивание произойдет только в тех сердечниках, в которых совпадают направления магнитных полей, создаваемых вертикальным и горизонтальным проводами. В этом случае на сердечник действует магнитное поле удвоенной напряженности, что и приведет к его перемагничиванию. Это имеет место для сердечника F на рис. 12.

В тех же сердечниках, в которых действуют поля либо от горизонтального провода (сердечники D и E), либо от вертикального (сердечники J и C) или совсем не действуют магнитные поля (сердечники A, B, G, H), перемагничивание не произойдет. При перемагничивании сердечника в обмотке считывания S возникает импульс тока, который представляет собой в условном коде считываемую цифру.

На рис. 12 показан один слой сердечников, соответствующих одноименным разрядам всех ячеек запоминающего устройства. Эти сердечники имеют общую обмотку считывания S, что допустимо, так как считывание не производится одновременно из нескольких ячеек. Количество таких слоев равно количеству разрядов в ячейках.

При считывании двоичной цифры, хранящейся в данном сердечнике, подаются импульсы тока в пронизывающие его вертикальный и горизонтальный провода. При этом на сердечник действует полное магнитное поле и, если сердечник перед этим был намагничен в противоположном направлении, то он перемагничивается и на считывающей обмотке S возникает импульс. Появление импульса в обмотке S соответствует одному из возможных значений двоичной цифры (нулю или единице), а отсутствие — другому.

При таком способе считывания происходит «стирание» числа, т. е. после считывания во всех разрядах ячейки оказываются записанными одинаковые цифры. Чтобы обеспечить возможность многократного использования хранимого числа, его нужно при каждом считывании восстанавливать, что осуществляется специальными схемами повторной записи.

Запоминающие устройства на магнитных сердечниках обладают высоким быстродействием и позволяют производить запись и выборку чисел в любом порядке. Эти устройства не имеют движущихся механических частей и обладают небольшими габаритами. Например, запоминающее устройство на магнитных сердечниках на 1024 числа по 50 разрядов в каждом числе представляет собой куб размером 40X40X40 см. Правда этот куб требует еще более трехсот электронных ламп для построения схем, осуществляющих запись и

выборку чисел по заданным адресам. Сами магнитные сердечники имеют размеры 1—5 мм в диаметре.

Запоминающие устройства на магнитных сердечниках; используются в качестве быстродействующей оперативной памяти различной емкости в 512, 1024, 2048 или 4096 чисел.

Помимо рассмотренных выше трех основных типов запоминающих устройств (магнитных, электронно-лучевых и ферритовых), применяются еще и вспомогательные запоминающие устройства на перфолентах и перфокартах. Эти устройства служат для хранения информации и программы работы перед вводом в машину. Двоичные числа записываются на длинных бумажных или целлулоидных лентах (перфолентах) или на стандартных кусках картона (перфокартах) в виде системы отверстий, расположенных в определенном порядке и в определенных позициях. Наличие отверстия в определенной позиции может, например, соответствовать записи единицы, отсутствие отверстия — записи нуля.

Нанесение данных на перфоленты или перфокарты (перфорация) производится вручную оператором при помощи специальных приборов — клавишного устройства и перфоратора. Оператор нажимает на клавишном устройстве клавиши с определенными десятичными цифрами, а перфоратор пробивает соответствующие двоичные числа на перфокартах (или перфолентах). При вводе перфокарт или лент в машину они ощупываются специальными проводящими стерженьками, и в случае наличия отверстий в определенных местах карты или ленты замыкаются электрические контакты, и в машину поступают соответствующие электрические импульсы, которые передаются в запоминающее устройство машины и фиксируют там двоичные числа в нужных ячейках.

Вывод результатов из электронных цифровых машин осуществляется обычно с помощью перфокарт или перфолент. Числа в двоично-десятичной системе автоматически пробиваются машиной на картах или лентах, которые затем вставляются в специальные печатающие устройства. Эти устройства считывают числа с перфокарт или лент путем ощупывания их контактами, переводят эти числа в десятичную систему счисления и печатают их в обычном цифровом виде на листах бумаги.

Рассматривая основные принципы построения электронных цифровых машин, нельзя не остановиться на чрезвычайно важном и мощном направлении работ в этой области, широко развернувшемся в последние годы, связанном с внедрением в эту область полупроводниковых диодов и особенно триодов (транзисторов). Особенности полупроводниковых диодов и триодов, по сравнению с электронными лампами, являются весьма малые габариты, ничтожное потребление энергии, нечувствительность к тряскам, вибрациям, ударам, большой срок службы и высокая надежность. Но эти элементы могут работать с небольшими по мощности сигналами, и поэтому их нельзя применять там, где требуются сигналы большой мощности (во многих схемах в радиотехнике, радиолокации и др.). Электронные цифровые машины представляют собой не энергетические машины, а устройства для переработки информации, и поэтому являются такой областью, где полупроводниковые элементы имеют поистине безграничные возможности и перспективы применения.

Широкое внедрение в технику электронных цифровых машин надежных полупроводниковых элементов позволит создать замечательные по своей сложности и совершенству машины, которые будут способны выполнять многие функции человека как по управлению машинами и комплексами машин, так и по решению сложнейших математических и логических задач. В настоящее время уже существуют машины, построенные целиком на полупроводниковых элементах, которые показали высокую надежность.

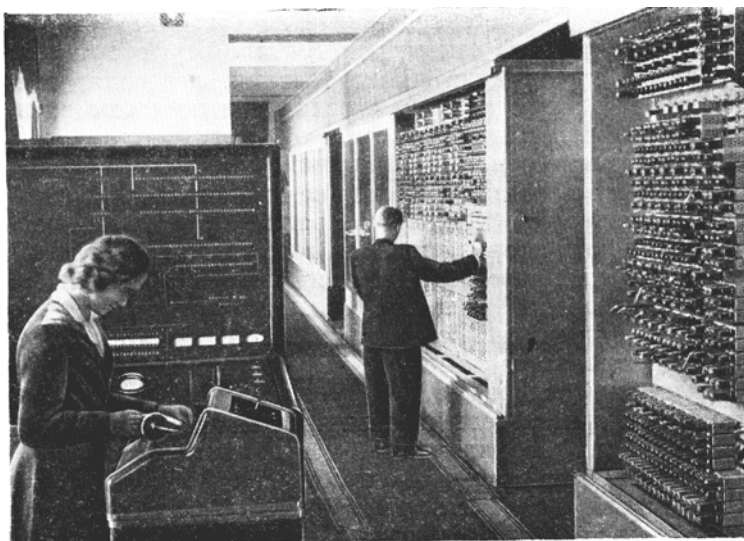


Рис. 13. Большая электронная счетная машина «БЭСМ»

Однако это лишь первые опыты, и полупроводниковые машины пока еще значительно уступают по своим возможностям машинам, построенным на электронных лампах. Но развитие полупроводниковой техники и внедрение полупроводников в электронные цифровые машины идет бурными темпами и в широких масштабах, поэтому трудно предвидеть сколь удивительные и грандиозные перемены и сдвиги могут произойти даже в ближайшие годы.

В заключение нашей главы, посвященной общим принципам устройства и работы электронных цифровых программно-управляемых машин, мы кратко опишем некоторые машины, созданные в Советском Союзе.

Наиболее совершенной машиной по своим логическим и техническим принципам и математическим возможностям в нашей стране является быстродействующая электронная счетная машина «БЭСМ», созданная в 1953 г. в Академии наук СССР под руководством академика С. А. Лебедева. Общий вид машины показан на рис. 13.

«БЭСМ» работает со скоростью 8000—10 000 трехадресных команд в секунду. Машина оперирует с двоичными числами, которые соответствуют приблизительно девятиразрядным десятичным числам. Оперативное запоминающее устройство построено на магнитных (ферритовых) сердечниках и имеет емкость 1024 числа.

«БЭСМ» имеет внешний накопитель, построенный на четырех блоках магнитной ленты, аналогичных обычным магнитофонам. Запись и хранение информации производится на узких магнитных лентах; на каждую ленту может быть записано до 30 000 чисел, общая емкость внешнего накопителя составляет 120 000 чисел. Кроме того, в машине имеется внешний накопитель на магнитном барабане емкостью в 5000 чисел; скорость выборки чисел из этого накопителя составляет до 800 в секунду.

Данные для ввода в машину перфорируются вручную на бумажную ленту. Ввод в машину осуществляется путем пропускания перфорированной ленты между источником света и системой фотоэлементов. Свет, проходя через пробитые в ленте отверстия, падает на фотоэлемент и вызывает появление электрических сигналов, поступающих в машину.

Результаты решения задач фиксируются на магнитной ленте, которая после этого вынимается из машины и вставляется в специальное фотопечатающее устройство. Фотопечатающее устройство переводит информацию, записанную на магнитной ленте двоичным кодом, в десятичные цифры и фиксирует результаты задач в виде таблиц на киноленте. Скорость работы фотопечатающего устройства равна 200 чисел в секунду. Помимо фотопечатающего устройства, «БЭСМ» имеет еще электромеханическое печатающее устройство, связанное непосредственно с машиной и работающее медленнее, чем фотопечатающее устройство. Электромеханическое устройство используется только при выводе из машины небольших групп чисел.

«БЭСМ» имеет около 5 тысяч электронных ламп. Как видно на рис. 13, слева от машины расположен пульт управления, служащий для пуска и остановки машины и для контроля за ее работой.

На рис. 14 показан внешний вид электронной цифровой вычислительной машины «Стрела», созданной в 1953 г. под руководством Ю. Я. Базилевского. Ряд машин этого типа успешно эксплуатируется в различных научных учреждениях нашей страны.

Машина «Стрела» принадлежит к классу больших машин и обладает высокоразвитой и логически законченной структурой, что обеспечивает ее высокую производительность при решении сложных и больших по объему вычислений задач.

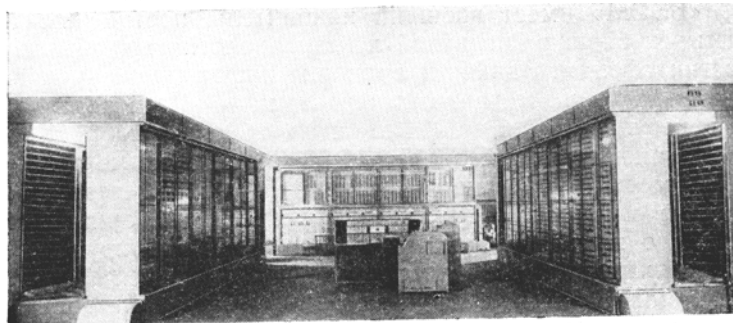


Рис. 14. Электронная цифровая вычислительная машина «Стрела»

Машина собрана на трех основных стойках, расположенных в виде буквы П (см. рис. 14). Справа находится стойка арифметического устройства, слева — стойка внешнего накопителя и некоторых вспомогательных устройств, посередине — стойка оперативного запоминающего устройства и устройства управления. В центре расположен пульт ручного управления и устройства ввода данных и вывода результатов.

Машина «Стрела» обеспечивает скорость вычислений, равную 2000 трехадресных операций в секунду.

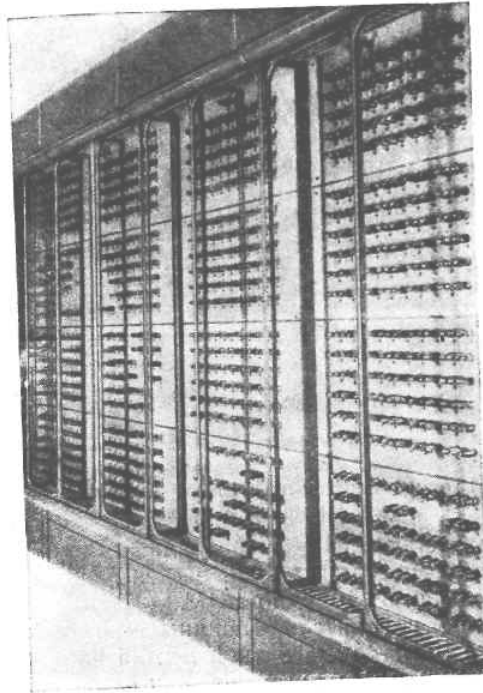


Рис 15. Арифметическое устройство электронной цифровой машины «Стрела»

На рис. 15 показано арифметическое устройство машины. Оно выполняет арифметические операции (сложение, вычитание, умножение) и ряд дополнительных операций (вычитание модулей чисел, сдвиг числа, выделение части числа и другие).

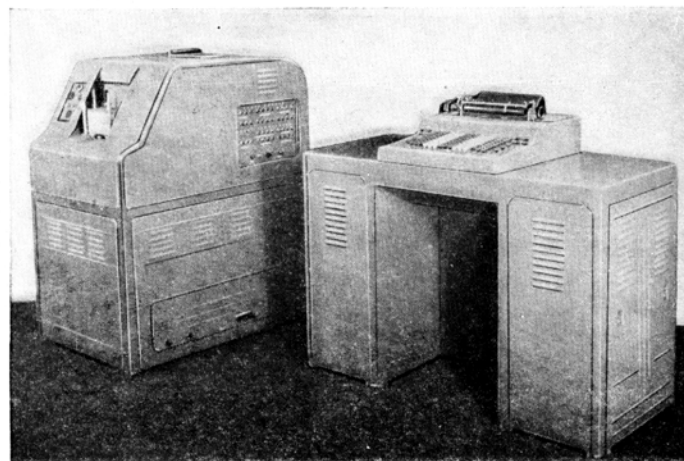


Рис. 16. Входной перфоратор (слева) и клавишное устройство машины «Стрела»

На рис. 16 показано устройство для подготовки перфокарт для ввода в машину, состоящее из двух частей: клавишного устройства (справа) и входного перфоратора. На клавишном устройстве работает человек — оператор, который читает с бланка, закрепленного сверху на валике, числа или команды программы и нажима соответствующие клавиши. После того как набраны в цифры числа, нажимается специальная клавиша, и число пробивается в виде ряда отверстий в одной строчке перфокарты. Подготовленная колода перфокарт вынимается из входного перфоратора и вкладывается в «читающее» устройство машины (см. ниже), из которого данные поступают в оперативное запоминающее устройство. Оперативное запоминающее устройство машины построено на электронно-лучевых трубках и имеет емкость 2047 чисел (или команд). Внешний вид части корпуса этого устройства показан на рис. 17.

В машине представляются 43-разрядные двоичные коды параллельным способом, и соответственно в оперативном запоминающем устройстве имеется 43 электронно-лучевых трубки — по одной трубке на каждый Разряд. Машина оперирует с двоичными числами, которые соответствуют 10—11-разрядным десятичным числам. В ее память могут быть введены числа, заключенные в пределах от 10^{19} до 10^{+19} .

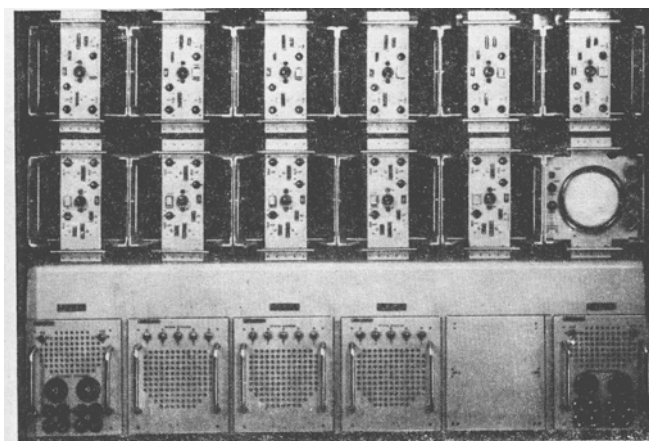


Рис. 17. Оперативное запоминающее устройство на электронно-лучевых трубках машины «Стрела»

Внешний накопитель машины «Стрела» включает в себя два блока с магнитной лентой шириной 125 мм длиной до 100 м. На магнитной ленте числа располагаются группами по зонам; на каждой ленте может быть записано 253 зоны, различного размера, таким образом, чтобы общий объем данных не превышал 100 000 чисел. Всего внешний накопитель машины «Стрела» может вместить в себя до 200 000 чисел.

Внешний накопитель показан на рис. 18, на котором видны бабины с магнитной лентой и лентопротяжный механизм. С одной бабины лента сматывается, а на другую наматывается.

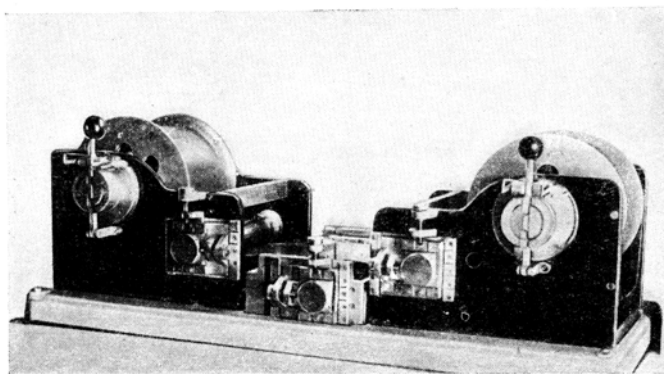


Рис. 18. Внешний накопитель на магнитной ленте электронной цифровой машины «Стрела»

На рис. 19 показан внешний вид устройства управления машины «Стрела», а на рис. 20 — пульт ручного управления машиной. Пульт ручного управления позволяет оператору запускать и останавливать машину, а также вводить и выводить из оперативного запоминающего устройства отдельные числа и команды во время остановки машины.

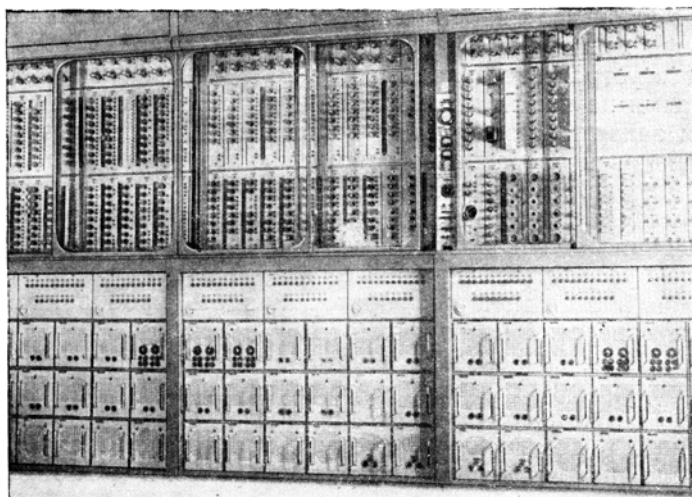


Рис. 19. Центральное устройство управления электронной цифровой машины «Стрела»

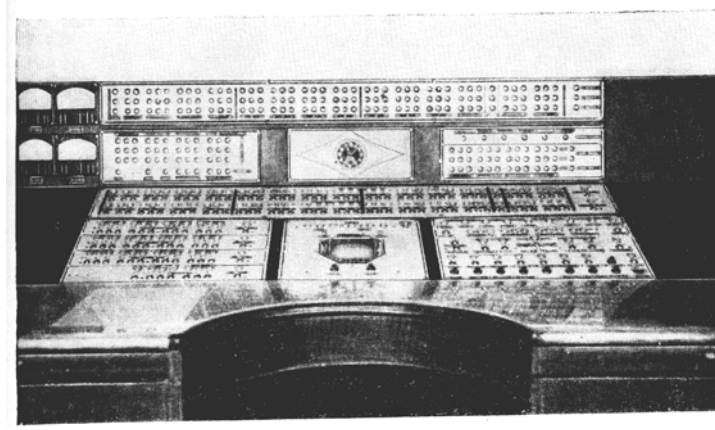


Рис. 20. Центральный пульт управления электронной цифровой машины «Стрела»

Устройство ввода данных в машину, называемое также считывающим устройством, показано на рис. 21. В это устройство вкладывается колода перфокарт с пробитыми на них исходными данными и программой решения задачи. Оно передает данные в виде электрических сигналов в оперативное запоминающее устройство.

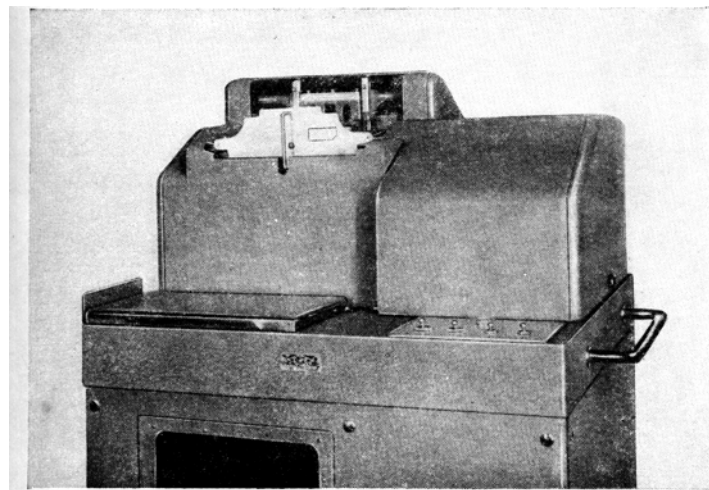


Рис.21. Считывающее устройство электронной цифровой машины «Стрела»

На рис. 22 показано устройство вывода результатов, называемое также выходным перфоратором. Результаты решения задачи, полученные в оперативном запоминающем устройстве, передаются в виде электрических сигналов в выходной перфоратор и здесь пробиваются в виде отверстий на перфокартах.

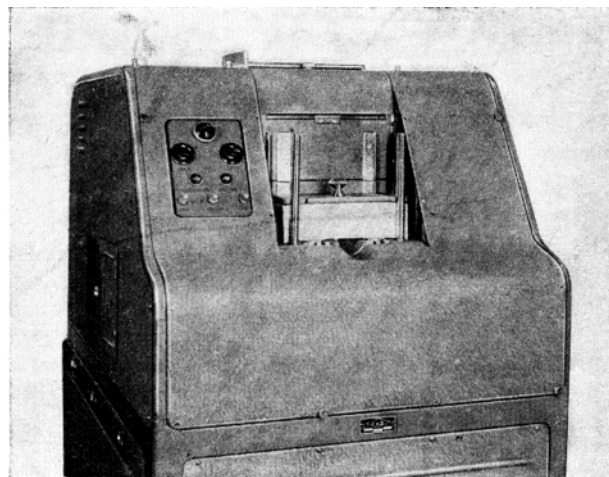


Рис. 22. Выходной перфоратор электронной цифровой машины «Стрела»

На рис. 23 показано печатающее устройство машины. В его приемник (слева) вкладывают колоду перфокарт; после пуска устройство переводит перфорированные данные в десятичную систему счисления и печатает их в виде числовых таблиц на рулоне бумаги в трех экземплярах.

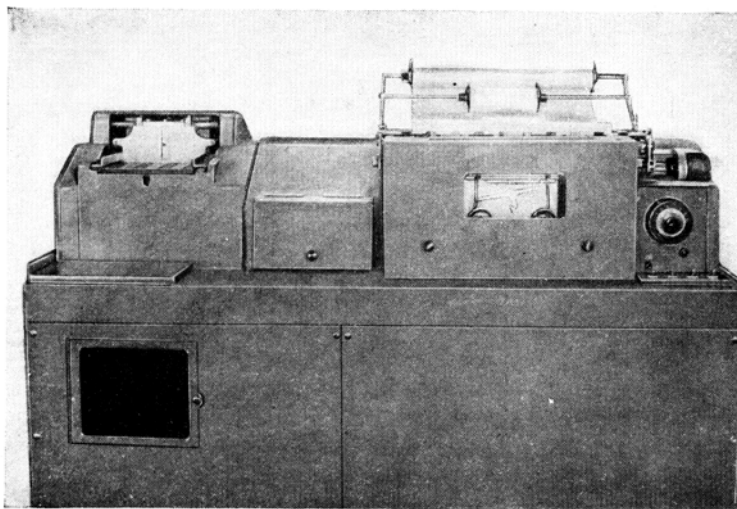


Рис. 23. Печатающее устройство машины «Стрела»

Машина «Стрела» имеет около 6000 электронных ламп и несколько десятков тысяч полупроводниковых выпрямителей (диодов). Общая потребляемая машиной мощность— 150 *квт*, площадь, занимаемая непосредственно машиной, составляет около 200 *м²*.

На рис. 24 показан внешний вид электронной цифровой вычислительной машины «Урал», созданной в 1954 г. под руководством инженера Б. И. Рамеева.

Эта машина относится к классу малых машин универсального назначения и предназначена для использования в научно-исследовательских институтах, конструкторских бюро, на заводах, в высших учебных заведениях и в других учреждениях, где выполняются значительные вычислительные работы. Машина «Урал» серийно выпускается нашей промышленностью. Эта машина значительно меньше по количеству аппаратуры, чем машины «Стрела» и «БЭСМ».

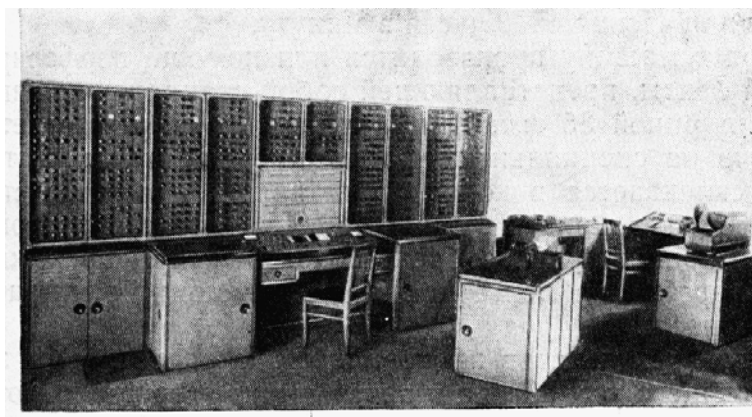


Рис. 24. Малая электронная цифровая программно-управляемая машина «Урал»

Машина оперирует с двоичными числами, которые соответствуют приблизительно 10-разрядным десятичным числам. Работает она по одноадресной системе команд и выполняет 100 команд в секунду.

Оперативное запоминающее устройство емкостью в 1024 числа построено на магнитном барабане; скорость вращения барабана 6000 *об/мин*, что обеспечивает возможность обращения в любую ячейку памяти за 10 миллисекунд. Внешний накопитель на магнитной ленте имеет емкость 40000 чисел; запись и хранение информации осуществляется на узкой магнитной ленте (35 *мм*) по зонам. При работе внешнего накопителя лента перемещается со скоростью 2 *м/сек*, что обеспечивает скорость записи или чтения 4500 чисел в минуту.

Ввод в машину производится при помощи перфорированной ленты, представляющей собой стандартную киноленту шириной 35 *мм*. Перфорирование осуществляется вручную на специальных входных перфораторах,

Затем лента склеивается в кольцо и вставляется в устройство ввода. Чтение данных с ленты производится при помощи фоточитающих приспособлений, которые при прохождении отверстий на ленте посылают в машину электрические сигналы.

Вывод результатов производится из оперативного запоминающего устройства в печатающее устройство, которое выдает результаты в виде цифровых таблиц в десятичной системе счисления со скоростью 100 чисел в минуту.

Машина «Урал» имеет 800 электронных ламп и 3000 полупроводниковых выпрямителей (диодов). Потребляемая мощность составляет 8 *квт*. Машина собрана на одной стойке, посередине которой смонтирован пульт управления (см. рис. 24). Вся машина может быть размещена в комнате площадью 40 *м²*.

Глава III

ОСНОВЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Порядок решения задач на машине

Как известно читателю из предыдущей главы, электронная цифровая программно-управляемая машина представляет сложный автомат, предназначенный для преобразования информации.

Решение какой-либо задачи с помощью этого автомата осуществляется следующим образом.

Исходные данные задачи представляются в виде ряда чисел. Метод решения сводят к ряду формул, содержащих только действия, которые могут быть выполнены машиной. Составляют последовательность команд, при выполнении которых машина должна осуществить счет по этим формулам, т. е. составляют программу работы машины для решения требуемой задачи (в дальнейшем для краткости будем говорить — составляют программу). Программу и исходные данные задачи вводят в память машины. После этого машину приводят в действие, или как говорят — пускают. Машина выполняет программу, т. е. решает задачу. Программа должна содержать команду, по которой результаты решения выдаются из машины. Заканчиваться программа должна командой «останова» (по которой, окончив работу, машина остановится).

Выбор метода решения задачи, т. е. выбор совокупности приемов, при выполнении которых можно получить решение задачи, называется построением решающего алгоритма. Характер алгоритма зависит от характера задачи. Представление исходных данных в виде чисел, а искомых результатов в виде букв и составление на основе выбранного алгоритма расчетных формул задачи представляет собой перекодировку информации об алгоритме.

Составление программы для решения задачи не является просто новой перекодировкой информации. Читатель вскоре увидит, что при составлении программы необходимо произвести некоторое изменение алгоритма решения — в основном ввести в этот алгоритм ряд операций, нужных для того, чтобы машина могла осуществить его автоматически, без вмешательства человека.

Программу и исходные данные записывают в виде столбца чисел на стандартных бланках. Поскольку большинство современных цифровых программно-управляемых машин не имеет приспособлений для считывания материала непосредственно с бланка (например, подобно тому, как человек читает «глазами»), практикуется следующий способ ввода материала в машину. Числа представляют в виде системы отверстий — перфораций — на стандартных кусках тонкого картона, называемых перфокартами, или на бумажной, а чаще на целлулоидной ленте, называемой перфолентой. Колоду перфокарт (или рулон перфоленты) вкладывают в читающее устройство машины. Считывание материала с перфокарт (перфоленты) на многих машинах осуществляется путем пропускания перфокарт (перфоленты) между системой контактов. В тех местах, где перфокарта (перфолента) имеет отверстия, контакты замыкаются. Возникающие при этом электрические сигналы используются для записи чисел в память машины.

Таким образом, при вводе информации в машину производят еще две перекодировки этой информации: сперва сигналы-цифры, хранящиеся на бланках, превращают в сигналы-отверстия перфокарт или перфоленты, затем сигналы-отверстия преобразуются в другие сигналы — электрические импульсы.

Чтобы программу ввести в память машины, составляют специальную «программу ввода», состоящую из небольшого числа команд. Программу ввода, нанесенную на отдельную перфокарту,

вводят в память машины ручным способом, нажимая специальную кнопку на пульте управления. Основная программа вводится машиной уже автоматически в порядке выполнения машиной команд, образующих программу ввода.

При выдаче результатов решения из машины информация подвергается перекодировкам, производимым в обратном направлении. Электрические импульсы, выдаваемые машиной, на выходном перфораторе перекодируются в сигналы отверстия перфокарт или перфолент. Колода полученных перфокарт или рулон перфоленты вкладывается в печатающее устройство, в котором сигналы–отверстия преобразуются в сигналы–цифры, отпечатанные на бумажной ленте.

Некоторые современные машины, кроме выдачи результатов на перфокарты или перфоленту, имеют возможность печатать их непосредственно на бумажной ленте.

Контроль правильности вычислений

Как видно из всего сказанного, решение задачи на цифровой программно-управляемой машине сводится к ряду содержательных преобразований информации и сопровождается рядом ее перекодировок.

Как читатель узнал из I главы, передачи и преобразования информации осуществляются в условиях наличия шумов, помех, которые могут приводить к нарушениям сигналов, искажающим содержание информации. Другими словами, процесс решения задачи не гарантирован от ошибок, которые могут быть допущены человеком, подготавливающим программу, или возникнуть от случайных сбоев в работе машины и ее устройств. Мы здесь не говорим о систематических сбоях, так как они имеют место лишь при неисправности машины или ее устройств и делают решение задачи невозможным.

Естественно, что в процессе подготовки задачи к решению на машине, а также непосредственно в процессе решения необходимо осуществлять контроль правильности получаемых результатов.

Проверку правильности алгоритма и исходных данных задачи, а также проверку составленной программы производит сам специалист — математик, подготавливающий задачу.

Правильность переноса материала на перфокарты обеспечивается тем, что перенос этот осуществляется, как говорят, «в две руки» — двумя людьми независимо друг от друга, после чего два комплекта перфокарт сличаются между собой при помощи электрического устройства, называемого контрольным устройством. Если эти перфокарты оказываются не тождественными, то они удаляются из обоих комплектов и вместо них пробиваются новые (опять «в две руки»). Полная тождественность двух комплектов перфокарт считается признаком того, что перенос информации с бланков на перфокарты выполнен без ошибок.

Правильность ввода программы в память машины контролируется автоматически, для чего в программу ввода включают специальные команды. При этом часто используется прием, называемый контрольным суммированием. Состоит этот прием в том, что после ввода программы и исходных данных материал, введенный в память, суммируют. Полученная сумма носит название контрольной суммы. Полученную контрольную сумму по специальной команде машина сравнивает с заранее введенным в машину значением этой контрольной суммы. Возможен случай двух последовательных вводов материала сперва с первого, а потом со второго комплекта перфокарт со сравнением контрольных сумм, полученных после первого и после второго ввода. Совпадение контрольных сумм считают признаком правильности ввода программы и исходных данных.

После того, как программа правильно введена, можно пустить машину и решать задачу. Однако, если программа применяется впервые, то перед тем как приступить к решению задачи, производят отладку ее на машине.

Сущность отладки состоит в том, что с помощью программы производят ряд вычислений при упрощенных исходных данных. Результаты, выдаваемые при этом машиной, сличают с заранее заготовленными результатами, полученными путем ручного счета. При отладке программы на машине могут быть выявлены ошибки, допущенные в процессе составления программы. Только после устранения этих ошибок приступают к собственно решению задачи на машине.

Чтобы иметь уверенность в правильности решения задачи, необходимо также контролировать правильность вычислений, производимых машиной.

Наиболее простым способом контроля является двойной счет. В простейшем случае можно решить задачу дважды, полученные результаты напечатать и затем сравнить между собой. Тождественность результатов будет служить признаком того, что в процессе вычислений машина не допускала

случайных сбоев.

Обычно контроль правильности вычислений предусматривают в программе. Тогда этот контроль осуществляется автоматически, самой машиной. Двойной счет может быть применен и в этом случае. Можно составить программу так, чтобы машина решила задачу один раз, просуммировала бы результаты, затем решила задачу второй раз, снова просуммировала бы результаты и, если обе контрольные суммы совпадут, выдала бы результаты на перфокарты. Такой контроль применяют довольно часто. Практика показывает его высокую надежность, но при этом время, расходуемое машиной на решение задачи, увеличивается вдвое.

Иногда для контроля правильности результатов предусматривают проверку выполнения какого-либо соотношения, связывающего вычисляемые величины, при условии, конечно, что это соотношение не используется для вычисления этих величин. Например, при составлении таблиц значений синусов и косинусов можно проверять, удовлетворяют ли получаемые значения соотношению

$$\sin^2 x + \cos^2 x = 1.$$

Если получаемые числа удовлетворяют контрольному соотношению, считается, что вычисления произведены правильно.

Программирование

Сущность процесса программирования читатель лучше всего уяснит себе путем рассмотрения ряда несложных примеров. Рассмотрим составление программы для отечественной электронной цифровой программно-управляемой машины «Стрела».

Память машины «Стрела» состоит из отдельных ячеек, каждая из которых может хранить либо число, либо команду. Команда для машины «Стрела» представляет собой набор цифр, состоящий из пяти групп: трех групп, называемых адресами команды, одной группы, называемой кодом операции, и одной группы, состоящей из одной цифры и называемой контрольным знаком.

Адреса команды показывают, откуда должны быть взяты исходные числа и куда направлен результат. Код операции показывает, какая должна быть выполнена операция. Контрольный знак может быть либо нулем, либо единицей и на содержание команды не влияет. При составлении программы и записи ее на стандартных бланках адреса и коды операций команд принято писать в восьмеричной системе счисления.

Команда

0025 0030 0175 0 01,

как и команда

0025 0030 0175 1 01,

содержит адреса:

1-й 0025,

2-й 0030,

3-й 0175

и код операции 01. Контрольный знак в первой из команд равен 0, а во второй 1. Обе приведенные команды имеют одинаковое содержание: «число, записанное в ячейке № 0025, прибавить к числу, хранящемуся в ячейке № 0030; сумму поместить в ячейку № 0175» (01 — код операции сложения).

Контрольные знаки команд используют при отладке программы на машине. Для этого машину переводят путем переключения специального тумблера на работу в режиме контрольных остановов. Выполняя программу, машина будет останавливаться после выполнения каждой команды, имеющей контрольный знак 1. Этими остановами пользуются для проверки правильности промежуточных результатов вычислений, получаемых на различных этапах решения задачи. С помощью специальной отлаживающей программы можно производить отладку рабочей программы в автоматическом режиме.

Так как команды для машины «Стрела» содержат по три адреса, эту машину называют трехадресной (читатель помнит, что существуют машины, команды для которых имеют другое количество адресов).

При некоторых кодах операций второй адрес команды для машины «Стрела» обозначает не номер, а количество ячеек памяти. Например, команда

означает: «число, хранящееся в ячейке № 0070, и числа из следующих 15-ти ячеек перевести в двоичную систему счисления (72 — код операции перевода десятичных чисел в двоичные). Результаты записать в последовательные ячейки, начиная с ячейки № 170».

Пример на составление программы и решение задачи на машине «Стрела»

Требуется составить программу для решения любой системы двух линейных алгебраических уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{aligned} Ax + By &= C \\ Dx + Ey &= F \end{aligned}$$

для случая, когда

$$AE - BD \neq 0.$$

Решая совместно эту систему, получим:

$$x = \frac{CE - BF}{AE - BD}; \quad y = \frac{AF - CD}{AE - BD}$$

Программу составляем для вычисления по этим формулам.

Порядок, в котором в данном случае должен осуществляться вычислительный процесс, очевиден.

Составлять программу сразу с действительными адресами и номерами ячеек памяти машины — неудобно, так как заранее неизвестно, сколько команд будет содержать программа (последнее затрудняет расположение материала в памяти машины). Поэтому программу сперва составляют в «буквенно-числовых» обозначениях. Например, ячейки, отведённые для команд программы, обозначают знаками $a, a+1, a+2, \dots$ ячейки для исходных данных — знаками $b+1, b+2, \dots$ и т. д. При записи команд в буквенно-числовых обозначениях контрольный знак опускают, кроме случаев, когда его значение играет какую-либо особую роль.

Начальные данные задачи (числа A, B, C, D, E, F) разместим следующим образом:

Номер ячейки	$b+1$	$b+2$	$b+3$	$b+4$	$b+5$	$b+6$
Содержимое ячейки	A	B	C	D	E	F

Программу поместим в ячейки с номерами $a, a+1, a+2, \dots$ Рабочими ячейками пусть будут ячейки $c+1, c+2, \dots$ Для результатов отведем ячейки $d+1, d+2, \dots$

Составляя программу, будем слева от каждой команды записывать, пользуясь восьмеричной системой счисления, номер ячейки памяти, предназначенной для ее хранения, и отделять этот номер ячейки от команды закрытой скобкой.

Коды операций, используемых в дальнейшем, приведены в табл. 1.

Составление команд

Содержимое рабочих ячеек после выполнения каждой команды показано в табл. 2.

Так как машина производит действия только над числами, записанными в двоичной системе, то мы должны перевести исходные данные в двоичную систему. Для этого необходимо предпослать программе команду:

Первая команда: «Шесть десятичных чисел, первое из которых хранится в ячейке $b+1$, преобразовать в двоичные, и результаты записать в последовательные ячейки начиная с $b+1$ ».

$$a+0) \quad b+1 \quad 0005 \quad b+1 \quad 72.$$

Далее составим команды, по которым машина осуществит решение нашей системы уравнений.

Наименование операции	Код операции	Пояснения
Сложение	01	
Вычитание	03	
Умножение.....	05	
Вычисление обратной величины.....	62	Для числа N обратной величиной называется $\frac{1}{N}$. машина «Стрела» не может производить непосредственного деления. Для получения частного $M:N$ получают сперва $\frac{1}{N}$, а затем произведение $M \cdot \frac{1}{N}$. В команде вычислений обратной величины для одного числа второй адрес должен быть равен нулю.
Перевод чисел из десятичной системы счисления в двоичную.....	72	} В команде перевода n второй адрес должен быть равен числу $n-1$.
Перевод чисел из двоичной системы счисления в десятичную.....	70	
Перенос чисел с перфокарт в память машины.....	41	} В команде переноса n чисел должно стоять число $n-1$. Адрес, относящийся к перфокартам (первый для операции 41 и третий для операции 44), должен быть равен нулю.
Перенос чисел из памяти машины на перфокарты.....	44	
Останов машины.....	40	Содержимое ячеек, номера которых стоят в первом и втором адресах команды останова, при выполнении машиной этой команды выдается на пульт управления. Если такая выдача не нужна, все адреса команды делают нулевыми.

Вторая команда: «Перемножить числа A и E . Произведение записать в рабочую ячейку $c+1$ ».

$$a + 1) \quad b + 1 \quad b + 5 \quad c + 1 \quad 05.$$

Третья команда: «Перемножить числа B и D . Произведение записать в ячейку $c+2$ ».

$$a + 2) \quad b + 2 \quad b + 4 \quad c + 2 \quad 05.$$

Четвертая команда: «Из числа AE , расположенного в ячейке $c+1$, вычтешь число BD , стоящее в ячейке $c+2$. Разность записать в ячейку $c+1$ ».

$$a + 3) \quad c + 1 \quad c + 2 \quad c + 1 \quad 03.$$

Пятая команда: «Вычислить величину, обратную числу $AE - BD$, расположенному в ячейке $c+1$. Результат записать опять в ячейку $c+1$ ».

$$a + 4) \quad c + 1 \quad 0000 \quad c + 1 \quad 62.$$

Шестая команда: «Перемножить числа C и E . Произведение записать в ячейку $c+2$ ».

$$a + 5) \quad b + 3 \quad b + 5 \quad c + 2 \quad 05.$$

Седьмая команда: «Перемножить числа B и F . Произведение записать в ячейку $c+3$ ».

$$c + 6) \quad b + 2 \quad b + 6 \quad c + 3 \quad 05.$$

Восьмая команда: «Из числа CE , находящегося в ячейке $c+2$, вычтешь число BF , стоящее в ячейке $c+3$. Разность записать в ячейку $c+2$ ».

$$a + 7) \quad c + 2 \quad c + 3 \quad c + 2 \quad 03.$$

Девятая команда¹: «Умножить число $\frac{1}{AE - BD}$, помещенное в ячейке $c+1$, на $CE - BF$ из ячейки $c+2$.

Произведение записать в ячейку $d+1$ ».

¹ После $a + 7$ следует $a+10$, так как запись ведется в восьмеричной системе счисления. В этой системе счисления сочетание цифр 10 означает восемь.

$$a + 10) \quad c + 1 \quad c + 2 \quad d + 1 \quad 05.$$

После выполнения этой команды будет получена искомая величина x .

Десятая команда: «Перемножить числа A и F . Произведение записать в ячейку $c+2$ ».

$$a + 11) \quad b + 1 \quad b + 6 \quad c + 2 \quad 05.$$

Одиннадцатая команда: «Перемножить числа C и D . Произведение записать в ячейку $c+3$ ».

$$a + 12) \quad b + 3 \quad b + 4 \quad c + 3 \quad 05.$$

Двенадцатая команда: «Из числа AF , расположенного в ячейке $c+2$, вычесть число CD , стоящее в ячейке $c+3$. Разность записать в ячейку $c+2$ ».

$$a + 13) \quad c + 2 \quad c + 3 \quad c + 2 \quad 03.$$

Тринадцатая команда: «Умножить число $\frac{1}{AE - BD}$, находящееся в ячейке $c+1$, на число $AF - CD$, хранящееся в ячейке $c+2$. Произведение записать в ячейку $d+2$ ».

$$a + 14) \quad c + 1 \quad c + 2 \quad d + 2 \quad 05.$$

После выполнения этой команды будет получена вторая искомая величина y .

Выполняя составленные нами команды, машина решит заданную систему уравнений, но все вычисления она производит в двоичной системе счисления. Следовательно, и величины x и y будут получены в виде двоичных чисел. Необходимо преобразовать их в десятичные числа.

Четырнадцатая команда: «Два числа x и y , расположенные соответственно в ячейках $d+1$ и $d+2$, перевести из двоичной системы счисления в десятичную. Результат снова записать в ячейки $d+1$ и $d+2$ ».

$$a + 15) \quad d + 1 \quad 0001 \quad d + 1 \quad 70.$$

Теперь надо предусмотреть вывод полученных результатов из машины на перфокарты.

Пятнадцатая команда: «Два числа x и y , стоящие в последовательных ячейках $d+1$ и $d+2$, перенести на перфокарты».

$$a + 16) \quad d + 1 \quad 0001 \quad 0000 \quad 44.$$

Шестнадцатая команда: «Останов».

$$a + 17) \quad 0000 \quad 0000 \quad 0000 \quad 40.$$

Таблица 2

После выполнения команды	Содержимое ячеек				
	рабочих			ответных	
	$c + 1$	$c + 2$	$c + 3$	$d + 1$	$d + 2$
$a + 1$	AE	—	—	—	—
$a + 2$	AE	BD	—	—	—
$a + 3$	$AE - BD$	BD	—	—	—
$a + 4$	$1:(AE - BD)$	BD	—	—	—
$a + 5$	$1:(AE - BD)$	CE	—	—	—
$a + 6$	$1:(AE - BD)$	CE	BF	—	—
$a + 7$	$1:(AE - BD)$	$CE - BF$	BF	—	—
$a + 10$	$1:(AE - BD)$	$CE - BF$	BF	$x = \frac{CE - BF}{AE - BD}$	—
$a + 11$	$1:(AE - BD)$	AF	BF	$x = \frac{CE - BF}{AE - BD}$	—
$a + 12$	$1:(AE - BD)$	AF	CD	$x = \frac{CE - BF}{AE - BD}$	—
$a + 13$	$1:(AE - BD)$	$AF - CD$	CD	$x = \frac{CE - BF}{AE - BD}$	—
$a + 14$	$1:(AE - BD)$	$AF - CD$	CD	$x = \frac{CE - BF}{AE - BD}$	$y = \frac{AF - CD}{AE - BD}$

Теперь составление программы окончено.

Собрав вместе все команды, получим программу в буквенном виде (табл. 3).

Остается заменить буквы конкретными числами и получить программу в ее окончательном виде. Программа ввода обычно занимает ячейки памяти с 0004 по 0017. Поэтому рабочую программу мы разместим, начиная с ячейки 0020 (напомним, что в восьмеричной системе счисления $17+1=20$). Для

этого возьмем $a = 0020$. При этом рабочая программа займет ячейки с 0020 по 0037. Затем положим $b = 37$. Тогда исходные данные (A, B, C, D, E, F) разместятся в ячейках 0040, 0041, 0042, 0043, 0044, 0045. Таким образом, основная программа вместе с исходными данными займет ячейки, начиная с 0020 и кончая 0045, всего 26 ячеек в восьмеричной системе счисления (или 22 ячейки в десятичной системе счисления).

Таблица 3

Номер ячейки	Команда, хранящаяся в ячейке				
$a + 0$	$b+1$	0005	$b+1$	72	
$a + 1$	$b+1$	$b+5$	$c+1$	05	
$a + 2$	$b+2$	$b+4$	$c+2$	05	
$a + 3$	$c+1$	$c+2$	$c+1$	03	
$a + 4$	$c+1$	0000	$c+1$	02	
$a + 5$	$b+3$	$b+5$	$c+2$	05	
$a + 6$	$b+2$	$b+6$	$c+3$	05	
$a + 7$	$c+2$	$c+3$	$c+2$	03	
$a + 10$	$c+1$	$c+2$	$d+1$	05	
$a + 11$	$b+1$	$b+6$	$c+2$	05	
$a + 12$	$b+3$	$b+4$	$c+3$	05	
$a + 13$	$c+2$	$c+3$	$c+2$	03	
$a + 14$	$c+1$	$c+2$	$d+2$	05	
$a + 15$	$d+1$	0001	$d+1$	70	
$a + 16$	$d+1$	0001	0000	44	
$a + 17$	0000	0000	0000	40	

Таблица 4

Номер ячейки	Команда, хранящаяся в ячейке					
0020	0040	0005	0040	0	72	
0021	0040	0044	0046	0	05	
0022	0041	0043	0047	0	05	
0023	0046	0047	0046	0	03	
0024	0046	0000	0046	0	62	
0025	0042	0044	0047	0	05	
0026	0041	0045	0050	0	05	
0027	0047	0050	0047	0	03	
0030	0046	0047	0051	0	05	
0031	0040	0045	0047	0	05	
0032	0042	0043	0050	0	05	
0033	0047	0050	0047	0	03	
0034	0046	0047	0052	0	05	
0035	0051	0001	0051	0	70	
0036	0051	0001	0000	0	44	
0037	0000	0000	0000	0	40	
0040	<i>A</i>.....	.....	.....		} Исходные данные
0041	.....	.....	<i>B</i>.....	.....	.....
0042	.....	.....	<i>C</i>.....	.....	.....
0043	.....	.....	<i>D</i>.....	.....	.....
0044	.....	.....	<i>E</i>.....	.....	.....
0045	.....	.....	<i>F</i>.....	.....	.....
0046						} Рабочие ячейки
0047						
0050						
0051						} Ответные ячейки
0052						

Пусть $c=45$. Тогда рабочими ячейками будут ячейки 0046, 0047 и 0050. Если положить $d=50$, то для результатов окажутся отведенными ячейки 0051 и 0052. После этого программа для решения системы линейных уравнений примет вид, указанный в табл. 4.

Для того чтобы машина выполнила эту программу, ее нужно ввести в память машины. Ввод рабочей программы и исходных данных в машину осуществляется, как мы знаем, с помощью специальной программы ввода. В простейшем случае (которым мы здесь и ограничимся) программа ввода может состоять из одной команды. В нашем случае это будет: «ввести двадцать два числа, т. е. при записи в восьмеричной системе счисления 26 чисел, с перфокарт в память, начиная с ячейки 0020»

0000 0025 0020 0 41.

Основная программа, начальные данные и программа ввода на специальном устройстве — входном перфораторе — пробиваются на перфокартах. Начальные данные пробиваются на отдельной перфокарте (для удобства, на случай необходимости замены начальных данных). Программа ввода также наносится на отдельную перфокарту. В нашем простейшем случае она занимает 1 строку, а остальные строки мы заполняем нулями. При этом программа ввода имеет вид:

0000 0025 0020 0 41
 0000 0000 0000 0 00
 .
 .
 .
 0000 0000 0000 0 00

Перфокарта ввода кладется сверху колоды перфокарт, содержащих программу и исходные данные. При нажатии на пульте управления кнопки с надписью «Начальный пуск» машина вводит первую перфокарту — перфокарту ввода — в ячейки 0004—0017, после чего начинает выполнять все команды, начиная с команды, записанной в ячейке 0004. Команду, состоящую из нулей, машина «просматривает», но не выполняет, и переходит к следующей команде. По программе ввода машина вводит рабочую программу и исходные данные, потом выполняет рабочую программу, решая задачу, выдает полученные результаты на перфокарты и затем останавливается.

Перфокарты с результатами вкладывают в печатающее устройство, которое их автоматически перепечатывает на бумажную ленту.

С помощью программы, описанной в этом примере, в действительности было осуществлено решение системы линейных алгебраических уравнений при следующих значениях исходных данных:

$$A = 1; B = 2; C = 5; D = 7; E = 5; F = 17.$$

На рис. 25 изображена перфокарта, содержащая программу ввода, на рис. 26 — две перфокарты, на которых пробита наша программа, на рис. 27 — перфокарта с исходными данными.

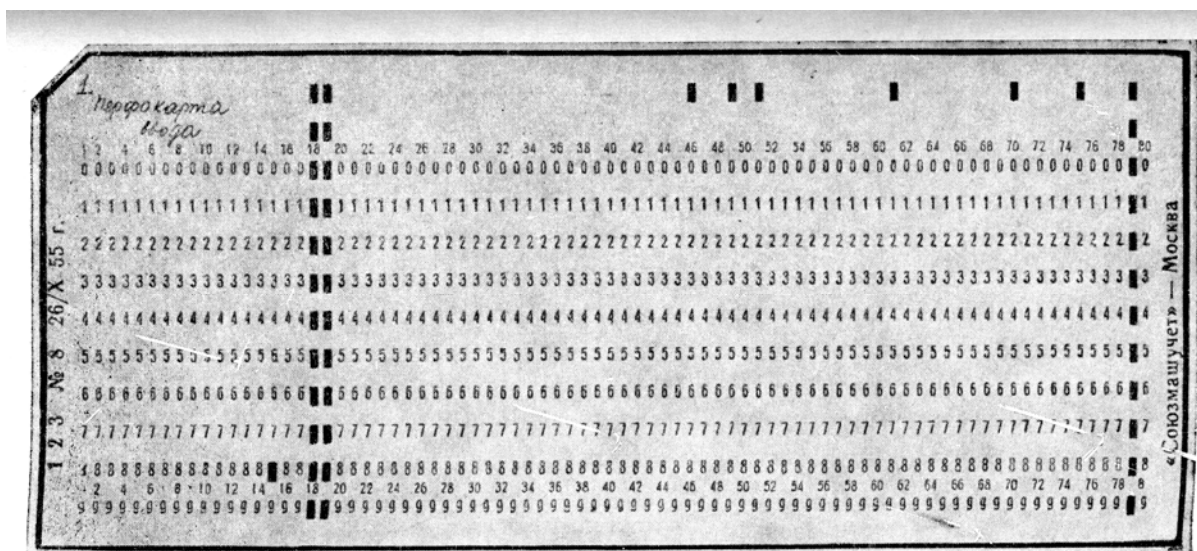
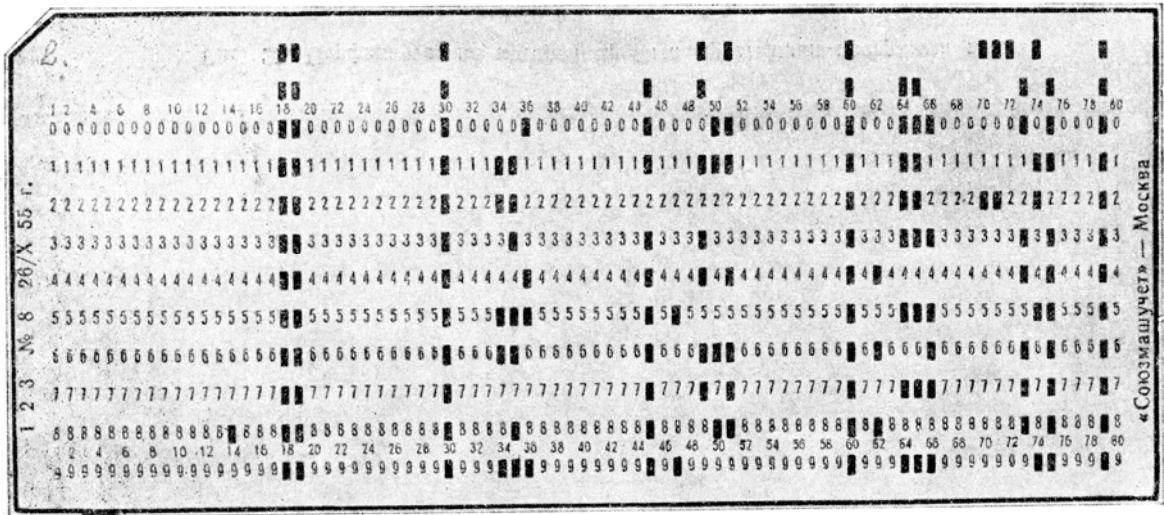
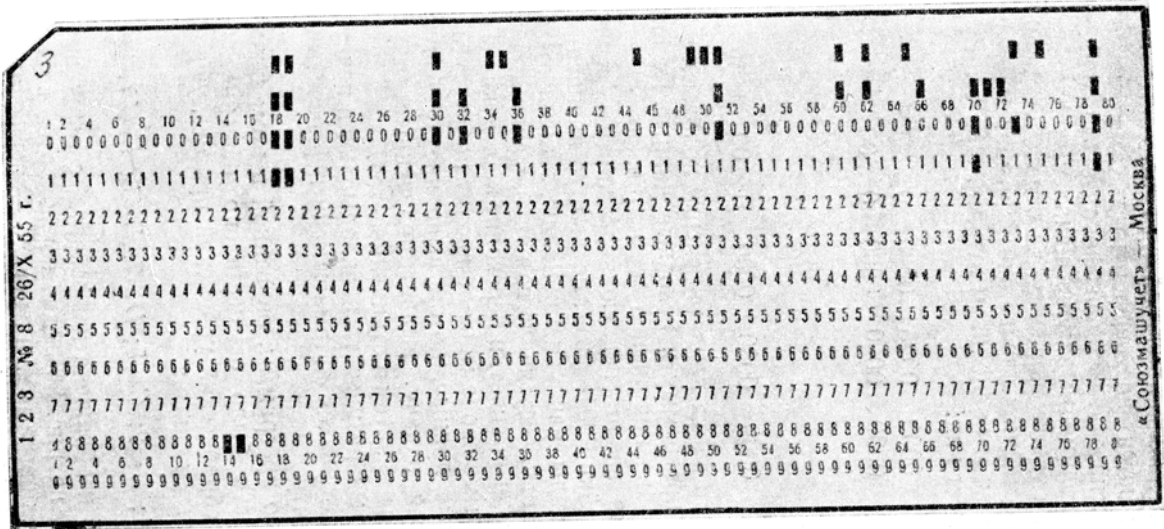


Рис.25. Перфокарта, на которой пробита простейшая программа ввода



а



б

Рис.26 а, б). Перфокарты, на которых пробита программа, приведенная в таблице 4

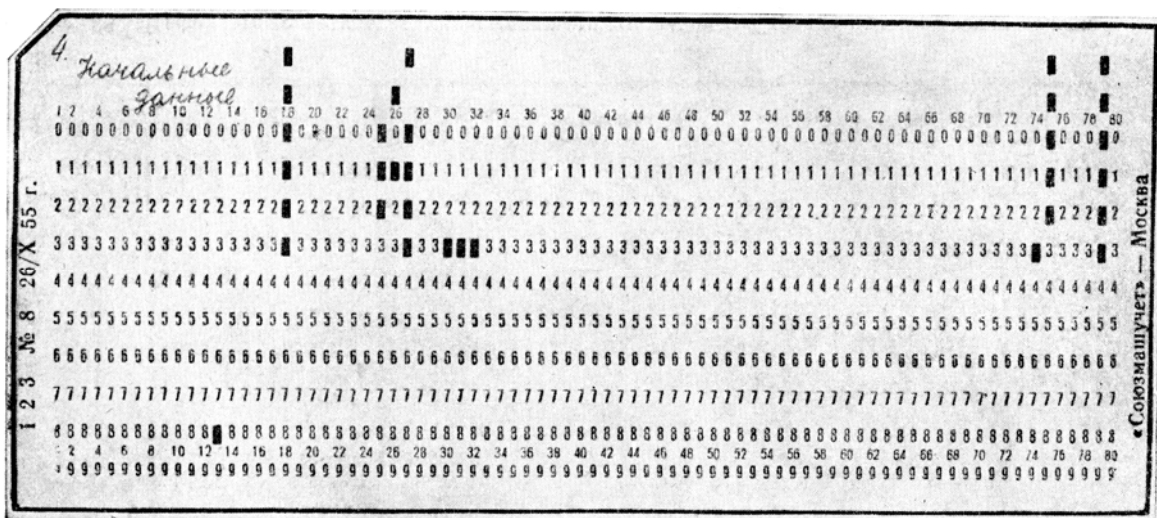


Рис.27. Перфокарта с исходными данными задачи

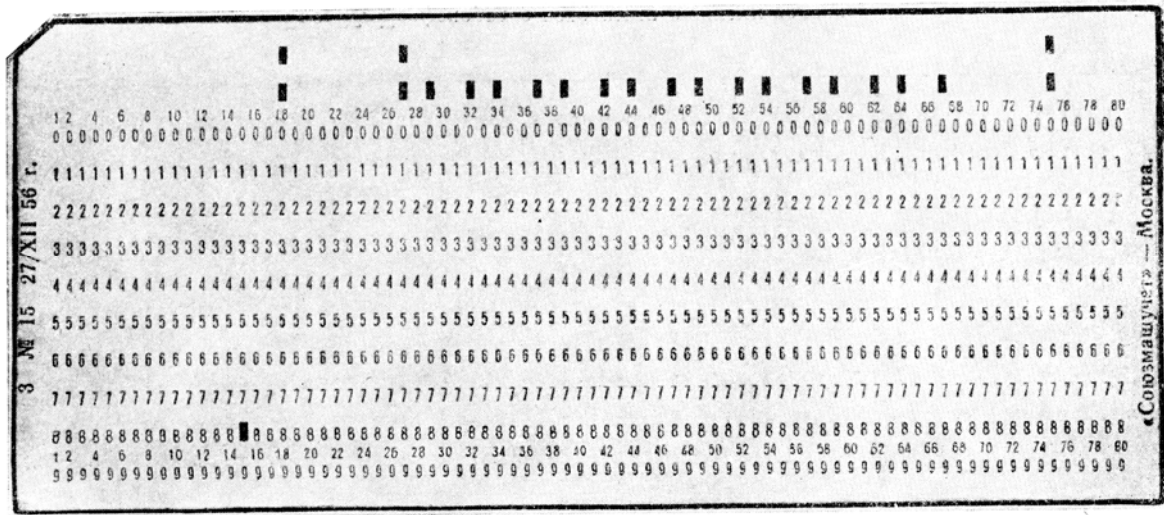


Рис.28. Перфокарта с результатами, выданными машиной «Стрела» после решения задачи

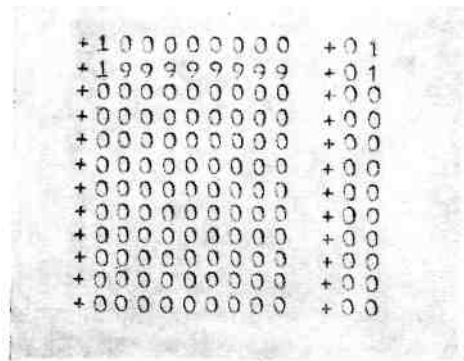


Рис. 29. Результаты, перепечатанные печатающим устройством с перфокарты, показанной на рис. 28

На рис. 28 показана перфокарта, выданная машиной «Стрела» в качестве ответа. После перепечатывания пробитых на ней чисел с помощью печатающего устройства получилась таблица, которую читатель видит на рис.29. Первые два числа этой таблицы дают нам искомый ответ:

$$x = 1, \quad y = 2.$$

Остальные числа являются нулями.

Отпечатанные на этой таблице числа следует читать следующим образом. Первые девять цифр каждой строки представляют последовательность цифр, изображающих число. Перед ними стоит знак числа (в нашем случае плюс). Последние две цифры, если перед ними стоит плюс, показывают номер позиции, после которой в указанной выше последовательности цифр следует поставить запятую. Если бы перед вторыми двумя цифрами стоял знак минус, то они означали бы количество нулей, которое необходимо поставить между первой позицией и запятой.

В нашем случае первая строка $+100\ 000\ 000 + 0,1$ означает $+ 1,000\ 000\ 00$. Вторая строка $+199\ 999\ 999 + 01$ означает $1,99\ 999\ 999$, т. е. приблизительно $+ 2$. Если читатель потрудится проверить, то увидит, что решением нашей задачи является $x=1, y=2$. Второй ответ получен с некоторой ошибкой, хотя и небольшой (ошибка равна 10^{-8}). Объясняется это тем, что машина осуществляет все операции хотя и очень точно, но не абсолютно точно.

Форму, в которой печатающее устройство представляет числа, по абсолютной величине меньше, чем $0,1$, поясняет следующий пример: число — $0,00152$ было бы отпечатано печатающим устройством в виде строки

$$-152000000-02.$$

654	+791358246	-13	554	+791358246	-13
	-862407539	+04		-862407539	+04
	+791358246	-13		+791358246	-13
	-862407539	+04		-862407539	+04
32	+791358246	-13	32	+791358246	-13
	-862407539	+04		-862407539	+04
198	+791358246	-13	198	+791358246	-13
	-862407539	+04		-862407539	+04
543	+913572468	-14	543	+913572468	-14
	-624085397	+03		-624085397	+03
	+913572468	-14		+913572468	-14
	-624085397	+03		-624085397	+03
21	+913572468	-14	21	+913572468	-14
	-624085397	+03		-624085397	+03
987	+913572468	-14	987	+913572468	-14
	-624085397	+03		-624085397	+03
432	+246813579	-15	432	+246813579	-15
	-139724086	+02		-139724086	+02
	+246813579	-15		+246813579	-15
	-139724086	+02		-139724086	+02
19	+246813579	-15	19	+246813579	-15
	-139724086	+02		-139724086	+02
876	+246813579	-15	876	+246813579	-15
	-139724086	+02		-139724086	+02
321	+468235791	-16	321	+468235791	-16
	-397140862	+09		-397140862	+09
	+468235791	-16		+468235791	-16
	-397140862	+09		-397140862	+09
98	+468235791	-16	98	+468235791	-16
	-397140862	+09		-397140862	+09
765	+468235791	-16	765	+468235791	-16
	-397140862	+09		-397140862	+09

Рис 30. Таблица чисел, перепечатанных печатающим устройством в двух экземплярах (колонках) с перфокарт

На рис. 30 показана таблица чисел, напечатанная печатающим устройством в двух экземплярах (столбцах).

Изменяемые программы. Разветвления программ. Циклические программы

Электронные цифровые программно-управляемые машины выполняют операции над числами с огромной скоростью (до нескольких десятков тысяч операций в 1 секунду). На таких машинах весьма эффективно решаются задачи, требующие выполнения сотен тысяч и миллионов арифметических действий.

Но для того, чтобы машина выполнила какое-либо из действий, в программе должна содержаться соответствующая команда. Нетрудно сообразить, что если бы для выполнения машиной миллиона действий нужно было бы составить программу, содержащую миллион команд, то одно только составление программы требовало бы

огромного количества времени.

Действительно, если бы программист потратил на составление каждой команды только 5 секунд (это очень немного, так как команды нужно составлять без ошибок и при этом тщательно обдумывать), то на составление такой программы ему потребовалось бы 5 000 000 секунд, что составляет 2 388 часов 48 минут, или 173,6 восьмичасовых рабочих дней, т. е. свыше семи месяцев. Кроме того, для ввода в память машины программы, содержащей миллион команд, нужно, чтобы память состояла не менее чем из миллиона ячеек. До сих пор таких машин создать еще не удалось (обычно оперативная память машины имеет 1024—2048 ячеек).

Следовательно, чтобы применение электронных программно-управляемых машин было действительно целесообразно, нужно, чтобы машины выполняли много операций по программе, состоящей из небольшого количества команд. Этого можно добиться путем составления таких программ, по которым машина сперва осуществляла бы ряд операций, затем сама видоизменяла нужным образом часть команд программы и снова выполняла уже видоизмененную программу, и так до тех пор, пока решение задачи не будет доведено до конца.

Команды, образующие программу, представлены в виде чисел и хранятся в ячейках памяти машины, как и всякие другие числа. Следовательно, для видоизменения команд программы можно над командами производить действия, подобно тому, как они производятся над числами, а затем вместо первоначальных уже использованных команд записывать видоизмененные команды.

Для видоизменения команд в машине «Стрела» предусмотрены две операции: операция с кодом 02, при помощи которой можно увеличивать адреса команд, и операция с кодом 15, позволяющая уменьшать адреса команд.

0125) 0045 0046 0377 0 01.

Чтобы увеличить первый адрес этой команды на 1, второй на 3 и третий на 5, нужно в какой-нибудь ячейке памяти (например, в ячейке № 0200) заранее записать вспомогательное число вида:

0200) 0001 0003 0005 0 00.

Тогда с помощью команды:

0125 0200 0125 0 02

обозначающей: «к числу (команде), хранящемуся в ячейке № 0125, поадресно прибавить число, записанное в ячейке № 0200, результат записать в ячейку № 0125 на место прежнего ее содержимого», машина преобразует нашу команду следующим образом:

0125) 0046 0051 0404 0 01.

(Напомним, что результаты поадресного сложения у нас записаны в восьмеричной системе счисления).

Точно так же с помощью команды

0125 0200 0125 0 15

гласящей: «от числа, записанного в ячейке № 0125, поадресно отнять число, хранящееся в ячейке № 0200, результат записать в ячейку № 0125», машина привела бы нашу команду к виду:

0125) 0044 0043 0372 0 01.

Теперь ясно, как можно автоматически видоизменять команды программы. Описанное изменение команд получило название переадресации. Но, кроме видоизменения уже использованных команд программы, нужно, во-первых, определить момент, когда следует и следует ли перейти к повторному выполнению команд, а во-вторых, нужно заставить машину «вернуться» обратно. Другими словами, нужно сперва проверить выполнение некоторого логического условия, затем, если это условие выполнено, перейти с конца некоторого участка программы к его началу.

Участки программы, выполняемые машиной многократно, называются циклами программы.

Участки программы, предназначенные для проверки какого-нибудь логического условия, в зависимости от выполнения или невыполнения которого машине надлежит перейти к одному из двух

возможных вариантов дальнейших вычислений, называются разветвлениями программы.

Для того чтобы цифровая программно–управляемая машина «Стрела» могла проверять выполнение логических условий, ее конструкцией предусмотрена выработка в арифметическом устройстве и передача в устройство управления сигнала ω , зависящего от результатов выполнения большинства операций. Например, при алгебраическом сложении чисел вырабатывается сигнал ω (говорят $\omega = 1$), если сумма получается отрицательной; если же сумма получается положительной или равной нулю, то сигнал ω не вырабатывается (говорят при этом, что $\omega = 0$).

Если нам нужно проверить истинность логического условия: «сумма двух чисел отрицательна», то достаточно произвести сложение этих чисел на машине «Стрела». Образование сигнала ω ($\omega = 1$) означает выполнение этого условия. Отсутствие сигнала ω ($\omega = 0$) будет говорить о том, что условие не выполнено.

Вслед за командой, проверяющей выполнение логического условия, должна быть поставлена команда условного перехода (имеющая у машины «Стрела» код операции «20»). При наличии сигнала ω машина по команде условного перехода перейдет к выполнению команды, номер которой стоит во втором адресе команды условного перехода. При отсутствии сигнала ω будет произведен переход к команде, номер которой стоит в первом адресе команды: условного перехода. Например, если команда условного перехода имеет вид

0125) 0031 0747 0000 0 20,

то при наличии сигнала ω (в результате выполнения предыдущей команды) машина перейдет к выполнению команды, хранящейся в ячейке № 0747. При отсутствии сигнала ω машина передает управление команде, которая записана в ячейке № 0031.

Пример циклической программы

Известны значения величин $\sin 1$ и $\cos 1$ (аргумент тригонометрических функций здесь задан в радианах). Требуется составить таблицу значений синусов и косинусов для целых значений аргумента, начиная от 1 и кончая 1000.

Начнем подготовку этой задачи с выбора методов ее решения и контроля правильности результатов. Известные формулы тригонометрии:

$$\begin{aligned}\sin(\alpha + \beta) &= \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \\ \cos(\alpha + \beta) &= \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta\end{aligned}\quad (3.1)$$

при замене в них буквы α буквой n и буквы β числом 1 дают:

$$\begin{aligned}\sin(n + 1) &= \sin n \cos 1 + \cos n \sin 1 \\ \cos(n + 1) &= \cos n \cos 1 - \sin n \sin 1.\end{aligned}\quad (3.2)$$

Произведя вычисления по формулам (3.2) при значении $n = 1$, получим величины $\sin 2$ и $\cos 2$. Имея эти величины и полагая в формулах (3.2) $n = 2$, можем вычислить $\sin 3$ и $\cos 3$. Продолжать этот процесс следует до тех пор, пока не будут вычислены все необходимые нам значения синуса и косинуса.

Контроль правильности вычислений можно осуществлять с помощью формулы:

$$\sin^2(n + 1) + \cos^2(n + 1) = 1. \quad (3.3)$$

Так как машина производит вычисления не абсолютно точно, то ожидать точного выполнения формулы (3.3), даже в результате правильных вычислений, мы не можем. Поэтому введем некоторое малое число, например $\varepsilon = 10^{-8}$, и потребуем вместо выполнения равенства (3.3), выполнения неравенства

$$|\sin^2(n + 1) + \cos^2(n + 1) - 1| \leq 10^{-8}. \quad (3.4)$$

Так как

$$10^{-8} = |10^{-8}|,$$

то выражение (3.4) можно переписать в следующем окончательном виде:

$$|10^{-8}| - |\sin^2(n+1) + \cos^2(n+1) - 1| \geq 0 \quad (3.5)$$

Выполнение неравенства (3.5) будет означать правильность полученных нами результатов.

Для дальнейшего рассмотрения этого примера рекомендуем читателю вооружиться карандашом и бумагой и сопровождать выкладками чтение команд приводимой ниже программы.

В случае невыполнения условия (3.5) предусмотрим останов машины с выдачей на пульт управления тех значений синуса и косинуса, которые оказались подсчитанными неверно.

Программу, как и в предыдущем примере, составим для цифровой программно-управляемой машины «Стрела». Коды операций, не встречавшиеся нам в предыдущем примере (см. табл. 1) и нужные в дальнейшем, приведены в табл. 5

Таблица 5

Наименование операции	Код операции	Пояснения
Поадресное сложение (для видоизменения команд)	02	
Вычитание абсолютных значений чисел	04	Если при выполнении этой операции результат ≥ 0 , то $\omega = 0$; если результат < 0 , то $\omega = 1$
Сравнение чисел	16	Если сравниваемые числа совпадают, то $\omega = 0$, если не совпадают, то $\omega = 1$.
Перенос чисел из одних ячеек памяти в другие	45	Для переноса n чисел во втором адресе команды нужно поставить число $n - 1$ (в восьмеричной записи).
Условный переход	20	Если $\omega = 1$, то происходит переход к команде, номер которой записан во втором адресе команды условного перехода. Если $\omega = 0$, то происходит переход к команде, указанной в первом адресе.

Исходные данные (числа $\sin 1$ и $\cos 1$ и другие) разместим в ячейках следующим образом:

Номер ячейки	$d-1$	d	$d+1$	$d+2$	$d+3$	$d+4$	...	$d+3720$
Содержимое ячейки	1	10^{-8}	$\sin 1$	$\cos 1$	Ячейки для остальных ответов			

Очевидно, для результатов нам потребуется две тысячи ячеек. Так как в восьмеричной записи число две тысячи имеет начертание 3720, то для результатов (первые два из них являются одновременно исходными данными) мы отведем ячейки, начиная с $d+1$ и кончая $d+3720$. Кроме того, запасем вспомогательные числа:

Номер ячейки	$e+1$	$e+2$	$e+3$
Содержимое ячейки	0002 0000 0000 000	0000 0000 0002 0 00	$d+3721$ $d+2$ $c+1$ 05

Для чего нужны эти числа, будет объяснено ниже. В качестве рабочих используем ячейки $c+1$, $c+2$ и т. д. Номера ячеек, хранящих программу, будем обозначать символами $a+0$, $a+1$ и т. д.

Составление команд

Начнем программу с команды перевода четырех чисел, являющихся исходными данными, в двоичную систему счисления. Результаты перевода запишем на места этих исходных данных:

$$a+0) \quad d-1 \quad 0003 \quad d-1 \quad 72.$$

Затем составим команды для вычисления по формулам (3.2) величин $\sin 2$ и $\cos 2$:

$$\begin{array}{l} a+1) \quad d+1^* \quad d+2 \quad c+1 \quad 05 \\ a+2) \quad d+2^* \quad d+1 \quad c+2 \quad 05 \\ a+3) \quad c+1 \quad c+2 \quad c+1 \quad 01 \\ a+4) \quad d+2^* \quad d+2 \quad c+2 \quad 05 \\ a+5) \quad d+1^* \quad d+1 \quad c+3 \quad 05 \end{array}$$

$$a + 6) \quad c + 2 \quad c + 3 \quad c + 2 \quad 03.$$

В результате выполнения этих команд машина вычислит $\sin 2$ и $\cos 2$ и запишет их в рабочие ячейки $c+1$ и $c+2$. Звездочками отмечены те адреса команд, которые в дальнейшем будут изменены.

Теперь составим команды для проверки выполнения условия (3.5):

$$\begin{array}{l} a + 7) \quad c + 1 \quad c + 1 \quad c + 3 \quad 05 \\ a + 10) \quad c + 2 \quad c + 2 \quad c + 4 \quad 5 \\ a + 11) \quad c + 3 \quad c + 4 \quad c + 3 \quad 01 \\ a + 12) \quad c + 3 \quad d - 1 \quad e + 3 \quad 03. \end{array}$$

По этим командам машина вычислит величину:

$$\sin^2 2 + \cos^3 2 - 1.$$

В дальнейшем по этим же командам она будет вычислять величину:

$$\sin^2 (n+1) + \cos^2 (n+1) - 1. \quad (3.6)$$

Результат вычисления записывается в ячейке $c + 3$.

Для проверки условия (3.5) применим команду, по которой будет произведено вычитание абсолютной величины выражения (3.6) из абсолютной величины числа 10^{-8} . Так как результат вычитания нам не нужен, а нужно лишь узнать, будет ли этот результат ≥ 0 (нужно значение сигнала ω), то поставим в третьем адресе команды нуль. При этом результат никуда записан не будет:

$$a+13) \quad d \quad c + 3 \quad 0000 \quad 04.$$

Если условие (3.5) выполнено, то команда $a+13$ даст $\omega = 0$. При этом вычислительный процесс должен продолжаться. В первом адресе команды условного перехода, которая должна следовать за проверкой логического условия, мы поставим число $a+16$. Если условие (3.5) не будет выполнено (при этом $\omega = 1$), то вычисление нужно прекратить. Для этого во втором адресе команды условного перехода поставим номер ячейки $a+15$, а в саму ячейку $a + 15$ поместим команду останова:

$$\begin{array}{l} a+14) \quad a + 15 \quad a + 16 \quad 0000 \quad 20 \\ a+15) \quad c + 1 \quad c + 2 \quad 0000 \quad 40. \end{array}$$

В первом и втором адресах команды останова стоят номера ячеек, хранящих вычисленные нами значения $\sin 2$ и $\cos 2$, а в дальнейшем $\sin (n+1)$ и $\cos (n+1)$. Поэтому в случае останова из-за неправильного счета на пульт управления будут выданы значения синуса и косинуса, полученные с ошибкой.

В ячейку $a+16$ поместим команду переноса полученных значений синуса и косинуса в ячейки, отведенные для окончательных результатов. К этой команде машина перейдет лишь в том случае, если синус и косинус вычислены верно:

$$a+16) \quad c+1 \quad 0001 \quad d = 3* \quad 45.$$

Затем составим команды, видоизменяющие ту часть программы, которая предусматривает вычисления по формулам (3.2), а также последнюю команду. Очевидно, нужно адреса команд, помеченные звездочками, увеличить на 2 единицы. Теперь нам пригодятся вспомогательные числа, запасенные в ячейках $e+1$ и $e+2$:

$$\begin{array}{l} a + 17) \quad a+1 \quad e+1 \quad a+1 \quad 02 \\ a + 20) \quad a+2 \quad e+1 \quad a+2 \quad 02 \\ a + 21) \quad a+4 \quad e+1 \quad a+4 \quad 02 \\ a + 22) \quad a+5 \quad e+1 \quad a+5 \quad 02 \\ a + 23) \quad a+16 \quad e+2 \quad a+16 \quad 02. \end{array}$$

Далее составим команды, проверяющие, не окончен ли процесс вычисления значений синуса и

косинуса. Для этого определим окончательный вид одной из изменяемых команд нашей программы (тот вид, который она должна принять после вычисления последнего из искомых результатов), например команды, записанной в ячейке $a+1$. При каждом изменении этой команды ее первый адрес увеличивается на две единицы. Изменяться она должна 999 раз, после чего будут вычислены величины $\sin 1000$ и $\cos 1000$. Но после вычисления этих величин команда будет увеличена еще один раз, прежде чем машина приступит к описываемой нами сейчас проверке. Следовательно, первый адрес команды номер $a+1$ будет к этому моменту увеличен на 2000 единиц ($2 \cdot 1000$). В восьмеричной системе счисления это число имеет начертание 3720. Следовательно, интересующий нас первый адрес примет вид:

$$d+1+3720 \text{ или } d+3721.$$

Команда номер $a+1$, таким образом, будет иметь вид:

$$d+3721 \quad d+2 \quad c+1 \quad 05.$$

Именно эта команда и записана в качестве вспомогательного числа у нас в ячейке $e+3$.

Предусмотрим в программе сравнение команды номер $a+1$ с этим вспомогательным числом. До тех пор, пока не совпадут сравниваемые числа (пока будет $\omega=1$), процесс вычислений не будет окончен. При этом управление нужно передать команде номер $a+1$ для повторного выполнения начальной части программы (ее команды соответствующим образом видоизменены). Как только произойдет совпадение сравниваемых чисел, процесс вычислений будет окончен.

Команда сравнения будет иметь вид:

$$a+24) \quad a+1 \quad e+3 \quad 0000 \quad 16.$$

Она гласит: «Сравнить числа, хранящиеся в ячейках $a+1$ и $e+3$ ».

Вслед за командой сравнения поставим команду условного перехода:

$$a+25) \quad a+26 \quad a+1 \quad 0000 \quad 20.$$

Наконец, закончим программу командами перевода результатов в десятичную систему, выдачи результатов на перфокарты и останова машины:

$$\begin{array}{l} a+26) \quad d+1 \quad 3717 \quad d+1 \quad 70 \\ a+27) \quad d+1 \quad 3717 \quad 0000 \quad 44 \\ a+30) \quad 0000 \quad 0000 \quad 00C0 \quad 40. \end{array}$$

Остается присвоить буквам конкретные значения и получить программу в ее окончательном виде.

Этот пример поясняет нам, каким образом могут быть построены программы, состоящие из небольшого числа команд и заставляющие машину произвести большое количество вычислений. Одновременно пример показывает что программирование — это работа, требующая от программиста большого напряжения умственных сил. Для облегчения программирования разработана специальная методика, так называемый операторный метод программирования. Однако и при использовании этой методики программирование сложных задач представляет большие трудности.

Борьба за уменьшение этих трудностей ведется в двух направлениях. Одно из них состоит в том, что при вычислительных центрах создаются библиотеки программ, в которых накапливаются часто применяемые программы или даже части программ. Второе направление вылилось в разработку специальных программирующих программ, по которым машина сама составляет рабочие программы путем переработки вводимой в ее память информации об алгоритме решения задачи.

В настоящее время каждый крупный вычислительный центр имеет у себя и библиотеку программ и программирующую программу.

Решение математических задач

Развитие науки и техники, принявшее особенно грандиозный размах с начала XX в., выдвинуло ряд труднейших математических задач и потребовало выполнения больших вычислений за короткие сроки.

Электронные программно–управляемые машины возникли как средство сверхбыстрых вычислений. Вскоре, однако, стало ясно, что возможности этих машин далеко выходят за рамки возможностей автоматов скоростного вычисления.

Приступая к обзору применений цифровых программно–управляемых машин, остановимся сперва на их математических возможностях.

Электронные цифровые программно–управляемые машины могут осуществлять вычисления с высокой точностью. Читатель уже знает, что такие машины, как «Стрела» и «БЭСМ», оперируют с Двоичными числами, отвечающими 9—11–разрядным десятичным числам. Быстродействие этих машин достигает тысяч и даже десятков тысяч операций в секунду. Даже машина, считающая со скоростью 2000 операций в секунду (такая скорость вычислений теперь считается небольшой), превышает скорость работы вычислителя примерно, в 40 000 раз (как известно, вычислитель, применяющий счетно–клавишный автомат, расходует на каждую операцию около 20 сек.).

Практика применения больших цифровых машин. Показала, что наиболее выгодно использовать их для решения задач, имеющих небольшое количество исходных данных и результатов, но требующих большого количества вычислений, особенно, если необходимо решение серии вариантов такой задачи при различных значениях входящих в нее параметров или других исходных данных.

К числу математических задач, эффективно решаемых на электронных программно–управляемых цифровых машинах, относятся следующие:

Системы алгебраических уравнений, выдвигаемые геодезией, астрономией, строительной механикой и т. д.

Системы обыкновенных дифференциальных уравнений, весьма важных и распространенных в инженерном деле, внешней и внутренней баллистике управляемых и неуправляемых снарядов, в аэродинамике, теории автоматического регулирования и т. д.

Дифференциальные уравнения в частных производных, выдвигаемые газовой динамикой, радиотехникой, оптикой, гидродинамикой, теплотехникой, метеорологией и т. д.

Задачи на отыскание собственных значений дифференциальных операторов, весьма важные в атомной физике, акустике, квантовой механике и т. д.

Вычисление кратных интегралов высокой кратности, встречающихся в ряде задач теоретико–вероятностного характера и т. д.

Решение всех этих задач осуществляется численными методами, т. е. искомую функцию при машинном решении задачи получают не в виде аналитической формулы, а в виде таблицы ее значений. Само решение производят путем вычисления по формулам, содержащим лишь четыре основных действия арифметики. В математике разработано большое количество численных методов для различных классов задач.

Нельзя обойти молчанием численный метод, применение которого стало возможным только после появления быстродействующих цифровых вычислительных машин. Это так называемый метод статистических испытаний, или метод Монте-Карло (последнее название происходит от города Монте-Карло, знаменитого своими игорными домами, в которых, в частности, ведется игра в рулетку).

Сущность метода Монте-Карло состоит в следующем. Выбирают какой–либо случайный процесс, при многократном осуществлении которого вероятность некоторого результата численно равна искомому решению задачи. Появление этого результата при осуществлении случайного процесса называют благоприятным случаем. Выбранный процесс имитируют на электронной цифровой программно–управляемой машине. Случайный характер процесса обеспечивается применением случайных чисел, выбираемых из специальных таблиц или вырабатываемых специальным прибором — датчиком случайных чисел. При многократном осуществлении в машине имитации процесса фиксируется количество испытаний (имитаций) и количество благоприятных случаев. Произведя большое количество испытаний, определяют отношение числа благоприятных случаев к общему числу испытаний. Это отношение известно в теории вероятностей под названием частности. По закону больших чисел с высокой степенью уверенности можно утверждать, что полученная частость весьма близка к

вероятности и, следовательно, является приближенным ответом подлежащей решению задачи.

Легче всего пояснить сущность метода Монте-Карло на примере вычисления теоретико-вероятностных интегралов.

Так, для вычисления интеграла, выражающего вероятность поражения артиллерийским снарядом некоторой цели, производится серия испытаний, каждое из которых заключается в выборе трех случайных чисел из большой таблицы случайных чисел или в получении их с помощью датчика. Эти три числа считают отклонениями координат точки попадания от координат цели. Квадратный корень из суммы квадратов этих отклонений дает «расстояние» от цели до точки попадания. Если полученное расстояние меньше определенной величины (заранее известной для каждого типа снарядов), то цель считается пораженной.

В той же программе, по которой в машине осуществляется описываемый процесс, предусматривается подсчет количества «поражений цели» и общего количества «выстрелов» (то есть всех испытаний). Отношение первого количества ко второму (частота попадания) при достаточно большом количестве испытаний (порядка нескольких десятков тысяч) оказывается близким к искомому значению интеграла.

Решение кратных теоретико-вероятностных интегралов методом Монте-Карло занимает лишь несколько десятков минут машинного времени по сравнению с сотнями часов, расходуемых в случае применения других методов.

Метод Монте-Карло успешно используется для решения также многих других задач, например дифференциальных уравнений в частных производных параболического и эллиптического типа, и др.

Программы, по которым цифровые машины осуществляют решение задач методом Монте-Карло, в ряде случаев бывают довольно простыми. Наибольшую трудность представляет получение достаточного количества случайных чисел, так как небольшая емкость оперативной памяти машины не допускает ввода в нее больших таблиц этих чисел (нужны же таблицы, содержащие миллионы чисел). Как уже говорилось, существуют специальные датчики случайных чисел (например, радиоактивные датчики), которые на время решения какой-либо задачи методом Монте-Карло подключаются к машине и обеспечивают достаточно быстрое поступление в ее память вырабатываемых ими случайных чисел.

Решение задач логического характера

Электронные цифровые программно-управляемые машины, кроме основных четырех арифметических действий, могут выполнять над числами еще целый ряд неарифметических операций. Например, машина «Стрела» может выделять из последовательности цифр, изображающих число, отдельные части этой последовательности (или, как говорят, — «выделять части числа»), может из таких частей составлять новые числа, может сдвигать последовательности цифр в разрядах ячейки влево или вправо и т. д.

Любая информация, в том числе и нематематическая, может быть закодирована с помощью чисел. Действительно, если какую-либо информацию можно передать словами, то перенумеровав буквы и заменив их в словах отвечающими им числами, мы получим числовой код этой информации. Это доказывает возможность закодировать в виде чисел любую информацию, передаваемую словами, но вовсе не означает, что такой способ кодировки является единственно возможным или самым наилучшим. Во всяком случае наш пример убеждает в том, что любая информация, передаваемая словами, может быть введена в память машины. С помощью соответствующим образом составленной программы эта информация может быть подвергнута самым разнообразным преобразованиям.

Как известно, умственная работа человека состоит в преобразовании информации. Если известны правила, по которым выполняется эта умственная работа, т. е., если известен алгоритм преобразования информации, то можно составить программу, по которой машина будет выполнять те же преобразования введенной в нее информации, какие производил бы человеческий мозг.

Конечно, не всякие умственные действия человека выполняются им по определенным строго установленным правилам. Например, поэт, сочиняющий стихи, далеко не весь творческий процесс осуществляет по строго установленным правилам. То же можно сказать о композиторе, сочиняющем музыкальное произведение, и вообще о любом человеке, выполняющем творческую работу.

Те виды умственного труда, которые человек выполняет по строго установленным правилам, называются формальными видами умственного труда. Для выполнения формальных видов умственного труда могут быть применены электронные программно-управляемые машины. Еще раз подчеркнем, что для этого нужно составить соответствующие программы, а для составления программ необходимо знать алгоритмы преобразования информации (например, полные перечни правил, по которым человек выполняет эти виды

работы).

Ниже мы приводим краткие сведения о применениях цифровых электронных программно-управляемых машин для выполнения некоторых формальных видов умственного труда невычислительного характера.

Автоматическое программирование

Как уже говорилось выше, составление программ для решения математических задач представляет собой трудоемкую и утомительную работу. Значительная часть действий, выполняемых при этом программистом, имеет ярко выраженный формальный характер, и эту часть программирования можно возложить на электронную цифровую машину.

Всякий вычислительный процесс, как легко видеть, состоит из ряда самостоятельных этапов — логических и арифметических. Логические этапы состоят в проверке различных логических условий с целью выбора формул, по которым надлежит осуществлять вычислительный процесс; арифметические этапы представляют собой счет по выбранным формулам. Количество и чередование таких этапов зависит от характера решаемой задачи.

Например, для решения квадратного уравнения

$$ax^2 + bx + c = 0$$

по общеизвестной формуле

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

сперва вычисляют величину $b^2 - 4ac$ (арифметический этап). Затем нужно проверить, является ли полученный промежуточный результат отрицательным или нет (логический этап). Если этот промежуточный результат отрицателен, то в качестве ответа получают два комплексных числа, вычисляемые по формулам (арифметический этап):

$$x_1 = -\frac{b}{2a} + i \frac{\sqrt{4ac - b^2}}{2a}$$

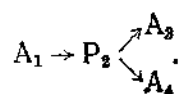
$$x_2 = -\frac{b}{2a} - i \frac{\sqrt{4ac - b^2}}{2a}$$

Если промежуточный результат не отрицателен, то дальнейший счет ведут иначе, по формулам (арифметический этап):

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Этапы вычислительного процесса получили название операторов. Если обозначать арифметические этапы буквой А, а логические этапы — буквой Р, то вычислительный процесс, осуществляемый при решении квадратного уравнения, можно описать следующей схемой:



Эта схема в теории программирования называется схемой счета.

Чтобы решение квадратного уравнения было автоматически произведено цифровой программно-управляемой машиной, кроме вышеописанных операторов (этапов), в вычислительный процесс должны быть включены еще операторы (этапы), характерные для машинного счета. Именно: оператор П — ввод программы и исходных данных в машину; оператор A_0 — перевод введенных исходных данных в двоичную систему счисления; оператор A_5 — перевод результатов в десятичную систему счисления; оператор Π_6 — выдача результатов на перфокарты и, наконец, оператор $Я_7$ — останов машины. После присоединения этих операторов к схеме счета она примет вид:

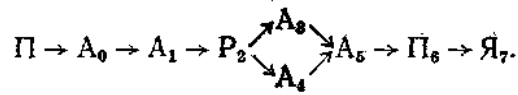
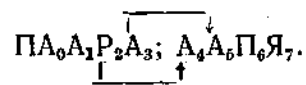


Схема такого вида называется логической схемой программы. Обычно логическую схему программы пишут в одну строку и стрелки между знаками непосредственно следующих друг за другом операторов опускают. Если между рядом записанными операторами нет передачи управления, между ними ставят точку с запятой. Например, логическая схема указанной программы может быть записана так:



В программе каждый оператор представлен в виде некоторой группы команд.

Кроме перечисленных операторов, в логических схемах часто встречаются операторы F — переадресации, O — восстановления (переадресованных команд) и др. Здесь переадресацией называется уже знакомая нам операция прибавления (или вычитания) вспомогательных чисел к адресам команд.

Анализ большого количества программ и логических схем показал, что чаще всего в них встречаются арифметические операторы, логические операторы, операторы переадресации и операторы восстановления.

В настоящее время в Советском Союзе в ряде вычислительных центров эксплуатируются программирующие программы, которые составляют рабочие программы, основываясь на описанном выше операторном методе. Такие программирующие программы состоят из ряда крупных самостоятельных частей, последовательно включаемых в работу и называемых блоками. В состав одной из таких программ, известной под названием ПП-С (программирующая программа для машины «Стрела»), входят следующие блоки:

- Р — логический блок,
- А — арифметический блок,
- С — блок стандартных подпрограмм,
- F — блок переадресации,
- Э — блок экономии рабочих ячеек,
- O — блок операторов восстановления,
- П — блок присвоения действительных адресов.

Для составления рабочей программы с помощью ПП-С сперва составляют логическую схему программы и точно определяют содержание каждого, входящего в нее оператора. Затем о каждом операторе составляется информация. Для блока А информацией являются арифметические формулы. Для блока Р — арифметические формулы и неравенства и логические формулы. Соответствующим образом задается информация и для блоков F, O и П.

Блок С этой программирующей программы позволяет включать в новую программу части из ранее составленных программ (они здесь названы стандартными подпрограммами). Кроме того, отдельные части программы, не являющиеся операторами тех видов, которые способна вырабатывать ПП-С, могут быть по особым правилам запрограммированы вручную программистом и тоже с помощью ПП-С включены в составляемую программу.

Вместо действительных номеров ячеек и адресов ПП-С использует при составлении программ так называемые условные числа, каждое из которых, с одной стороны, является кодом буквы или числа, входящих в расчетные формулы, а с другой стороны, обозначает некоторую ячейку памяти машины.

Блок II на основании таблицы распределения памяти, составленной программистом, заменяет условные числа действительными номерами ячеек и адресами и выдает на перфокарты готовую рабочую программу.

Использование программирующей программы значительно сокращает время программирования. Например, если при ручном составлении программы требуется две недели работы программиста, то для подготовки исходной информации и ее кодировки требуется 3—4 рабочих дня, а переработка этой информации в готовую программу выполняется машиной «Стрела» за 8—12 минут.

Машинный перевод с одного языка на другой

Долгое время считалось, что перевод с одного языка на другой можно осуществить только понимая переводимый текст, что переводчик должен прочитать текст на одном языке, понять его содержание, а затем изложить это содержание на другом языке.

Однако анализ процесса перевода и структуры языков показал, что работа по переводу является формальной умственной работой. Удалось составить системы правил — алгоритмы, по которым можно производить перевод с английского языка на русский и с французского языка на русский, пользуясь словарем и не понимая ни того языка, с которого делается перевод, ни того языка, на который переводится.

В Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР была составлена программа для переводов математических текстов с английского языка на русский с помощью цифровой программно-управляемой машины «БЭСМ».

В Математическом институте им. Стеклова АН СССР в настоящее время заканчиваются программы для перевода с английского языка на русский и с французского языка на русский с помощью машины «Стрела».

Для машинного перевода буквы первого и второго языков перенумерованы и слова, таким образом, закодированы в виде чисел. Перевод осуществляется с помощью специального «машинного» словаря, состоящего из двух частей,— например, английской и русской. В отличие от обычного словаря, в котором отвечающие друг другу слова записаны рядом, английская и русская части словаря в памяти машины хранятся отдельно. Каждое слово английской части словаря снабжено дополнительными кодами (признаками), а именно — номерами тех слов русской части словаря, которые являются эквивалентами данного английского слова, и некоторыми другими.

Подлежащий переводу английский текст в закодированном виде вводят в память машины. Под воздействием «переводящей программы» машина последовательно выбирает из текста группы слов, начинающихся с одинаковой буквы, и путем сравнения со словами, запасенными в английской части словаря, находит номера соответствующих русских эквивалентов. Суффиксы и временные и числовые окончания переводимых слов, дополнительные признаки, содержащиеся в английской части словаря, а также взаимное расположение слов в английских фразах используются для расположения русских слов в необходимой последовательности и для придания им необходимых падежных, временных и других окончаний.

Русские слова выбираются машиной из русской части словаря. Предложения английского текста переводятся последовательно и выдаются в числовом коде на перфокарты. Декодировать полученный перевод, т. е. заменить числовой код на буквенный, можно с помощью автоматического дешифратора, печатающего текст обычными буквами.

Пока еще машинный перевод находится на начальной стадии своего развития. С помощью машин удастся производить переводы лишь специальных научных текстов. Обусловлено это тем, что для перевода таких текстов требуются сравнительно небольшие словари (порядка 1500—2000 слов). Кроме того, в научных текстах отсутствуют идиомы (непереводимые выражения вроде «подложить свинью», «вот где собака зарыта» и т. п.), для перевода которых потребовался бы специальный словарь идиом. Составление переводящих программ для научных текстов облегчается и тем, что в научных текстах сравнительно мало многозначных слов (имеющих на втором языке несколько эквивалентов). Однако уже сейчас с уверенностью можно утверждать, что перспективы в области применения машин для переводов весьма обширны.

Игра машин в различные игры

При составлении программ решения задач логического характера наибольшую трудность представляет

изыскание решающего алгоритма и придание ему такого вида, который позволил бы его выполнять за достаточно короткое время. Для многих логических задач решение можно получить путем перебора и оценки большого количества комбинаций различных условий. Такой перебор даже от быстродействующей цифровой программно-управляемой машины может требовать огромного расхода времени. Поскольку область игр позволяет найти логические задачи, представляющие сравнительно небольшие трудности, в порядке изыскания методики составления решающих алгоритмов был составлен ряд программ, по которым машина играет в различные игры.

Не нужно думать, что программы, по которым машины играют в различные игры, составляются для того, чтобы переложить эти игры с человека на машину. Игры вроде шахмат, ним и другие являются увлекательным и полезным умственным спортом, и, конечно, человек всегда будет играть в них сам.

Как уже говорилось, составлением «играющих программ» занимаются для изучения методики составления решающих алгоритмов. Кроме того, рассматривая такие программы и наблюдая машинную игру, изучают логические возможности цифровых программно-управляемых машин.

Программа для игры в ним. Ним это игра (вернее целая группа игр), известная еще в древнем Китае. Правила игры в ним следующие. Какие-либо фишки складывают в три кучки. Количество фишек в каждой кучке может быть различным (например, 10, 11 и 45) и известно обоим играющим. По жребию определяют, кому принадлежит первый ход. Каждый ход состоит в том, что игрок фиксирует внимание на одной из трех кучек по произволу, и удаляет из этой кучки любое число фишек (можно взять одну, две, а можно — и все сразу, но только из одной кучки). Выигрывает тот, чья «последняя рука», т. е. тот, кто при своем ходе заберет все фишки, ничего не оставив противнику.

Н. А. Криничкиным составлена программа, по которой машина «Стрела» играет в ним против человека. При исследовании игры оказалось, что для каждого игрока может существовать одна из двух ситуаций. При наличии первой ситуации игрок всегда может делать ходы, ведущие его к бесспорному выигрышу. При наличии второй ситуации игрок может проиграть при правильной игре противника. Его выигрыш становится возможным только при условии ошибки в игре противника.

Программа составлена так, что при наличии для игрока-машины первой ситуации машина всегда совершает только правильные ходы. При наличии для нее второй ситуации машина делает ходы, при которых ошибка со стороны противника наиболее вероятна.

Внешне игра машины с человеком выглядит так. На картонном листе, разграфленном на три части, раскладывают фишки. Оператор — человек, работающий за пультом управления «Стрелы», вводит с пульта в память машины информацию о том, сколько фишек лежит в каждой кучке и кому принадлежит первый ход, машине или ее противнику. После каждого хода противника с пульта вводят информацию о том, из которой кучки сколько фишек он взял, и нажимают кнопку с надписью «пуск». В течение, примерно, полсекунды, машина «обдумывает» свой ход, т. е. производит преобразование информации, в результате чего получается ответ машины. Затем машина останавливается и на пульте вспыхивают лампочки, по которым можно узнать, из которой кучки и сколько машина «берет» фишек. Если машина находится в ситуации бесспорного выигрыша, то загорается еще дополнительный ряд лампочек. По последнему признаку человек, демонстрирующий игру машины, заранее знает, что противник машины должен проиграть.

Игра машины «Стрела» в ним против человека проводилась уже много раз, при этом оказалось, что машина играет в ним в сотни раз быстрее человека и не совершает ошибок, которые нередко допускает даже игрок, хорошо знающий алгоритм игры в ним.

Решение шахматных задач. В. М. Курочкин составил для машины «Стрела» программу, по которой эта машина решает шахматные задачи. Обычно шахматная задача формулируется так: задана некоторая позиция на шахматной доске; белые начинают и выигрывают за столько-то ходов.

Решение шахматных задач машина производит путем перебора всех возможных ходов белых, всех возможных со стороны черных ответов на каждый ход и т. д. и т. д.

Оказалось, как и следовало ожидать, что при увеличении числа ходов в условии задачи время, расходуемое машиной на ее решение, резко возрастает. Двухходовые задачи машина решает быстрее, чем человек (примерно за 2—4 минуты), а трех- и четырехходовые — медленнее расходуя на них 10—12 и более минут. Объясняется это тем, что машина перебирает все возможные ходы, ответы на них, вторые ходы и т. д., в том числе и явно плохие. Человек же, решающий шахматную задачу, большую часть ходов не продумывает, оценивая их как плохие по признакам, которые пока что сформулировать не удалось, а потому и нельзя было «вложить» в программу.

Игра программно-управляемой машины в шахматы. В. Д. Кукушкиным составлена

программа, по которой машина разыгрывает шахматный двухслоновый эндшпиль, т. е. играя белыми, представленными на доске двумя слонами (чернопольным и белопольным) и королем, против черных, имеющих только короля, делает мат черному королю.

Алгоритм игры, положенный в основу этой программы, состоит в следующем. Производится анализ взаимного расположения фигур на доске. (Координаты фигур с пульта должны быть введены в память машины. Информация о каждом ходе противника тоже вводится с пульта, а ответ машины выдается на пульт с помощью загорающихся лампочек.) Каждому их взаимному расположению поставлен в соответствие определенный ход, который и выдается машиной в виде ответа.

Таким образом, программа реализует алгоритм слонового эндшпиля, описанный в ряде учебников шахматной игры. Человек, играющий в шахматы, обычно выучивает алгоритмы эндшпилей наизусть.

Г. Шлибсом описана программа для игры электронной программно-управляемой машины в шахматы, основанная на использовании «функции позиции».

Каждой шахматной фигуре приписан определенный «вес»: королю — 200, ферзю — 9, ладье — 5, слону и коню — 3, пешке — 0,5. Кроме того, определенным элементам позиции, таким, как пат, сдвоенность пешек, подвижность легких фигур и т. п. тоже приписаны веса. Символы Kp , Φ , L , C , K , n (являющиеся общеизвестными сокращенными обозначениями названий фигур) обозначают переменные, равные числу соответствующих фигур, присутствующих на доске. Теми же символами со штрихами обозначены переменные, отвечающие фигурам противника.

Функция позиции имеет вид:

$$f(P) = 200(Kp - Kp') + 9(\Phi - \Phi') + 5(L - L') + 3(C - C') + 3(K - K') + 0,5(n - n') + \dots$$

Машина осуществляет по описываемой программе выбор хода путем перебора всех возможных ходов и всех возможных ответов на три хода вперед. Выбирается тот ход, который обещает через три хода привести к наибольшему значению функции позиции.

По этой программе машина может выиграть у слабого или даже у среднего игрока. Сильный игрок, способный продумать партию на большее число ходов вперед, чем это делает машина, безусловно, выиграет у нее. Во всяком случае, машина не упустит возможности «убить» короля противника (т. е. объявить ему мат), если это можно сделать не более чем в три хода. Своей фигуры она тоже не «прозевает».

Другие задачи логического характера

В иностранной литературе появлялись сведения о решении с помощью электронных программно-управляемых машин еще ряда других задач логического характера.

Например, в США была составлена программа, по которой машина ставит диагноз и прописывает рецепты.

Врач, осматривающий больного, заносит результаты своего осмотра в специальную анкету. В эту анкету вносятся такие сведения, как температура больного, его кровяное давление, результаты анализов крови, мочи и т. д., а также наличие или отсутствие различных болезненных симптомов. После заполнения этой анкеты собранная информация вводится в машину и обрабатывается в ней путем сопоставления с хранящимися в памяти машины данными о признаках различных болезней. Путем таких сопоставлений машина определяет наиболее правдоподобный комплекс заболеваний, которому должны сопутствовать те признаки, которые были обнаружены врачом у больного, т. е. ставит диагноз. Когда диагноз поставлен, составление рецепта не представляет уже трудностей. Для этой цели в памяти машины хранится своего рода «словарь», ставящий в соответствие названию каждой болезни определенный рецепт.

В качестве курьеза упомянем о составленной в США программе, по которой цифровая программно-управляемая машина «помогает» человеку, желающему вступить в брак, выбрать себе супругу.

Желающий вступить в брак заполняет анкету, в которой указывает свой возраст, внешние признаки (рост, цвет волос и глаз и т. п.), профессию, материальное положение, вкусы (например, что ему нравятся блондинки и т. п.), описывает свои привычки (например, указывает, что любит ходить в кино и т. д.). Информация, собранная в этой анкете, вводится в машину и после обработки машина выдает ответную анкету, в которой указаны признаки «наиболее подходящей» для данного человека супруги.

Авторы программы утверждают, что при ее составлении руководствовались большим статистическим материалом.

В США широкое применение получили цифровые программно-управляемые машины для банковских расчетов, различных расчетов экономического характера, связанных с выбором всяких

оптимальных вариантов, и т. д.

Применение электронных цифровых машин для целей автоматического управления

Электронные цифровые машины находят широкое применение в качестве управляющих машин. Объектами могут являться как отдельные агрегаты (станки, самолеты, ракеты, радиолокаторы и т. д.), так и сложные комплексы различных машин и агрегатов (цехи, заводы, электростанции и т. д.). Электронные цифровые машины применяются для управления воздушным движением в районе крупных аэродромов, для диспетчерской службы на больших железнодорожных станциях.

Сущность процесса управления сводится к тому, чтобы на основе анализа информации о текущем состоянии управляемой системы и заданных законов управления (алгоритма или программы управления) выдавать команды, определяющие действия различных объектов системы. Общая цель управления состоит в том, чтобы либо поддерживать состояние системы на заданном уровне, либо обеспечить изменение этого состояния в требуемом направлении и в нужное время. Отсюда вытекают основные особенности управляющих электронных цифровых машин и их отличия от цифровых вычислительных машин.

К этим особенностям относится необходимость непосредственной связи управляющей цифровой машины с управляемыми объектами, которая бы обеспечивала получение необходимой информации и передачу команд управления. Обычно физические параметры, характеризующие состояние любой системы, являются величинами непрерывными: температура, давление, перемещение детали, угол поворота вала и т. д., поэтому устройства ввода данных в управляющую машину в общем случае должны включать в себя какие-либо измерительные устройства — датчики — и обеспечивать преобразование непрерывных величин в двоичный цифровой код. Управляющие воздействия также имеют обычно непрерывную форму (перемещение дроссельных заслонок, увеличение или уменьшение питающих напряжений, изменение угла поворота рулевых колес и т.д.). Поэтому выходные устройства управляющих машин должны включать в себя в общем случае и устройства преобразования цифровых команд в непрерывные величины. Часто такие преобразователи находятся на значительном расстоянии от управляющей машины и конструктивно оформлены как одно целое с управляемым объектом, но это не меняет существа дела.

Вторая особенность управляющих цифровых машин — это необходимость работать с высокой скоростью, чтобы темп работы машины практически не отличался от темпа управляемых объектов и обеспечивалось соответствие между вырабатываемыми машиной командами управления и действительным состоянием управляемого объекта. При медленной работе цифровой управляющей машины и большом объеме вычислений будут иметь место значительные запаздывания в выдаче команд, что приведет к несоответствию команд реальному положению, и вместо устойчивого регулирования такие команды могут вызвать, наоборот, появление неустойчивости в работе.

Третьей важной особенностью управляющих цифровых машин является необходимость высокой надежности в работе. Если для электронных цифровых вычислительных машин сбои в работе не являются катастрофически опасными, так как приводят в конечном счете к уменьшению производительности, к необходимости повторного решения задач, затрате времени на отыскание неисправностей и т. д., то в работе управляющих цифровых машин сбои практически должны быть исключены, так как иногда даже единичный случай нарушения работы машины может привести к аварии или к остановке целого производства. В настоящее время основным и наиболее перспективным путем повышения надежности электронных цифровых машин является внедрение надежных полупроводниковых элементов и ферритов и разработка надежных схем и узлов машин на этих элементах. Но техника сегодняшнего дня еще не обеспечивает достаточной надежности электронных цифровых машин только этим путем. Поэтому при построении управляющих цифровых машин применяют метод дублирования основных блоков, узлов и даже целых машин, чтобы при выходе из строя какого-либо блока можно было на некоторое время предотвратить выход из строя всей системы. Конечно, с течением времени может выйти из строя и запасной блок, но наличие некоторого промежутка времени, пока он действует, позволяет принять необходимые меры по восстановлению полной работоспособности системы.

Применение электронных цифровых машин для целей автоматического управления открыло необычайно широкие перспективы в этой области. Стали вполне реальными планы создания полностью автоматизированных заводов, электростанций, боевых комплексов и т. д. Стало возможным резкое

повышение темпов работы станков, выпускающих массовую продукцию, повышение точности обработки при значительном сокращении обслуживающего персонала.

Две основные особенности электронных цифровых машин обеспечили их широкое и успешное применение в качестве управляющих машин: наличие памяти, позволяющей машине хранить программу работы, накапливать информацию, поступающую извне, запоминать различные данные, характеризующие работу самой цифровой машины в процессе управления (путем смены программы одну и ту же машину можно использовать для управления различными объектами); наличие условных переходов в программе работы машины, которые позволяют ей оценивать поступающую извне информацию и менять ход процесса управления в соответствии с требованиями обстановки.

Естественно, что в программе работы цифровой машины должны быть заранее предусмотрены необходимые критерии для выполнения машиной требуемых оценок, а также указаны необходимые варианты изменения процесса управления в зависимости от выполнения того или иного условия. Можно представить и более сложные случаи работы управляющей цифровой машины, когда машине не заданы четкие критерии оценки обстановки, но тогда должны быть заданы правила получения этих критериев и их применения в тех или иных случаях.

Электронные цифровые управляющие машины позволяют осуществлять так называемое оптимальное управление процессами. При этом машина, получив сведения о действительном состоянии управляемого объекта в данный момент времени, просчитывает целый ряд вариантов поведения системы при тех или иных возможных командах управления. Сравнивая эти варианты между собой, машина выбирает оптимальный вариант, т. е. вариант, который лучше других удовлетворяет заданным критериям, например, обеспечивает минимальное время колебательных процессов, или наименьшее отклонение от требуемого значения величины, определяющей положение объекта, и т. п. Найдя оптимальный вариант, машина выдает для исполнения команду, соответствующую этому варианту. Нетрудно видеть, что в данном случае имеет место аналогия с процессом моделирования динамических систем, описанным в начале II главы для машин непрерывного действия. Действительно, для расчета и оценки вариантов поведения управляемого объекта при различных способах управления в машину должна быть введена полная система дифференциальных уравнений, описывающих движение всей системы автоматического регулирования. Машина решает многократно эту систему и по существу «методом проб» выбирает наилучшие команды управления. Разрабатываются и другие способы поиска машиной оптимальных решений, в частности вариационные методы, основанные на знании теории протекания процессов управления. Мы на них останавливаться не будем.

* * *

Приведенный краткий обзор применения цифровых программно-управляемых машин дает возможность уяснить, какую большую роль должны играть эти машины в народном хозяйстве нашей страны.

Механизация формальных видов умственного труда освободит квалифицированных специалистов от трудоемкой и утомительной работы и даст им возможность направить свои усилия на творческую работу. Огромное повышение производительности умственного труда ученых и инженеров вследствие широкого использования цифровых программно-управляемых машин обеспечит быстрый дальнейший прогресс науки и техники. Создание автоматизированных заводов, управляемых с помощью цифровых машин, сделает также необычайно высокой производительность физического труда.