

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. П. КОРОЛЕВА

Ю. П. МАЛИНОВ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА В ИНЖЕНЕРНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ЧАСТЬ I

Рассмотрено и утверждено советом института
23 ноября 1966 года

КУЙБЫШЕВ, 1968

В учебном пособии «Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах» излагаются математические и физические принципы построения моделирующих устройств и электронных цифровых вычислительных машин. Рассматривается методика преобразования исходных математических соотношений для решения задач с помощью различных средств вычислительной техники.

Пособие состоит из двух частей. Первая часть посвящена общим вопросам теории, принципам построения и использования электронных моделирующих и вычислительных устройств.

Приведен ряд практических примеров решения конкретных задач. Рассмотрены области применения, а также перспективы развития вычислительных машин.

Во второй части изложены принципы программирования применительно к вычислительной машине «Проминь».

Учебное пособие, как общий курс вычислительной техники написано в соответствии с одноименной программой, утвержденной учебно-методическим управлением по вузам МВССО СССР 1. XI. 1965 г., рассчитано на студентов института, а также работников научно-исследовательских лабораторий, в которых может применяться новая вычислительная и управляющая техника.

Современная техника дает в руки инженера большой арсенал вычислительных средств, начиная от простейших карманных устройств и приспособлений и кончая мощными производительными электронно-вычислительными машинами.

Практика научной организации труда немыслима без использования этих средств в повседневной работе при проведении научно-технических расчетов, решении планово-экономических задач, в сфере учета, статистики и т. п.

Каждый инженерно-технический работник должен не только располагать сведениями о существующих и практически применяющихся средствах вычислительной техники, но и выбирать в зависимости от характера расчетных работ такие устройства, которые позволяют получать максимальный эффект с минимальными затратами времени и средств.

В настоящее время почти любую научно-техническую проблему можно разрешить при помощи математических методов. Для этого исследуемый процесс представляется в виде системы уравнений или формул. Теория математического анализа в большинстве случаев указывает пути решения таких систем, однако осуществление их зачастую сопряжено с целым рядом трудностей. С одной стороны, могут быть сложными и запутанными исследуемые математические соотношения, с другой стороны, может оказаться непреодолимым препятствием большой объем вычислительных работ.

Таким образом, очень часто недостаток времени, средств или отсутствие квалифицированного персонала затрудняло решение важных научных и технических проблем.

Человечество с древнейших времен стремилось облегчить и ускорить процесс вычислений при математических расчетах. Так,

около 4—5 тысяч лет назад в странах Востока применялись простейшие устройства, на основе которых были созданы обыкновенные конторские счеты. Позднее, в XVII веке Блез Паскаль построил первую механическую счетную машину, усовершенствованную впоследствии Лейбницем. В этот же период были созданы таблицы логарифмов Непера и изобретена логарифмическая линейка.

Великий русский ученый М. В. Ломоносов еще в 1742—1756 гг. в трудах «Оптические и химические записки» дал описание разработанных им различных приборов механического действия, относящихся к категории счетчиков и регистров. С 1844 года английским математиком Чарльзом Бэббиджем велась работа по созданию вычислительной машины, структура которой послужила основой для современных быстродействующих цифровых вычислительных машин. Однако его работы не были закончены. В 1854 году выдающийся русский математик П. Л. Чебышев опубликовал работы, положившие начало теории механизмов, выполняющих заданную математическую зависимость. В этом же году инженер В. Т. Однер сконструировал счетный механизм, принцип которого широко используется при построении различных арифмометров. В 1882 году П. Л. Чебышев создал счетную машину, выполнявшую сложение, вычитание, умножение и деление.

В 1904 году академик А. Н. Крылов разработал теорию математической машины для решения сложных дифференциальных уравнений. В 1912 году такая машина была построена и применена при изучении вибраций корабля.

Нужно отметить, что основным недостатком всех счетно-решающих устройств с ручным управлением является малая производительность, затрудняющая решение больших и сложных задач.

Следующим качественным шагом вперед явилось создание в 30-х годах нашего столетия первых быстродействующих электронных вычислительных машин с автоматическим программным управлением. Это позволило решать труднейшие математические задачи не только в короткие сроки, но практически с любой заданной степенью точности. Современная вычислительная техника позволяет за одну неделю проделать такое количество расчетов и исследований, на которые раньше требовались годы напряженной работы.

Быстрое распространение и развитие средств электронной вычислительной техники открывает широкие возможности их применения. Уже сейчас такие машины успешно используются в схемах комплексной автоматизации, в станках с программным управлением, при расчете траекторий космических ракет, в статистике, планировании, при решении ряда логических задач, для управления производством и т. д. Перспективные возможности их практически неограничены.

Вместе с тем важной особенностью электронных вычислительных машин является то, что в них сочетается большой комплекс

различных областей современной науки и техники, таких, как математический численный анализ, математическая логика, электроника, импульсная техника, физика полупроводников; достижения этих областей стимулируют дальнейшее развитие вычислительной техники.

Для решения какой-либо задачи, прежде всего, необходимо получить ее формальное описание в рамках соответствующей символики и закономерностей, определить исходные параметры, начальные или граничные условия, пределы изменения переменных и т. п., то есть, получить математическую модель, более или менее точно отражающую действительный физический процесс, состояние или структуру. На основании этой математической модели, учитывая также требуемую точность решения, время, характер задачи и экономические соображения следует определить те средства вычислительной техники, которые будут использованы и наиболее целесообразны для решения данной задачи.

На рис. 1 приведена в обобщенном виде классификация наиболее широко применяющихся средств вычислительной техники. Как следует из этой классификации, все вычислительные устрой-

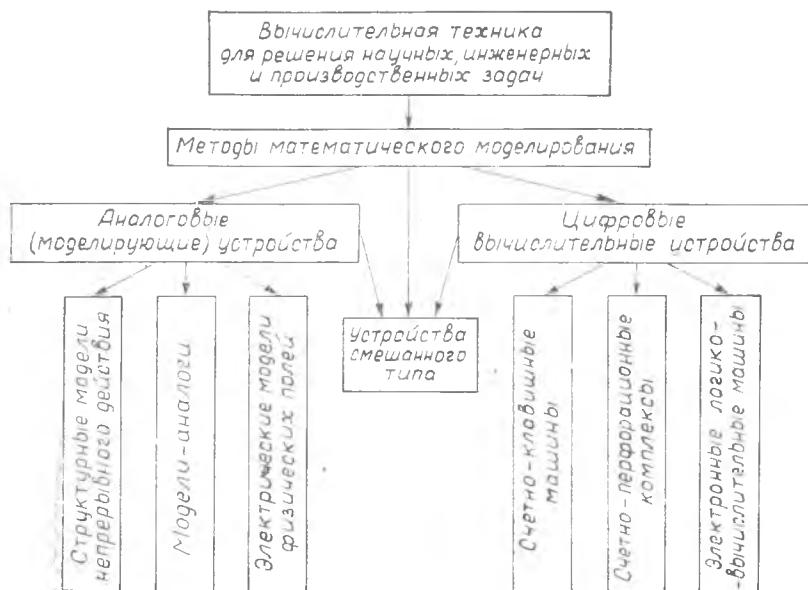


Рис. 1. Классификация средств вычислительной техники.

ства подразделяются на два основных класса: аналоговые или, как их еще называют, моделирующие устройства и цифровые вычислительные машины (или машины дискретного действия).

Устройства первого класса позволяют с помощью той или

инной электрической (электронной) системы (в более редких случаях с помощью механической или пневматической системы) воспроизвести исследуемый физический процесс в определенном масштабе, пронаблюдать и измерить изменение интересующих исследователя параметров, проследить за сравнительно короткий срок влияние на характер процесса изменяющихся условий внешней среды и т. п.

Отличительная особенность таких устройств состоит в том, что никаких вычислений в обычном смысле этого слова модель не производит; исходные величины задачи представляются в виде электрических параметров (тока или напряжения) и при работе модели все их изменения в соответствии с исследуемым физическим процессом, наблюдаются непосредственно и непрерывно с помощью соответствующих измерительных приборов или путем записи на обычных регистрирующих устройствах. Это в значительной степени предопределяет сравнительно большую скорость работы машин подобного рода, ограничивая в то же время точность получаемого результата первыми тремя-четырьмя значащими цифрами. Поэтому такие машины весьма полезны при решении многих технических задач, требующих точности в пределах от 0,5 до 5%.

Развитие моделирующих устройств в настоящее время происходит в двух направлениях: построение моделей — аналогов и построение моделей из отдельных счетно-решающих устройств. Модели второго типа более универсальны, так как позволяют с помощью одной установки решать целый класс задач, обеспечивают быстроту и легкость перехода от одной задачи к другой, возможность введения переменных параметров и различных начальных условий. Однако в ряде случаев может оказаться более выгодным, а иногда и единственно возможным метод моделей-аналогов.

Следует отметить, что устройства непрерывного действия могут использоваться не только в качестве собственно вычислительных машин, но и для управления физическими процессами и исследования динамических систем, часть элементов которых нелинейна и не имеет достаточно полного математического описания. В этом случае они сопрягаются с реальной аппаратурой, что позволяет проводить анализ большого числа вариантов изменения параметров и выбор оптимальных режимов протекания динамических процессов.

Существующие установки имеют разное конструктивное исполнение и разную степень специализации, они удобны в обращении, просты в эксплуатации и почти не требуют предварительной математической обработки задач при их вводе в машину.

Ко второму классу вычислительных средств относятся цифровые вычислительные машины (ЦВМ). Решение задач с их помощью сводится к выполнению арифметических и логических операций над дискретными последовательностями чисел. Поэтому

такие машины пригодны к решению задач, имеющих полное математическое описание и решаемых численными методами. Подготовка задачи в этом случае представляет достаточно трудоемкий и длительный процесс, поскольку требует разработки алгоритмов, блок-схем решения и программирования на основе использования методов прикладной и вычислительной математики. Однако большая скорость работы электронных цифровых машин, достигающая десятков и сотен тысяч операций в секунду, и практически любая заданная точность решения окупают все предварительные затраты.

При выборе того или иного типа ЦВМ следует также исходить из общего объема вычислений, сложности и характера задачи. Если настольные клавишные машины и счетно-перфорационные комплексы могут использоваться для сравнительно несложных вычислительных работ, то возможности электронных ЦВМ принципиально не ограничены. Они с успехом решают как научные и инженерные задачи, так и задачи экономического, планово-статистического характера и т. п.

С помощью электронных цифровых машин можно, например, эффективно выполнять инженерно-конструкторские расчеты; составлять конструкторскую документацию; работы по технологической подготовке производства; разработку технологий, составлять технологическую документацию и т. п.

Электронные цифровые машины могут с успехом решать и логические задачи. Так, например, машины переводят с одного языка на другой, составляют расписание поездов, выбирают наилучшие «стратегии» проведения логических игр и др. Они имеют большое значение и для развития комплекса биологических наук, в первую очередь, для изучения процессов высшей нервной деятельности, так как с их помощью представляется возможным создать модели отдельных элементарных процессов работы нервной системы и процесса мышления и тем самым ближе подойти к раскрытию закономерностей в этой области.

Электронные цифровые машины находят все более широкое применение в управлении производством и производственными процессами. В первом случае объектами управления могут быть как отдельные службы, участки (например, технологические, конструкторские, технико-экономические и др.), так и все производство в целом. Во втором случае объектами могут являться отдельные агрегаты (станки, самолеты, непрерывные поточные линии), а также сложные комплексы различных машин и агрегатов (цехи, заводы, электростанции). В этих условиях автоматическое управление должно обеспечивать оптимизацию процессов, то есть предусматривать максимум выпуска продукции, минимизацию непроизводительных расходов, потерь и т. д.

Представляется также весьма интересным и перспективным использование ЭЦВМ в информационно-статистической службе.

Вычислительные машины смешанного типа сочетают в себе преимущества цифровых и моделирующих машин. Такие машины представляют собой устройства непрерывно-дискретного типа и могут быть названы цифровыми моделирующими устройствами или цифровыми дифференциальными анализаторами (ЦДА). В них весьма удачно сочетается принцип решения математических задач в моделирующих устройствах непрерывного действия и способы дискретного счета для выполнения математических операций, используемых в цифровых машинах.

Сочетание принципов решения задач, применяемых в машинах непрерывного действия, с цифровыми методами дает возможность получить непрерывный процесс, высокую скорость работы, простоту настройки, удобство ввода и образования различных функций и легкость эксплуатации машины. В то же время существенно повышается точность вычислений, универсальность машин и их экономичность. Такие машины могут быстро переключаться для решения различных задач и не требуют сложного программирования, связанного со значительной затратой времени.



ЭЛЕКТРОННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Глава I. РЕШАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Решающие элементы моделирующих устройств предназначены для непрерывного выполнения различных математических операций: арифметических и алгебраических действий, интегрирования и дифференцирования, преобразования функций и т. д.

По принципу действия решающие элементы могут быть механическими, электромеханическими и чисто электрическими. Однако в современных моделирующих установках используются почти исключительно электрические решающие элементы, которые и рассматриваются в настоящей книге.

§ 1. Линейные решающие элементы разомкнутого типа

Наиболее простыми элементами, из которых могут быть построены решающие устройства, являются электрические цепочки, составленные из таких двухполюсников, как конденсатор, резистор, индуктивная катушка.

Рассмотрим принципы построения интегрирующих и дифференцирующих схем.

Интегрирующую цепь (звено) получим, включая резистор и конденсатор по схеме, представленной на рис. 2.

Входное напряжение в цепи распределится следующим образом:

$$U_{вх} = U_c + U_R. \quad (1.1)$$

Ток заряда конденсатора

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_c}{dt},$$

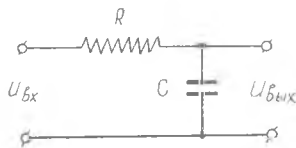


Рис. 2. Интегрирующая цепочка.

Тогда падение напряжения на сопротивлении R будет

$$U_R = iR = RC \frac{dU_c}{dt}$$

и

$$U_{вх} = U_c + RC \frac{dU_c}{dt}$$

или

$$\frac{U_{вх}}{RC} = \frac{U_c}{RC} + \frac{dU_c}{dt}$$

Если выбрать постоянную времени $\tau = RC$ достаточно большой, так, чтобы выполнялось условие

$$U_c \ll U_R,$$

тогда членом $\frac{U_c}{RC}$ за его малостью можно пренебречь и

$$U_{вх} \approx RC \frac{dU_c}{dt}.$$

Так как напряжение U_c является в то же время выходным напряжением цепи, то, решая последнее уравнение относительно $U_{вых} = U_c$, найдем

$$U_{вых} \approx \frac{1}{RC} \int_0^t U_{вх} dt. \quad (1.2)$$

Дифференцирующую цепь (звено) получим согласно рис. 3.

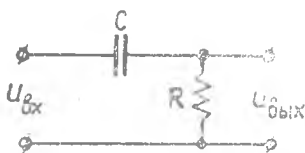


Рис. 3. Дифференцирующая цепочка.

Аналогично предыдущему

$$U_{вх} = U_R + U_c = iR + U_c.$$

Если выбрать $\tau = RC$ достаточно малой и при этом условии

$$U_R \ll U_c,$$

то падением напряжения на сопротивлении R можно пренебречь.

Тогда зарядный ток в цепи

$$i \approx C \frac{dU_{вх}}{dt}.$$

Выходное напряжение цепи, равное падению напряжения на сопротивлении R ,

$$U_{вых} = i \cdot R \approx RC \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (1.3)$$

Следует иметь в виду, что подключение нагрузки к рассмотренным цепям изменяет их постоянные времени, что приводит к появлению дополнительных погрешностей. Кроме того, выходные напряжения получаются слишком малыми для их дальнейшего использования, поэтому целесообразно к выходам интегрирую-

щей и дифференцирующей цепочек подключать электронные усилители с большим входным сопротивлением.

Для оценки погрешности цепочек рассмотрим более общий случай, когда цепь состоит из полных сопротивлений $z_1(p)$ и $z_2(p)$ двухполюсников, подключенных к электронному усилителю с весьма большим входным сопротивлением $R_{вх.ус} = \infty$ (рис. 4).

Здесь $z_1(p)$ и $z_2(p)$ — операторные сопротивления, которые для различных элементов электрических цепей имеют следующие значения:

для активного сопротивления — $z(p) = R$;

для емкости

$$z(p) = \frac{1}{Cp};$$

для индуктивности — $z(p) = Lp$,

где p — оператор дифференцирования;

$\frac{1}{p}$ — оператор интегрирования.

Так как напряжения на участках электрических цепей относятся как сопротивления этих участков, то*

$$\frac{\bar{U}_{вых}}{\bar{U}_{вх}} = k \frac{z_2(p)}{z_1(p) + z_2(p)} = k \frac{z_2(p)}{z_1(p)} \left[\frac{1}{1 + \frac{z_2(p)}{z_1(p)}} \right] \quad (1.4)$$

где k — коэффициент усиления усилителя.

Если $z_1(p) \gg z_2(p)$, то приходим к упрощенной формуле

$$\bar{U}_{вых} = k \frac{z_2(p)}{z_1(p)} \bar{U}_{вх} \quad (1.5)$$

Принимая для интегрирующего звена значения:

$$z_1(p) = R; \quad z_2(p) = \frac{1}{Cp},$$

получим

$$\bar{U}_{вых} = k \frac{1}{RCp} \bar{U}_{вх}.$$

Переходя от изображений к оригиналам, имеем

$$U_{вых}(t) = k \frac{1}{RC} \int_0^t U_{вх} dt, \quad (1.6)$$

то есть случай, рассмотренный ранее.

* Здесь и далее $\bar{U}_{вх}$ и $\bar{U}_{вых}$ — изображения величин $U_{вх}(t)$ и $U_{вых}(t)$.

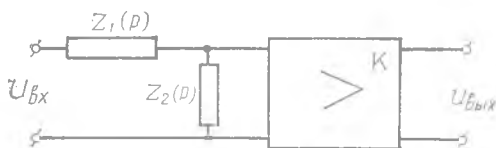


Рис. 4. Общая схема пассивной электрической цепочки в сочетании с электронным усилителем.

Если теперь взять исходное уравнение с подстановкой тех же значений операторных сопротивлений, то имеем:

$$\bar{U}_{\text{вых}} = k \frac{z_2(p)}{z_1(p)} \left[\frac{1}{1 + \frac{z_2(p)}{z_1(p)}} \right] \bar{U}_{\text{вх}} = k \frac{1}{RCp} \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{RCp}} \right] \bar{U}_{\text{вх}} = k \left[\frac{1}{RCp + 1} \right] \bar{U}_{\text{вх}} \quad (1.7)$$

или

$$RCp \bar{U}_{\text{вых}} + \bar{U}_{\text{вых}} = k \bar{U}_{\text{вх}},$$

переходя к оригиналам, получим

$$RC \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = kU_{\text{вх}}. \quad (1.8)$$

Если к данной цепи приложен входной сигнал в виде ступенчатой функции, то решение полученного дифференциального уравнения имеет вид:

$$U_{\text{вых}}(t) = kU_{\text{вх}}(0) \left[1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right]. \quad (1.9)$$

Таким образом, погрешность интегрирования определяется членом $e^{-\frac{t}{RC}}$. Графически это может быть выражено согласно рис. 5.

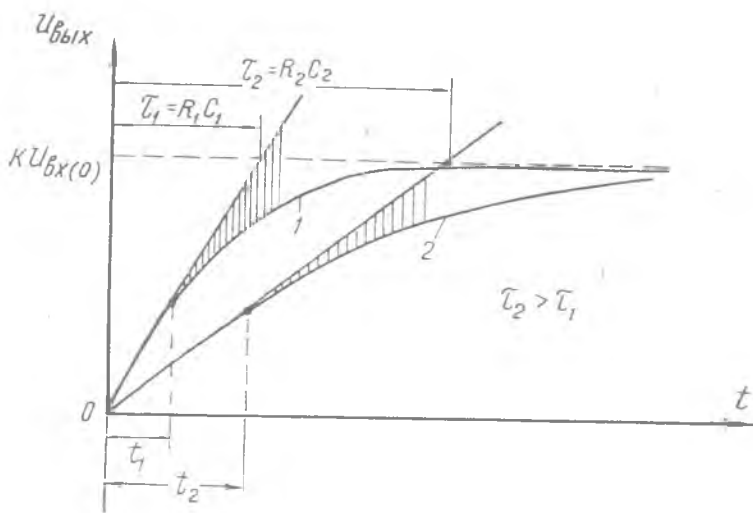


Рис. 5. Влияние постоянной времени RC на время и точность интегрирования.

Реальный процесс в рассматриваемой интегрирующей цепочке носит экспоненциальный характер, а идеальное интегрирование может быть представлено касательной к экспоненте из начала координат.

Анализ уравнения и графика показывает, что погрешность интегрирования возрастает со временем (заштрихованная область), и достаточно точный результат можно получить лишь за весьма короткий промежуток времени.

Повысить точность интегрирования или увеличить время интегрирования с той же точностью можно лишь путем увеличения постоянной времени $\tau = RC$, что также следует из графика. Однако получение больших величин R и C связано с чисто техническими трудностями (практически R и C берутся не больше 10 мгом и 10 мкф). Индуктивные элементы в решающих устройствах не применяются, так как при моделировании на низких частотах требуются большие, технически неосуществимые значения L .

Таким образом, реальный процесс интегрирования с помощью простых цепей из пассивных двухполюсников можно производить только за короткий промежуток времени, что не всегда оказывается возможным или удобным.

Так, например, если принять максимально допустимую погрешность интегрирования в 1%, то при $RC = 10$ сек. и $R_{нагр} = \infty$ получим время интегрирования не более 0,2 сек.

Рассмотренные интегрирующие элементы могут быть использованы в моделирующих устройствах с периодизацией решения, в которых исследуемый процесс повторяется с частотой 10—20 гц.

Примером устройств подобного рода может служить электроинтегратор ЭЛИ-14 матричного типа с «жесткой» коммутацией элементов, позволяющий моделировать процессы в системах, описываемых линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами не выше шестого порядка

$$\left. \begin{aligned} b_1 \frac{dx_1}{dt} + a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{16}x_6 &= a_1 \\ \dots & \\ b_6 \frac{dx_6}{dt} + a_{61}x_1 + a_{62}x_2 + \dots + a_{66}x_6 &= a_6 \end{aligned} \right\}$$

с начальными условиями $x_1(0) = x_{10}$, $x_2(0) = x_{20}, \dots$, $x_6(0) = x_{60}$, при $t = 0$ и постоянными внешними возмущениями a_1, a_2, \dots, a_6 . Процесс решения наблюдают на экране электронного осциллографа, синхронизированного с электроинтегратором.

Следует отметить, что электроинтеграторы подобного типа широкого применения не получили.

Литература: [8], [16], [19].

§ 2. Линейные решающие элементы замкнутого типа

Для увеличения времени и точности интегрирования наиболее целесообразно использовать электронный усилитель с отрицательной обратной связью, получивший название *операционного* (решающего) усилителя. Схема усилителя представлена на рис. 6.

Для получения отрицательной обратной связи усилители строятся таким образом, чтобы выходное напряжение имело знак, обратный знаку входного напряжения.

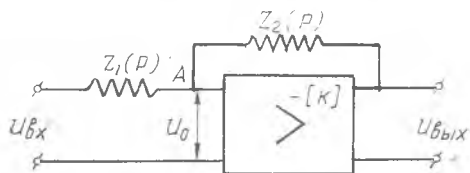


Рис. 6. Схема решающего усилителя с отрицательной обратной связью.

Принимая, как и в предыдущем случае, входное сопротивление усилителя бесконечно большим и учитывая, что знаки напряжений на входе и выходе усилителя противоположны, можно для узла А схемы по первому закону Кирхгофа записать:

$$i_{вх} = i_{об.св}$$

или

$$\frac{\bar{U}_{вх} - \bar{U}_0}{z_1(p)} = \frac{\bar{U}_0 - \bar{U}_{вых}}{z_2(p)} = \frac{\bar{U}_{вх} - \bar{U}_{вых}}{z_1(p) + z_2(p)}, \quad (1.10)$$

где

$$\bar{U}_0 = -\frac{\bar{U}_{вых}}{k}.$$

Решая полученное уравнение относительно входного и выходного напряжений, получаем:

$$\frac{\bar{U}_{вх}}{\bar{U}_{вых}} = -\frac{z_1(p)}{z_2(p)} \left[1 + \frac{1}{k} \left(1 + \frac{z_2(p)}{z_1(p)} \right) \right]. \quad (1.11)$$

При большом коэффициенте усиления усилителя (практически k берется от 40000 до 80000) член в квадратных скобках можно принять равным 1 и тогда получится сокращенное уравнение решающего усилителя

$$\bar{U}_{вых} = -\frac{z_2(p)}{z_1(p)} \bar{U}_{вх}. \quad (1.12)$$

При этом напряжение на входе усилителя близко к нулю $U_0 \rightarrow 0$, то есть потенциал входа усилителя близок к потенциалу земли.

Возвращаясь к исходному уравнению (1.11) и принимая операторные сопротивления $z_1(p) = R$ и $z_2(p) = \frac{1}{Cp}$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U}_{вх}}{\bar{U}_{вых}} &= -RCp \left[1 + \frac{1}{k} \left(1 + \frac{1}{RCp} \right) \right] = -RCp - \\ &\quad - \frac{1}{k} RCp - \frac{1}{k}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

или

$$\begin{aligned} \bar{U}_{вх} &= -RCp \bar{U}_{вых} - \frac{1}{k} RCp \bar{U}_{вых} - \frac{1}{k} \bar{U}_{вых} = \\ &= -RCp \bar{U}_{вых} \left(1 + \frac{1}{k} \right) - \frac{1}{k} \bar{U}_{вых}. \end{aligned}$$

Переходя к оригиналам, получаем дифференциальное уравнение 1-го порядка, аналогичное уравнению (1.8):

$$(k+1)RC \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + U_{\text{ВЫХ}} = -kU_{\text{ВХ}}. \quad (1.14)$$

При ступенчатом входном сигнале $U_{\text{ВХ}}(0)$ решение уравнения имеет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -kU_{\text{ВХ}}(0) \left[1 - e^{-\frac{t}{(k+1)RC}} \right]. \quad (1.15)$$

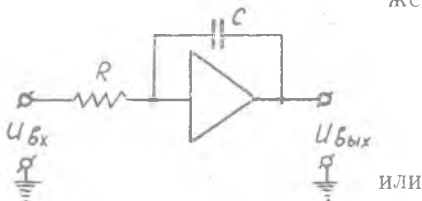
Из сравнения полученного выражения с уравнением (1.9) видно, что применение операционного усилителя дает возможность в $(k+1)$ раз увеличить время протекания процесса интегрирования, то есть существенно «замедлить» работу модели. При этом погрешность интегрирования накапливается во времени в $(k+1)$ раз медленнее, чем в цепях из простых двухполосников. Практически максимальное время решения задач составляет не более 150—200 сек. Благодаря этому современные моделирующие счетно-решающие устройства строятся почти исключительно на основе применения операционных усилителей.

Рассмотрим основные математические операции, выполняемые с помощью операционных усилителей. Воспользуемся сокращенным уравнением решающего усилителя

$$\bar{U}_{\text{ВЫХ}} = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} \bar{U}_{\text{ВХ}}, \quad (1.16)$$

при этом имея в виду, что в любом случае знак выходного напряжения меняется на обратный:

1. Интегрирование (рис. 7).



$$Z_1(p) = R; \quad Z_2(p) = \frac{1}{Cp}.$$

$$\bar{U}_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{RCp} \bar{U}_{\text{ВХ}},$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt. \quad (1.17)$$

Рис. 7. Интегрирующее звено.

2. Дифференцирование (рис. 8).

$$Z_1(p) = \frac{1}{Cp};$$

$$Z_2(p) = R;$$

$$\bar{U}_{\text{ВЫХ}} = -RCp \bar{U}_{\text{ВХ}};$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -RC \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}. \quad (1.18)$$

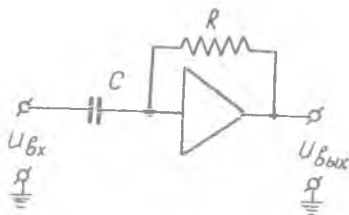


Рис. 8. Дифференцирующее звено.

3. Умножение на постоянный коэффициент (рис. 9) (масштабное звено)

$$Z_1(p) = R_1; \quad Z_2(p) = R_2;$$

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} U_{\text{вх}}. \quad (1.19)$$

Умножение на постоянную величину $\beta < 1$ можно осуществить также с помощью делителя (рис. 10) с плавной регулировкой.

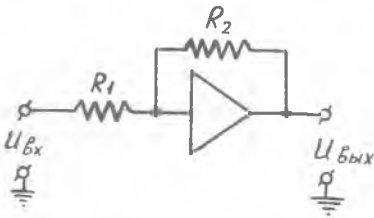


Рис. 9. Масштабное звено.

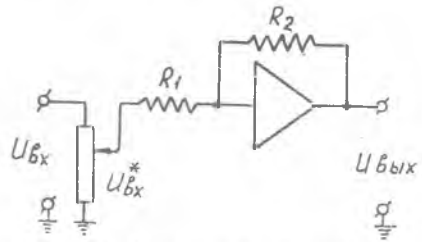


Рис. 10. Умножение на коэффициент $\beta < 1$.

$$Z_1(p) = R_1; \quad Z_2(p) = R_2;$$

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} U_{\text{вх}}^*$$

$$U_{\text{вх}}^* = \beta U_{\text{вх}};$$

$$U_{\text{вых}} = -\beta \frac{R_2}{R_1} U_{\text{вх}}. \quad (1.20)$$

4. Инвертирование знака осуществляется по схеме на рис. 9 при

$$Z_1(p) = Z_2(p) = R;$$

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}}. \quad (1.21)$$

5. Суммирование нескольких независимых переменных (рис. 11).

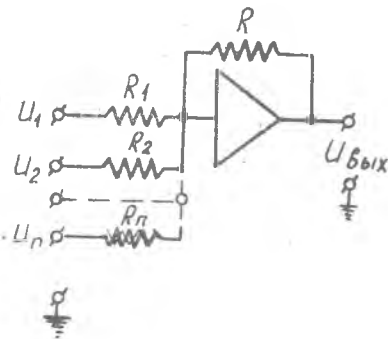


Рис. 11. Суммирующее звено.

$$Z_1(p) = R_1, R_2, \dots, R_n;$$

$$Z_2(p) = R;$$

$$U_{\text{вых}} = -R \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} U_{\text{вх}i}. \quad (1.22)$$

Обычно суммирующие звенья имеют не более шести-семи входов, так как увеличение числа входов приводит к возрастанию погрешности.

6. Интегрирование суммы нескольких переменных (рис. 12).

$$Z_1(p) = R_1, R_2, \dots, R_n; \quad Z_2(p) = \frac{1}{Cp}.$$

$$\bar{U}_{\text{вых}} = -\frac{1}{Cp} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \bar{U}_{\text{вх}i}$$

ИЛИ

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} U_{\text{вх}i} dt. \quad (1.23)$$

В практике моделирования линейных систем используются и другие более сложные типы элементов (звеньев), к числу которых относятся:

7. Аперiodическое (инерционное) звено (рис. 13).

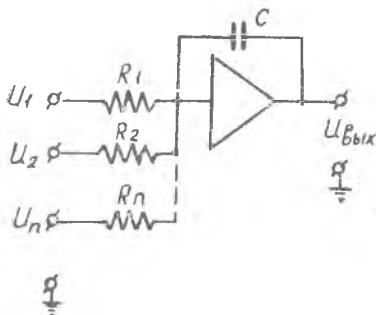


Рис. 12. Интегрирование суммы нескольких переменных.

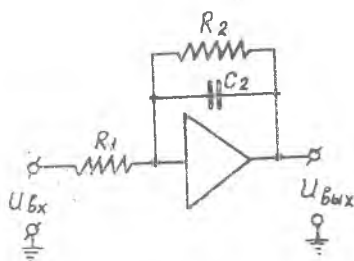


Рис. 13. Аперiodическое звено.

$$\bar{U}_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2 C_2 p + 1} \bar{U}_{\text{вх}} \quad (1.24)$$

8. Форсирующее звено (рис. 14).

$$\bar{U}_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} (R_1 C_1 p + 1) \bar{U}_{\text{вх}}. \quad (1.25)$$

Таким образом, имея в распоряжении достаточное количество операционных усилителей с набором конденсаторов и резисторов, можно решать большой класс линейных дифференциальных уравнений различных порядков. Современные моделирующие установки имеют в своем составе от двенадцати и более операционных усилителей, устройства (блоки постоянных коэффициентов) для задания постоянных коэффициентов, устройства управления, источники питания и другое вспомогательное оборудование.

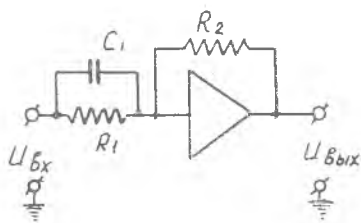


Рис. 14. Форсирующее звено.

Литература: [7], [9], [16], [19].

В качестве примера рассмотрим методику составления структурной схемы для линейного дифференциального уравнения 2-го порядка с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x = 0 \quad (2.1)$$

и начальными условиями $x|_{t=0} = x_0$; $x'|_{t=0} = x'_0$.

Причем, для упрощения схем модели можно применить более обобщенную систему обозначений операционных усилителей.

Разрешая уравнение (2.1) относительно старшей производной получим:

$$x'' = -a_1x' - a_0x. \quad (2.2)$$

Для образования величины x'' предполагаем вначале, что значения $-x'$ и $-x$ известны. Используя суммирующий усилитель, получим сумму $(-a_1x') + (-a_0x) = -x''$ (рис. 15) со знаком минус, вследствие инвертирующего свойства операционных усилителей.

Сформированную таким образом величину x'' дважды интегрируем до получения искомой функции x .

Теперь недостающие значения $-x'$ и $-x$ можно получить с определенных точек схемы и, с помощью цепей обратной связи ввести в сумматор (рис. 16).

Для решения заданного уравнения (2.1), то есть нахождения функции $x(t)$ или $x'(t)$, операционные усилители моделирующей установки соединяют в соответствии со структурной схемой и задают начальные условия в виде напряжений заряда конденсаторов интегрирующих усилителей (рис. 16).

Решение задачи начинается в момент одновременного включения всех операционных усилителей схемы.

Если в рассматриваемом примере (2.1) положить начальные условия $x'_0 = 100$ и $x_0 = 0$, то его решение на моделирующей установке будет иметь следующий вид (рис. 17).

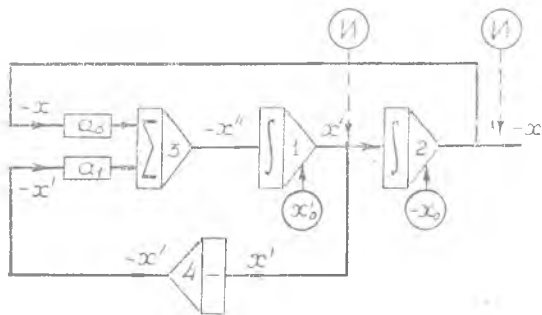


Рис. 16. Структурная схема для решения дифференциального уравнения 2-го порядка.

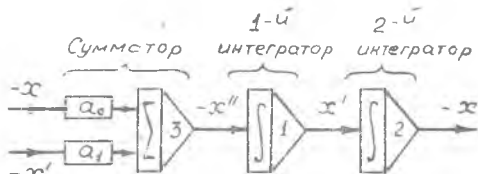


Рис. 15. Интегрирование методом понижения порядка производной.

Характер процесса затухания и его колебательность будут, очевидно, определяться величиной коэффициентов уравнения (2,1) a_1 и a_0 . Решение может быть снято с соответствующих точек схемы модели с помощью обычных измерительных приборов или электронно-лучевого индикатора (рис. 16).



Рис. 17. Решение дифференциального уравнения 2-го порядка.

Изменяя величину коэффициентов a_1 и a_0 путем простого регулирования входных сопротивлений сумматора, можно за короткое время просмотреть ряд решений и определить влияние коэффициентов на характер исследуемого процесса. Таким образом, например, решаются задачи на отыскание оптимального переходного, неустановившегося процесса и др.

Рассмотренная методика составления структурных схем, несмотря на ее практическую ценность, не всегда обеспечивает оптимальное использование вычислительной схемы, т. е. применение минимального количества операционных усилителей. Следует также заметить, что для любого уравнения нельзя указать единственную схему и, по крайней мере теоретически, существует бесконечное число схем, удовлетворяющих данному уравнению. Это очевидно из того факта, что знак любого напряжения может быть многократно изменен и это не отразится на результате решения. Хотя при идеальных условиях эти схемы равноценны, однако в практике некоторые из них более удобны.

Например, структурную схему, изображенную на рис. 16 можно упростить, если совместить операции суммирования и интегрирования в одном операционном усилителе. В этом случае потребуется всего три операционных усилителя (включая инвертор) вместо четырех (рис. 18).

Однако следует отметить, что в схеме рис. 18 переменная x'' не может быть измеряемой величиной, что является недостатком по сравнению со схемой рис. 16.

Если задача поставлена в виде системы дифференциальных уравнений 1-го порядка, то составление структурной схемы для ее решения не представляет особых трудностей.

Так, в случае рассмотренного выше дифференциального уравнения 2-го порядка

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x = 0,$$

после замены переменных $x = X_1$ и $\frac{dX_1}{dt} = X_2$ имеем систему двух уравнений 1-го порядка:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_1}{dt} &= X_2; \\ \frac{dX_2}{dt} &= -a_1X_2 - a_0X_1. \end{aligned} \right\} (2.3)$$

Структурная схема составляется по частям, для

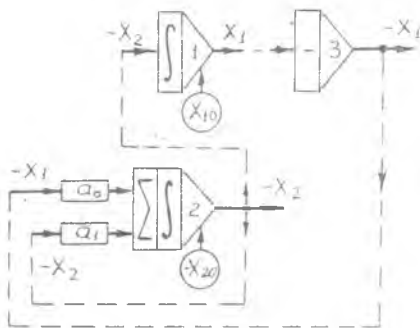


Рис. 19. Структурная схема для решения системы двух дифференциальных уравнений 1-го порядка.

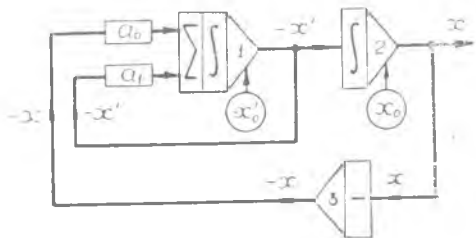


Рис. 18. Структурная схема для решения дифференциального уравнения 2-го порядка с совмещением операций суммирования и интегрирования.

каждого уравнения в отдельности, а затем входы и выходы каждой схемы соединяются между собой соответствующими связями до получения замкнутой системы (рис. 19). Из сопоставления следует, что полученная структурная схема полностью эквивалентна схеме на рис. 18.

В случае, если задача поставлена в виде системы дифференциальных уравнений различных порядков, составление структурной схемы производится по одной из вышеизложенных методик.

Литература: [7], [17], [18], [19], [20].

§ 2. Выбор масштабов и расчет коэффициентов передач решающих элементов

Перейдем к вопросу выбора масштабов представления зависимых переменных и расчета коэффициентов передач отдельных решающих элементов.

Требуется с помощью моделирующей установки решить линейное дифференциальное уравнение 3-го порядка

$$\frac{d^3x}{dt^3} + a_2 \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x = \beta f(t) \quad (2.4)$$

с постоянными коэффициентами $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta$ при начальных условиях

$$x|_{t=0} = x_0, \quad x'|_{t=0} = x'_0, \quad x''|_{t=0} = x''_0.$$

По вышеизложенной методике для решения уравнения (2.4) может быть построена структурная схема, в которой для простоты инверторы не показаны (рис. 20).

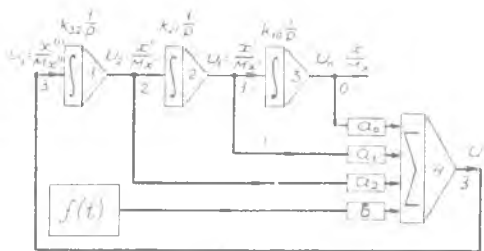


Рис. 20. Структурная схема для решения дифференциального уравнения 3-го порядка.

Для нашего случая имеем:

$$x = M_x U_0, \quad x' = M_{x'} U_1, \quad x'' = M_{x''} U_2, \quad x''' = M_{x'''} U_3. \quad (2.5)$$

Максимальное выходное напряжение для обеспечения работы операционных усилителей в линейном режиме лежит в пределах $U_{\max} = \pm 100$ в для ламповых усилителей. Поэтому, если имеются сведения о диапазоне изменения переменных задачи, легче подобрать оптимальную величину масштабных коэффициентов.

$$M_x = \frac{|x|_{\max}}{100}; \quad M_{x'} = \frac{|x'|_{\max}}{100}; \quad M_{x''} = \frac{|x''|_{\max}}{100}; \quad (2.6)$$

$$M_{x'''} = \frac{|x'''|_{\max}}{100}; \quad M_f = \frac{|f(t)|_{\max}}{100}.$$

Точное определение этих диапазонов не обязательно. Практически целесообразнее ввести задачу с приближенно выбранными масштабными коэффициентами, так как в этом случае могут быть измерены напряжения на различных усилителях, а первоначально выбранные масштабные коэффициенты в случае необходимости уточнены. Однако во всех случаях для обеспечения большой точности решения следует стремиться к наиболее полному использованию рабочего диапазона напряжений моделирующей установки.

Во многих случаях целесообразно также бывает ввести масштаб времени, позволяющий замедлить, или наоборот ускорить процесс решения задачи. Если обозначить t — натуральное время, а τ — машинное время, то

$$M_t = \frac{1}{\tau}. \quad (2.7)$$

При этом допускается некоторая свобода в установлении масштаба времени. Однако, если модель сопрягается с другой аппаратурой, например, при включении в самолетную навигационную систему или систему управления производственным процессом, необходимо обеспечить работу устройства в реальном масштабе времени ($\tau = t$, $M_t = 1$).

Рассмотрим теперь расчет постоянных интегрирования блоков модели (k_{10} , k_{21} , k_{32}).

Если, например, взять третий интегрирующий усилитель, то его входное и выходное напряжения связаны следующим соотношением:

$$\overline{U_0} = -k_{10} \frac{1}{p} \overline{U_1}.$$

Переходя к оригиналам, имеем

$$\frac{x}{M_x} = -k_{10} \int_0^{\tau} \frac{x'}{M_{x'}} d\tau = -k_{10} \int_0^t \frac{x'}{M_{x'}} d\left(\frac{t}{M_t}\right). \quad (2.8)$$

Откуда

$$k_{10} = \frac{M_{x'}}{M_x} M_t.$$

Аналогично, для других интегрирующих блоков (2.9)

$$k_{21} = \frac{M_{x''}}{M_{x'}} M_t \text{ и } k_{32} = \frac{M_{x'''}}{M_{x''}} M_t.$$

Передаточные коэффициенты суммирующего блока (a_0 , a_1 , a_2 , b) определим следующим образом.

По структурной схеме (рис. 20) получим математическое описание блока

$$U_3 = -a_0 U_0 - a_1 U_1 - a_2 U_2 + b f(\tau), \quad (2.10)$$

которое обычно называется *машинным уравнением*, причем

$$U_1 = \frac{1}{k_{10}} \frac{dU_0}{d\tau}; \quad U_2 = \frac{1}{k_{21} k_{10}} \frac{d^2 U_0}{d\tau^2}; \quad U_3 = \frac{1}{k_{32} k_{21} k_{10}} \frac{d^3 U_0}{d\tau^3}. \quad (2.11)$$

Подставим в уравнение (2.10) соотношения из (2.5)

$$\frac{x'''}{M_{x'''}} = -a_0 \frac{x}{M_x} - a_1 \frac{x'}{M_{x'}} - a_2 \frac{x''}{M_{x''}} + b \frac{f(\tau)}{M_f};$$

в результате получим

$$x''' = -a_0 \frac{M_{x'''}}{M_x} x - a_1 \frac{M_{x'''}}{M_{x'}} x' - a_2 \frac{M_{x'''}}{M_{x''}} x'' + b \frac{M_{x'''}}{M_f} f(\tau) \quad (2.12)$$

Для того, чтобы это уравнение совпадало с уравнением (2.4)

$$x''' = -\alpha_0 x - \alpha_1 x' - \alpha_2 x'' + \beta f(\tau)$$

необходимо выполнить условия

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= a_0 \frac{M_{x'''}}{M_x}; & \alpha_2 &= a_2 \frac{M_{x'''}}{M_{x''}}; \\ \alpha_1 &= a_1 \frac{M_{x'''}}{M_{x'}}; & \beta &= b \frac{M_{x'''}}{M_f}. \end{aligned}$$

Откуда передаточные коэффициенты

$$\begin{aligned} a_0 &= \alpha_0 \frac{M_x}{M_x'''}; & a_2 &= \alpha_2 \frac{M_x''}{M_x'''}; \\ a_1 &= \alpha_1 \frac{M_x'}{M_x''}; & b &= \beta \frac{M_f}{M_x''}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Начальные условия для модели определяются, как

$$U_{00} = \frac{x_0}{M_x}; \quad U_{10} = \frac{x_0'}{M_x'}; \quad U_{20} = \frac{x_0''}{M_x''}.$$

Следует отметить, что рациональным выбором масштабов, а особенно, масштаба времени, можно добиться выравнивания коэффициентов при производных, что значительно облегчит набор задачи на модели, а в ряде случаев позволит выбрать одинаковый масштаб для всех переменных задачи.

Например, для моделирования уравнения

$$0,08x'' + 0,32x' + 7,5x = 0$$

можно принять

$$M_i = 0,1,$$

тогда

$$0,08 \frac{d^2x}{d(0,1\tau)^2} + 0,32 \frac{dx}{d(0,1\tau)} + 7,5x = 0$$

или

$$8,0 \frac{d^2x}{d\tau^2} + 3,2 \frac{dx}{d\tau} + 7,5x = 0.$$

И окончательно

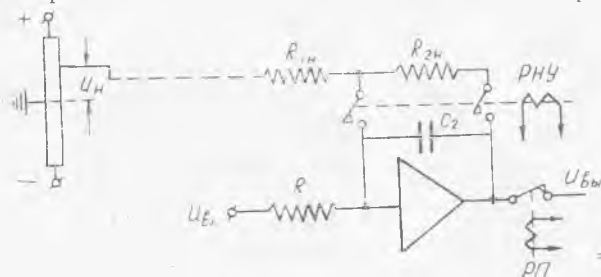
$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + 0,4 \frac{dx}{d\tau} + 0,9375x = 0.$$

Литература: [7], [16], [19].

§ 3. Задание начальных условий и внешних возмущений

Перед началом решения задачи на моделирующей установке необходимо по каждой зависимой переменной установить начальные значения. Наиболее распространен способ предварительной зарядки интегрирующего конденсатора с помощью цепи в виде апериодического звена, отключаемой перед началом решения задачи (рис. 21).

При этом выходное напряжение блока будет изменяться в соответствии с выражением



$$\bar{U}_{\text{вых}} = - \frac{R_{2H}}{R_{1H}} \cdot \frac{1}{(R_{2H} \cdot C_2 p + 1)} \bar{U}_H. \quad (2.14)$$

Рис. 21. Схема задания начальных условий.

В установившемся режиме

$$\bar{U}_{\text{вых}} = - \frac{R_{2н}}{R_{1н}} \bar{U}_{\text{н}}. \quad (2.15)$$

Основной недостаток схемы заключается в том, что напряжение, эквивалентное начальным условиям, устанавливается на выходе усилителя не сразу и поэтому точная установка затруднена и сопряжена с некоторой затратой времени.

Задание внешних возмущений осуществляется в зависимости от характера возмущающего воздействия. Если возмущение представляет собой постоянную величину, его легко воспроизвести, задавая на вход решающего усилителя постоянное напряжение от потенциометра внешних возмущений (рис. 22).

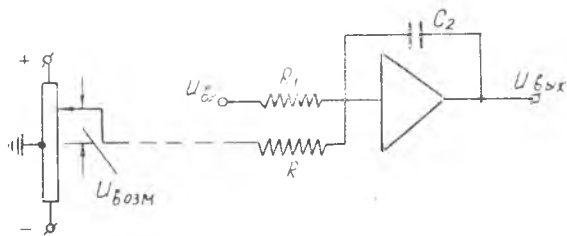


Рис. 22. Схема задания постоянных внешних возмущений.

Если возмущение представляет задан-

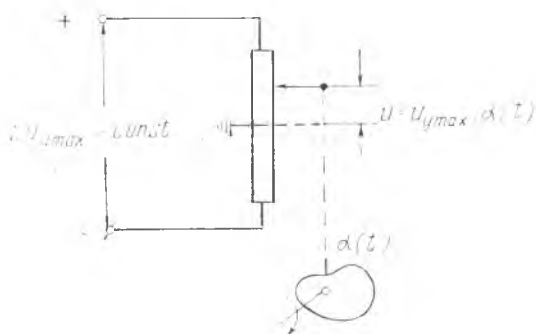


Рис. 23. Схема задания переменных внешних возмущений

ную функцию времени, его можно воспроизвести на установке с помощью электромеханического вариатора коэффициентов (рис. 23).

Если возмущение представляет собой периодическую функцию времени, то в некоторых случаях можно воспользоваться промышленным генератором низкочастотных периодических колебаний

типа НГПК-3, воспроизводящим прямоугольные, пилообразные и синусоидальные колебания в диапазоне от 0,001 до 10 гц.

В некоторых случаях внешние воздействия могут быть образованы с помощью вспомогательных схем из решающих усилителей. Таким путем воспроизводятся экспоненциальные, линейно-изменяющиеся, параболические, гиперболические, низкочастотные синусоидальные и другие воздействия. Общая методика построения таких схем заключается в повторном дифференцировании заданной функции, составлении дифференциального уравнения, связывающего производные высшего и низшего порядка.

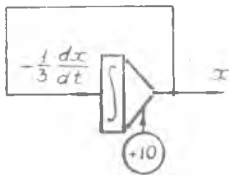


Рис. 24. Структурная схема для образования $x=10 \cdot e^{-3t}$

Так, например, для получения

$$x = 10 \cdot e^{-3t}$$

образуем

$$\frac{dx}{dt} = -30 \cdot e^{-3t}$$

Следовательно,

$$\frac{dx}{dt} = -3x.$$

Соответствующая схема модели приведена на рис. 24.

Аналогично могут быть построены схемы, изображенные на рис. 25. Очевидно, для схем рис. 25 а и б дифференциальное уравнение не требуется, так как схемы не образуют замкнутого контура, а уравнение для схемы рис. 25 в имеет вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega x = 0.$$

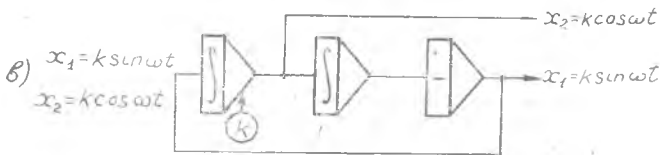
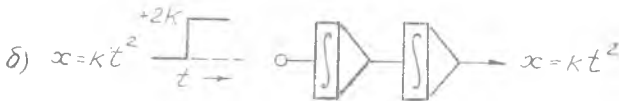
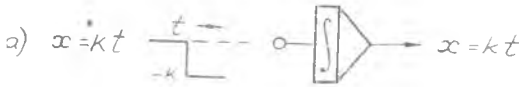


Рис. 25. Некоторые простейшие функции, образуемые с помощью линейных решающих элементов.

Литература: [16], [17].

Глава III. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

§ 1. Схемы решающих усилителей постоянного тока

Решающий усилитель должен иметь высокий коэффициент усиления (практически 40000—80000). Такое значение коэффициента усиления обеспечивает почти полную независимость работы решающего усилителя от изменения его параметров и низкое значение выходного сопротивления, что облегчает соединение решающих элементов между собой и с другой аппаратурой, а также малую погрешность (менее 1%) работы в режиме сумма-

тора-интегратора при неблагоприятном сочетании вводимых величин.

Усилитель должен быть построен по несимметричной схеме с одним общим полюсом, при этом другим будет служить общая «земля». Это упрощает набор задачи, так как позволяет соединить решающих усилителей в установке выполнять одинарными проводами. Ввиду того, что для осуществления отрицательной обратной связи требуется перемена знака усиливаемого напряжения, усилитель должен иметь нечетное число каскадов. Всем этим требованиям лучше всего отвечает трехкаскадный усилитель постоянного тока. В настоящее время имеется много схем таких усилителей, отличающихся выполнением источников питания, методами стабилизации нулевого уровня и экономичностью.

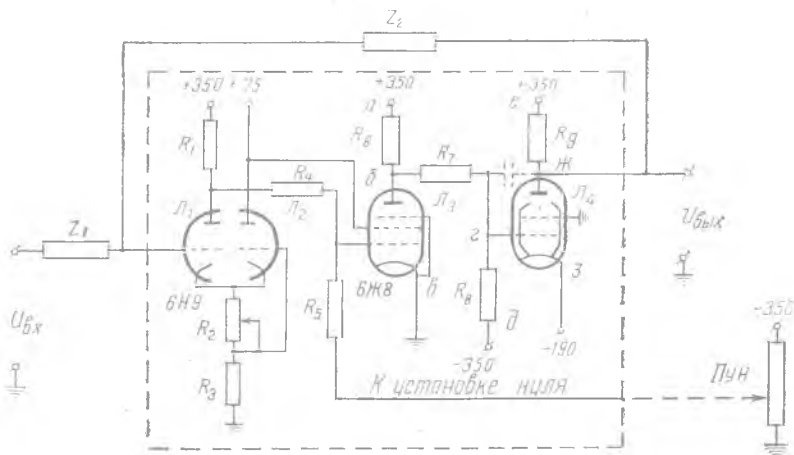


Рис. 26. Принципиальная схема операционного усилителя постоянного тока.

Наиболее типичная схема операционного усилителя постоянного тока приведена на рис. 26. Усилитель построен на радиолампах типа 6Н9С, 6Ж8, 6П3, (6П6С). Каскады усилителя выполнены по принципу делителей напряжения с потенциометрическими связями. Принцип работы схемы поясняется потенциальными диаграммами двух последних каскадов усиления, приведенными на рис. 27.

Падение напряжения на участке *абв* схемы определяется внутренним сопротивлением R'_{L3} , R''_{L3} ..., лампы L_3 при различных управляющих напряжениях на ее сетке. При этом изменяется потенциал точки *б*, а следовательно, и точки *г* делителя *абгд*. В свою очередь изменение потенциала управляющей сетки выходной лампы L_4 (точка *г*) приведет к перераспределению потенциалов на делителе *ежз* и к изменению выходного напряжения $U_{вых}$. При нулевом входном напряжении схема балансиру-

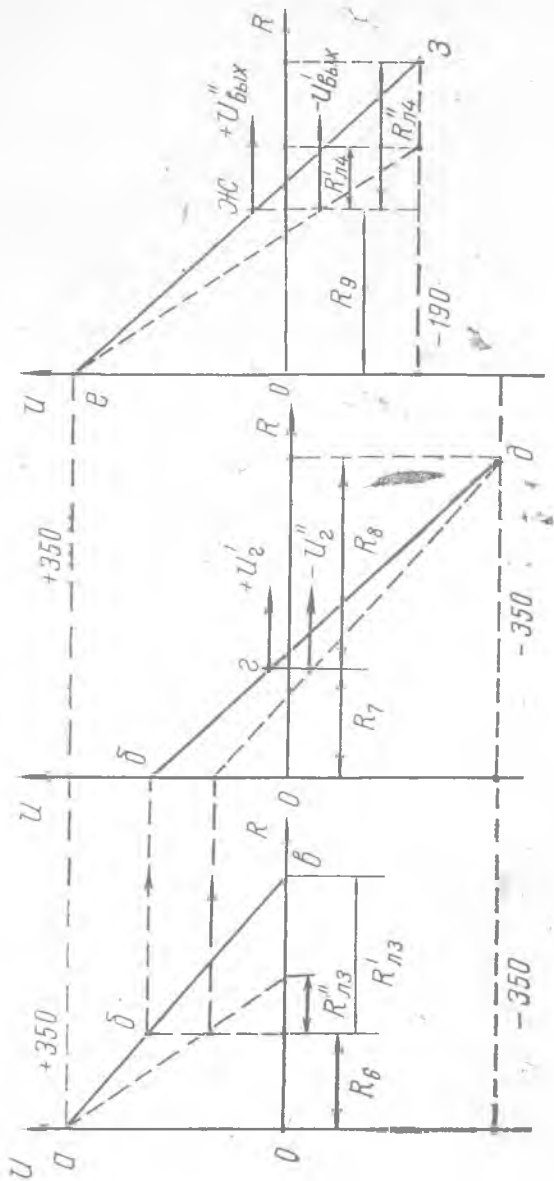


Рис. 27. Потенциальная диаграмма операционного усилителя.

ется таким образом, чтобы точка *жс* выходного делителя имела также нулевой потенциал. Входной каскад схемы работает аналогично.

Общий вид усилителя постоянного тока типа УПТ-4 приведен на рис. 28.

Основным недостатком усилителей постоянного тока является нестабильность их работы. Внешне это проявляется в «уходе» выходного напряжения от нуля при нулевом входном напряжении. Это явление «дрейфа нуля» может привести к значительным погрешностям решающего усилителя, особенно заметным в интегрирующих звеньях.

Для масштабного звена погрешность от «дрейфа нуля» может быть представлена в виде дополнительной функции входного напряжения:

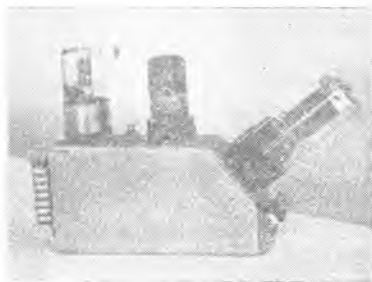


Рис. 28. Усилитель постоянного тока типа УПТ-4.

$$U_{\text{вых}} = -kU_{\text{вх}} + F(U_{\text{вх}}), \quad (3.1)$$

где

$$F(U_{\text{вх}}) = -k\Delta U_{\text{вх}}$$

или

$$U_{\text{вых}} = -k(U_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{вх}}). \quad (3.2)$$

Здесь $\Delta U_{\text{вх}}$ — погрешность «дрейфа», приведенная ко входу усилителя.

Таким образом, наличие «дрейфа» усилителей приводит к тому, что на моделирующей установке фактически решается дифференциальное уравнение с правыми частями, то есть возмущениями, отличающимися от заданных.

Основными причинами «дрейфа нуля» являются нестабильность источников анодного питания и флюктуации тока эмиссии катода, вызванные колебаниями напряжения накала, а также изменения параметров элементов схемы усилителя.

Для уменьшения «дрейфа нуля» обычно анодное питание осуществляют от электронных стабилизаторов, обеспечивающих точность поддержания постоянства напряжения в пределах $+0,1$ – $-0,01\%$.

По способу устранения катодного «дрейфа» все схемы решающих усилителей можно разделить на две группы: с параметрической компенсацией «дрейфа нуля» и автоматическим регулированием нулевого уровня.

Принцип параметрической компенсации «дрейфа нуля» осуществляется обычно по схеме катодной компенсации, использованной в приведенной (рис. 26) схеме усилителя постоянного тока. В этой схеме имеются две лампы. Одна из них — L_1 явля-

ется собственно усилителем, а другая — L_2 служит исключительно для компенсации изменений напряжения накала.

Применением анодной и катодной стабилизации удается снизить «дрейф» на выходе решающих усилителей при коэффициенте передачи масштабного звена, равном единице, — до 2—3 мв за 10 мин., а при работе в режиме интегратора с коэффициентом передачи 1 — до величины 100 мв за 100 сек. Однако в любом случае необходимо осуществлять периодический контроль и регулировку «нуля» на выходе всех решающих усилителей модели либо вручную (модели МН-7, ИПТ-5), либо методом групповой установки «нуля» с помощью электромеханического коммутатора (модель МН-2).

В настоящее время в ряде моделирующих установок (МПТ-9, ЭМУ-10, МН-8) используются решающие усилители с автоматической стабилизацией нулевого уровня, основанные на свойстве систем с отрицательной обратной связью уменьшать эффект влияния внешних возмущений, воздействующих на элементы, охваченные обратной связью.

Если в цепь такой обратной связи включить дополнительно усилитель с достаточно большим коэффициентом усиления, то эта схема будет весьма эффективно противодействовать внешним возмущениям и способствовать стабилизации нулевого уровня.

Наиболее целесообразно использовать для этой цели усилители переменного тока, у которых отсутствует «дрейф нуля».

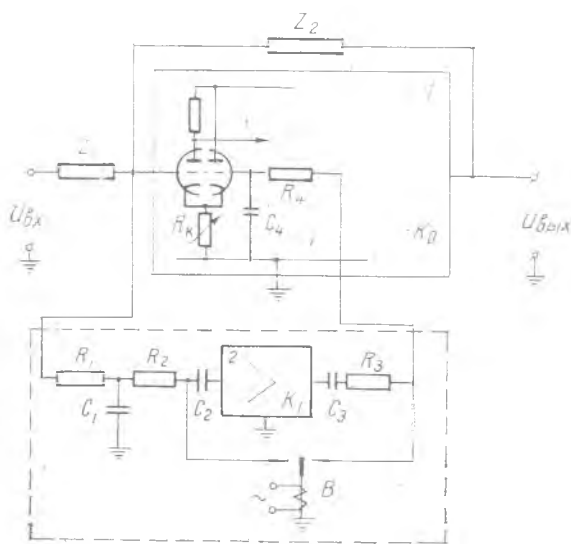


Рис. 29. Схема операционного усилителя с автоматическим регулированием нулевого уровня.

Однако следует учесть, что возмущение, эквивалентное «дрейфу нуля», изменяется сравнительно медленно и в силу этого дополнительный усилитель должен быть построен по принципу модуляции входного напряжения, последующего усиления с помощью усилителя переменного тока и демодуляции (рис. 29). В качестве модулятора и демодулятора во многих схемах используется электромеханический вибратор. Основным усилителем в схеме,

представленной на рис. 29, служит обычный усилитель постоянного тока, в котором небольшому видоизменению подверглась лишь схема первого каскада в связи с введением в нее указанной выше дополнительной обратной связи.

В целом схема автоматического регулирования нулевого уровня (рис. 29) работает по следующему принципу. При прохождении полезного сигнала канал вспомогательного усилителя ослабляет действие отрицательной обратной связи по току на сопротивлении R_k . При появлении ложного сигнала помех в виде «дрейфа» канал вспомогательного усилителя усиливает отрицательную связь по току на сопротивлении R_k , что и приводит к компенсации помехи, а следовательно, к уменьшению «дрейфа нуля».

Для усилителя типа УПТ-10 (рис. 30) в режиме масштабного звена с коэффициентом передачи $k = 1$ «дрейф нуля», приведенный ко входу, не превышает 50 мкв. Наиболее слабым местом таких усилителей является электромеханический вибропреобразователь, требующий постоянного наблюдения и тщательной регулировки контактов.

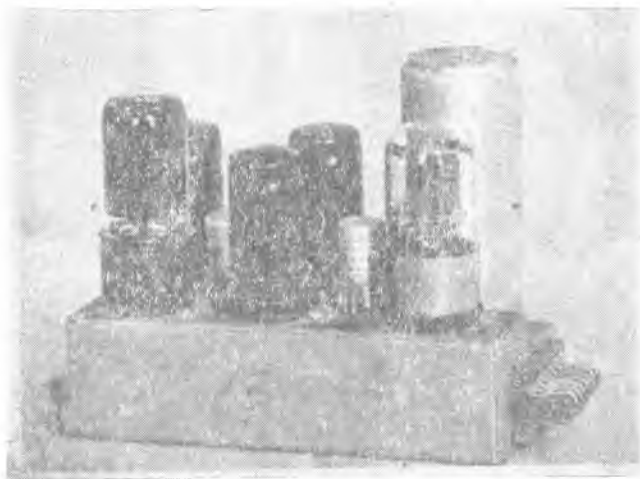


Рис. 30. Общий вид усилителя типа УПТ-10.

В настоящее время широкое применение получают унифицированные полупроводниковые усилители постоянного тока (например, УУ-4). Они выполняются по схеме с двумя каналами усиления высокой и низкой частоты. Низкочастотный канал содержит транзисторный модулятор, усилитель переменного тока и

диодный демодулятор. Дрейф выходного напряжения, приведенный ко входу за 8 часов составляет около 2 мв.

Шкала выходного напряжения усилителя ± 30 в.

Литература: [8], [9], [16].

§ 2. Погрешности решающих усилителей постоянного тока

Для оценки точности решения дифференциальных уравнений, прежде всего, необходимо определить погрешности решающих элементов, основные источники погрешности и их влияние на общую ошибку и, наконец, установить пути и методы уменьшения наиболее существенных составляющих погрешности.

Ошибкой или погрешностью решающего элемента обычно называют разность между идеальным и реальным значениями выходной величины в данный момент при одном и том же значении входной величины:

$$\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых} \cdot \text{н.}} - U_{\text{вых} \cdot \text{р.}} \quad (3.3)$$

В свою очередь, полная ошибка $\Delta U_{\text{вых}}$ может быть разделена на две части: систематическую и случайную.

$$\Delta U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых} \cdot \text{сист.}} + \Delta U_{\text{вых} \cdot \text{случ.}} \quad (3.4)$$

Систематическая часть полной ошибки постоянна либо меняется по заранее известному закону. Случайная часть ошибки вызывается случайно действующими факторами или разбросом параметров в пределах допуска для деталей, составляющих решающий элемент. Случайные ошибки могут изменяться произвольно во времени или быть постоянными.

В качестве критерия точности моделирующей установки нельзя принять абсолютное значение ошибки, так как точность работы модели зависит не только от абсолютной ошибки выходной величины, но и от значения самой выходной величины. Очевидно, при равных абсолютных значениях общей ошибки точность будет тем выше, чем больше значение выходной величины.

Поэтому значительно удобнее пользоваться величиной относительной погрешности:

$$\delta U_{\text{вых}} \% = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых} \cdot \text{макс.}}} \cdot 100 \% \quad (3.5)$$

где $U_{\text{вых} \cdot \text{макс}}$ — максимальное значение выходного напряжения.

Точность современных серийных моделирующих установок оценивается примерно в 2—5%, однако эта величина зависит от порядка решаемого дифференциального уравнения и степени его сложности. В ряде случаев удается получить точность в 0,5—2%, что является достаточно хорошим результатом при решении многих инженерных задач.

Следует отметить, что большую роль при проверке работоспособности машины непрерывного действия играет также решение

контрольных задач. Степень отличия машинного решения от точного характеризует эксплуатационную пригодность и точность обследуемой машины.

Литература: [7], [16].

§ 3. Системы управления моделями. Режимы работы

Управление моделирующими установками производится с панели или пульта и должно обеспечивать контроль и регулировку нулей операционных усилителей; контроль входных и выходных величин операционных усилителей; задание начальных условий и постоянных возмущений; «пуск» — включение процесса решения задачи; «останов» — прекращение (фиксация) решения для производства измерений или перехода к следующему этапу решения; «стоп» — возврат в исходное положение; сигнализацию и защиту от перегрузки блоков операционных усилителей.

Система управления должна быть проста, надежна и удобна в эксплуатации. Чем меньше коммутационной контактной аппаратуры входит в схему, тем выше ее надежность.

В качестве примера рассмотрим простейшую схему управления моделирующей установкой. На рис. 31 показана схема пульта управления и схема одного из блоков операционных усилителей в режиме интегратора.

Подготовка модели к работе производится выключателем T_1 , при этом срабатывает реле РВ, которое включает источники питания и все вспомогательные цепи (на схеме не показаны). Одновременно через замкнутые контакты 2РБП подается питание в обмотку реле начальных условий РНУ блока операционного усилителя. Контакты этого реле 1РНУ и 2РНУ включают усилитель в режим задания начальных условий. Через контакты 3РБП включается белая сигнальная лампочка на пульте, сигнализируя о готовности модели к работе.

При кратковременном нажатии кнопки «пуск» срабатывает реле РП, контакты которого 1РП включают реле блокировки пуска РБП, при этом реле РБП самоблокируется контактами 1РБП. Контакты 2РБП отключают цепи задания начальных условий, а контакты 3РБП выключают белую сигнальную лампочку. Одновременно с включением реле РБП загорается зеленая сигнальная лампочка и срабатывает реле РУ, которое контактами 1РУ включает операционный усилитель. Начинается процесс решения.

Для остановки решения нажимается кнопка «останов», через которую подается питание на реле остановки РО. Это реле самоблокируется контактами 1РО и в дальнейшем питается через замкнутые контакты по цепи: 1РБП, 1РО, 2РП. Через эту же цепь подается питание на реле остановки решения РОР в блоке операционного усилителя, которое отключает входные цепи усилителя, благодаря чему решение фиксируется в заданной точке. Дополнительно зажигается красная сигнальная лампочка.

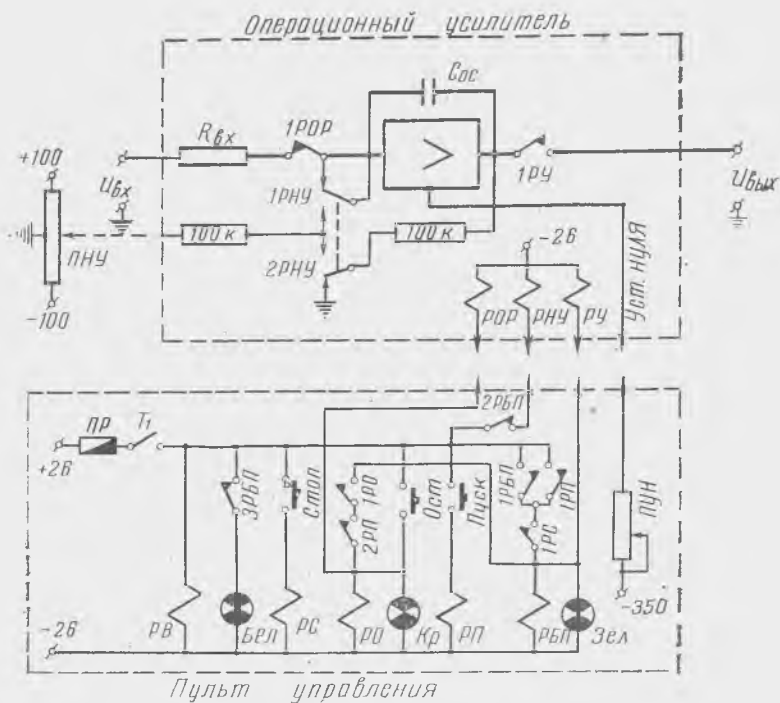


Рис. 31. Схема управления моделирующей установкой.

Для прекращения решения и возвращения модели в исходное положение нажимается кнопка «стоп». Срабатывает реле РС и своими контактами 1РС разблокирует (и выключает) реле РБП, при этом также отключаются реле РО и реле РУ, которое отключает операционный усилитель. Контакты 2РБП вновь включают схему задания начальных условий. Загорается белая лампочка, остальные лампочки гаснут.

Установка нуля и задание начальных условий производится потенциометрами, расположенными на пульте управления (ПНУ и ПНУ). Общий вид пульта управления модели ИПТ-5 приведен на рис. 32.

Недостатком рассмотренной простейшей схемы управления моделью является то, что для получения правильного решения необходимо включать и останавливать установку в точно заданное время, а при ручном управлении (только от кнопок) выполнить это условие весьма затруднительно. Поэтому реальные схемы управления моделями дополняются электромеханическим коммутатором, работающим от синхронного двигателя и вырабатывающим импульсы через равные промежутки времени (например 1 сек, 0,5 сек, 0,1 сек).



Рис. 32. Пульт управления моделирующей установкой ИРТ-5.

Сигнализация перегрузки решающих усилителей может быть осуществлена с помощью неоновых лампочек, зажигающихся при напряжении на выходе усилителя, равном 105 в.

Для контроля нулей и выходных напряжений блоков модели на пульте управления обычно предусматриваются контрольно-измерительные приборы (вольтметры) с регулируемыми пределами измерений.

Отсчет времени производится с помощью счетчика.

В общих чертах схемы управления различными моделирующими установками более или менее аналогичны.

Литература: [10], [16], [17], [19].

§ 4. Измерительная аппаратура для снятия решения

Для наблюдения и записи (регистрации) процесса решения задачи на моделирующих установках необходимы специальные контрольно-измерительные приборы. Применение той или иной контрольно-измерительной аппаратуры определяется, прежде всего, требованиями, предъявляемыми к ней в отношении точности, быстродействия и удобства в эксплуатации. Кроме того, во избежание внесения дополнительной погрешности в процессе решения измерительная аппаратура не должна сколько-нибудь

существенно нагружать блоки модели. Погрешностью, вносимой измерительной и контрольной аппаратурой, можно пренебречь, если величина тока нагрузки будет не более 1—3 ма. Это определяет величину входного сопротивления приборов, которая должна быть примерно равна 1000—2000 ом на вольт.

Наиболее простым и достаточно точным методом измерения, не требующим к тому же дорогой аппаратуры, является использование высокоомных вольтметров класса 0,2 или 0,5. Одним из таких приборов, удовлетворяющих поставленным выше требованиям, является вольтметр типа М-106. При данном способе регистрации решения процесс ведут в «старт-стопном» режиме, включая и останавливая модель через определенные интервалы времени и записывая каждый раз значение измеряемой величины. В конечном итоге результат будет представлен в виде таблицы дискретных значений искомой величины в функции времени. По данным такой таблицы решение может быть воспроизведено графически (рис. 33).

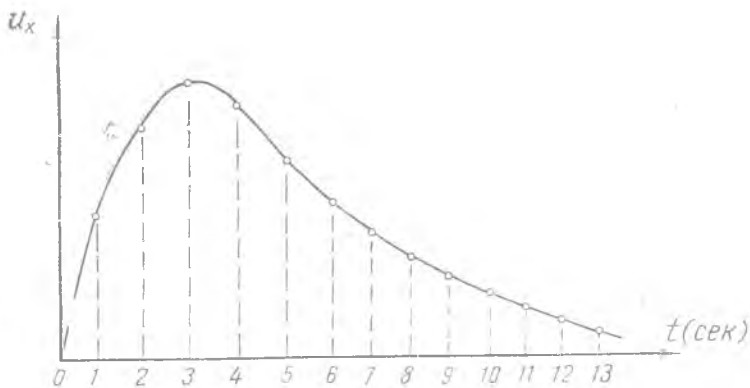


Рис. 33. Снятие решения задачи по точкам.

Однако этот способ, несмотря на свою простоту, в случае длительного процесса решения и большого числа снимаемых точек становится весьма трудоемким и зачастую отнимает много времени; к тому же возможны визуальные ошибки оператора.

Дальнейшим развитием этого принципа является использование автоматических приборов, преобразующих непрерывную измеряемую величину в дискретные числа. К таким автоматическим приборам относится электронный цифровой печатающий вольтметр типа ЭЦПВ-2 (рис. 34).

ЭЦПВ-2 состоит из двух основных частей: собственно цифрового вольтметра, выдающего численные результаты измерений, и печатающей приставки. ЭЦПВ-2 имеет предел измерения до ± 100 в с выдачей результатов в виде трехзначных чисел. Точ-

ность измерения самого прибора около 0,5%. Частота измерений 1 или 0,5 *гц*. Прибор может работать как от собственного отметчика времени, так и синхронно с моделью, но с частотой не выше указанной.

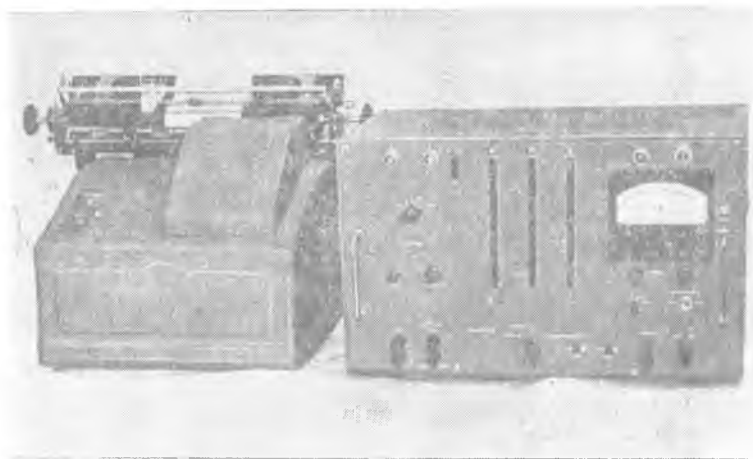


Рис. 34. Электронный цифровой печатающий вольтметр типа ЭЦПВ-2.

Непосредственное графическое воспроизведение исследуемых процессов можно получить с помощью двухкоординатного регистрирующего прибора ДРП-2.

С помощью прибора ДРП-2 записываются аналоговые переменные, представленные мгновенными значениями напряжений постоянного тока в прямоугольной системе координат. Графики строятся автоматически либо на фазовой плоскости, либо в функции времени, если по одному из входов извне подается линейно-изменяющееся входное напряжение пропорциональное времени.

ДРП-2 позволяет записывать на одном листе семейство графиков, что важно при исследовании задач определенного класса. Графики вычерчиваются на миллиметровой бумаге. Это значительно сокращает время обработки результатов вычислений. Запись графика осуществляется как в одном, так и в четырех квадрантах. По точности регистрации прибор ДРП-2 соответствует классу 0,2. При этом динамическая погрешность при скорости изменения входных переменных от 0 до 200 *в/сек* также составляет не более 0,2%. Время пробега пером всей шкалы не более 1 *сек*.

При исследовании систем автоматического регулирования ДРП-2 можно использовать для построения фазовых портретов переходных функций.

Запись решения задачи можно производить также с помощью обычных шлейфовых осциллографов, допускающих одновремен-

ную регистрацию нескольких величин. Наиболее подходящим для этой цели является осциллограф типа Н-700 с записью на фотобумагу шириной 120 мм.

Для наблюдения за ходом процесса решения, что необходимо при ориентировочной оценке правильности решения и уточнения значений выбранных масштабов и коэффициентов передач, широко применяются электронно-лучевые индикаторы с длительным послесвечением экрана трубки (до 30 сек). Наиболее удобными являются индикаторы типа И-4 (рис. 35) и И-5М.

Управление и синхронизация индикаторов осуществляется с пульта моделирующих установок. Предусматривается возможность регулирования длительности развертки луча и подача отметок времени. Электромеханический коммутатор обеспечивает возможность одновременного наблюдения двух процессов. Конструкция индикаторов И-4, И-5М допускает фотографирование изображения с помощью фотоприставки ФП-2.

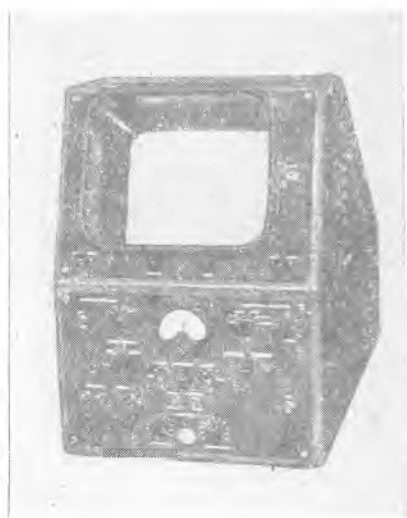


Рис. 35. Электрооптический индикатор И-4.

Литература: [16], [28], [54].

Глава IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Для моделирования нелинейных зависимостей вида $y=f(x)$ или $z=f(x, y, \dots)$ используются функциональные преобразователи, воспроизводящие заданные нелинейные функции одного, двух или нескольких аргументов. Применение функциональных преобразователей существенно расширяет возможности и круг задач, решаемых на электронных моделирующих установках.

Функциональные преобразователи можно разделить на универсальные и специализированные. Универсальные преобразователи позволяют с помощью одного устройства в результате перестройки воспроизводить различные функциональные зависимости. Специализированные преобразователи приспособлены для воспроизведения только одной определенной зависимости. Сюда, например, могут быть отнесены устройства, использующие квадратичный характер зависимости анодного тока (при малых анодных токах) от сеточного напряжения трехэлектродной лампы или логарифмическую зависимость сеточного напряжения от сеточно-

го тока. В практике построения электронных интеграторов и моделей, а также отдельных счетно-решающих устройств оба типа устройств нашли себе применение.

Различают функциональные устройства электромеханического и электронного типов. Последние практически безынерционны и являются менее трудоемкими в изготовлении и наладке.

Что касается способа представления заданной для воспроизведения функции, то здесь могут быть использованы приближенные способы, например, задание функции в виде ряда, кусочно-линейная аппроксимация, метод шаблона и т. д.

§ 1. Электромеханические функциональные преобразователи

Электромеханические преобразователи, применяемые в моделирующих установках, используются, в основном, для воспроизведения заданных функций времени

$$U = U_0 \cdot \alpha(t) \quad (4.1)$$

или

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot \alpha(t), \quad (4.2)$$

где U_0 — опорное напряжение, равное ± 100 в;
 $\alpha(t)$ — переменный коэффициент ≤ 1 .

Устройства, реализующие зависимость (4.2), называют вариаторами коэффициентов, так как с их помощью производится умножение входной величины на переменный во времени коэффициент, абсолютная величина которого меньше единицы.

Конструктивно электромеханические преобразователи выполняются кулачкового либо шагового типа.

Кулачковый преобразователь (рис. 36) состоит из линейного потенциометра, движок которого перемещается с помощью тросика, и профилированного кулачка, выполненного в соответствии с заданной для воспроизведения функцией времени.

Натяжная пружина служит для обеспечения постоянного касания ролика и кулачка. Ось кулачка приводится в движение от электродвигателя с постоянной скоростью. Кулачковый преобразователь рассмотренно-

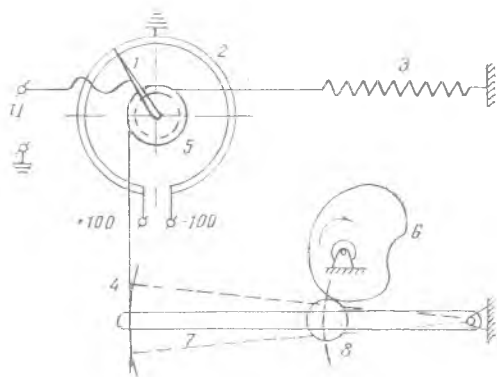


Рис. 36. Схема кулачкового преобразователя.

1 — токосъемник; 2 — потенциометр; 3 — натяжная пружина; 4 — струна; 5 — барабан; 6 — кулачок; 7 — рычаг; 8 — ролик.

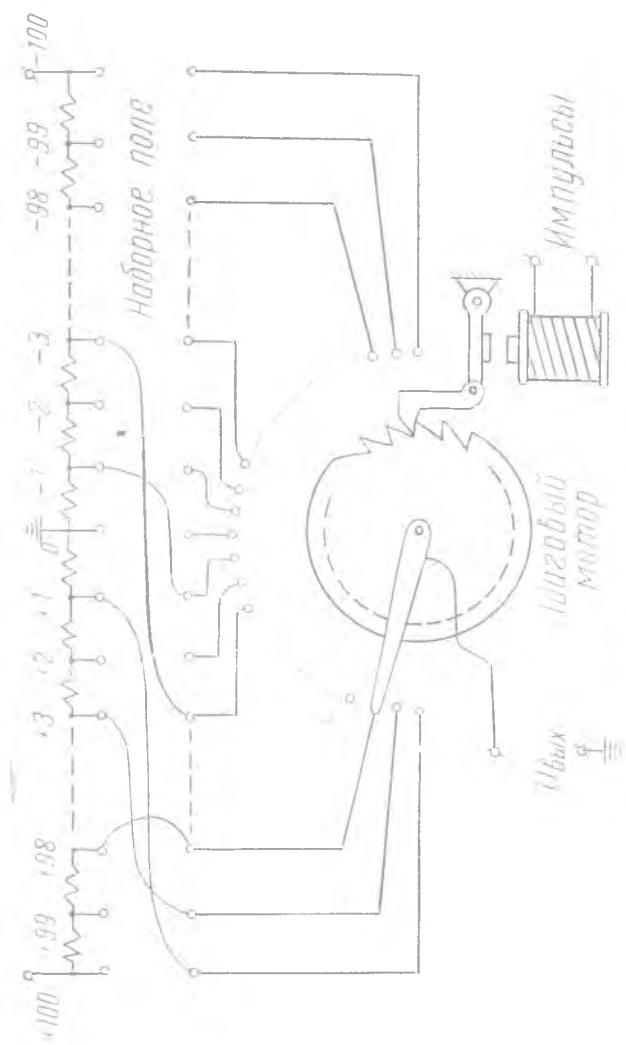


Рис. 37. Схема многого преобразователя.

го типа при точности выполнения кулачка $\pm 0,1\text{--}0,5$ мм и наибольшем радиусе кулачка 60 мм дает погрешность $\pm 0,16\text{--}0,33\%$. К недростаткам этих устройств следует отнести сравнительно высокую трудоемкость изготовления кулачков.

Шаговый преобразователь относится к устройствам со ступенчатой аппроксимацией заданной функции. Подобного типа вариаторы использованы в блоках переменных коэффициентов электронных моделей ИПТ-5, МПТ-9. Основу такого преобразователя составляет 100-ламельный шаговый искатель (рис. 37).

Шаговый мотор управляется импульсами от прерывателя, расположенного в пульте управления модели. Время переключения с ламели на ламель может быть равным 1,5 сек., 1 сек., 0,75 сек., 0,25 сек. и 0,1 сек.

Значения напряжений, подводимых к ламелям вариатора, могут быть набраны ступенчато по любому закону от делителя напряжений, причем на делителе имеется 100 интервалов деления положительного напряжения и столько же — отрицательного. Коммутация от делителя к ламелям искателя осуществляется на специальном наборном поле.

Для набора заданной функции (коэффициентов) строят график на миллиметровой бумаге, выбирают узловые точки t_k и подбирают ступеньки на глаз так, чтобы, примерно, осуществлялось правило равенства площадей (рис. 38). После этого, исходя из

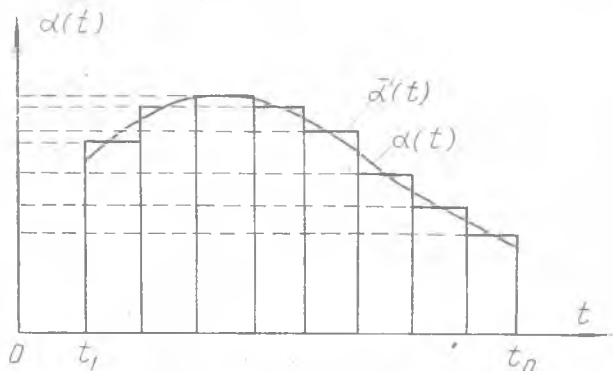


Рис. 38. Ступенчатая аппроксимация заданной функции.

полученных значений ординат $\bar{\alpha}_k$ и используя 100-контактный делитель, производят распайку клемм на наборном поле шагового преобразователя. К достоинствам шаговых преобразователей относится простота набора заданной функции и достаточно высокая точность воспроизведения. Существенные недостатки этих устройств заключаются в сложности конструкции и больших габаритах.

Литература: [9], [16], [18].

§ 2. Электронные функциональные преобразователи

Для воспроизведения нелинейных характеристик элементов моделируемой физической системы наиболее широкое применение получили диодные функциональные преобразователи. Они представляют собой параметрические устройства, использующие кусочно-линейную аппроксимацию заданной функции. Такие устройства можно подразделить на специализированные нелинейные элементы, моделирующие простые типичные нелинейные характеристики элементов физической системы и универсальные функциональные преобразователи, предназначенные для получения нелинейных зависимостей по заданному закону.

К числу типичных нелинейных зависимостей, характерных, в частности, для систем автоматического регулирования, относятся нелинейности типа «зоны нечувствительности» (рис. 39 а), «ограничения» (рис. 39 б) и «люфта» (рис. 39 в), имеющие место в зазорах механических передач.

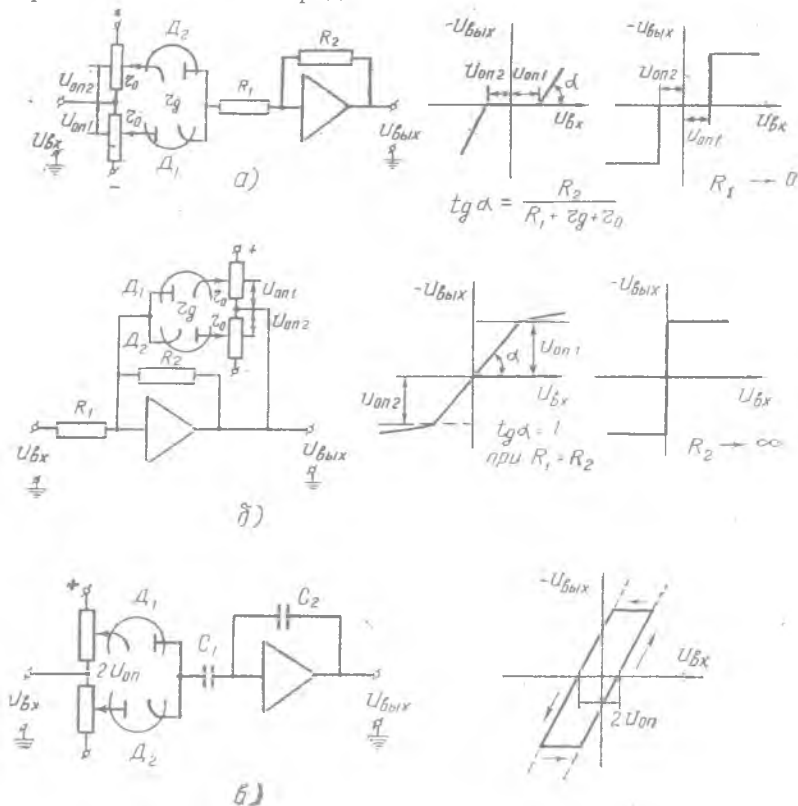


Рис. 39. Схема воспроизведения типичных нелинейностей: а — моделирование «зоны нечувствительности», б — моделирование «ограничения», в — моделирование зазоров («люфта») в передачах

Для воспроизведения нелинейности подобного типа могут быть использованы операционные усилители в сочетании с диодными элементами, включаемыми на вход усилителя, в цепь обратной связи или, наконец, комбинированным способом (рис. 39).

Для получения более сложных функциональных зависимостей $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ в моделирующих установках используются вентильные схемы. Они состоят из диодных ячеек, которые производят кусочно-линейную аппроксимацию зависимостей, то есть заменяют их ломаной линией из конечного числа отрезков, например, в виде, показанном на рис. 40. Тогда заданную функцию можно представить приближенно выражением:

$$U_{\text{вых}} = U_0 + k_0 U_{\text{вх}} + \sum_{i=1}^n k_i (U_{\text{вх}} - U_{i0}), \quad (4.3)$$

где U_{i0} — опорные напряжения в начале каждого отрезка разбиения аргумента, а

$$k_i = \begin{cases} 0 & \text{при } U_{\text{вх}} \leq U_{i0}, \\ \text{const} & \text{при } U_{\text{вх}} > U_{i0}. \end{cases}$$

Схема для воспроизведения зависимости $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, представленной на рис. 40, приведена на рис. 41.

Как видно из рис. 41, схема состоит из типовых диодных ячеек, каждая из которых содержит сопротивления, диод и источник

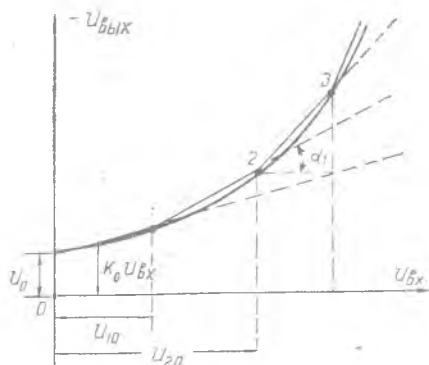


Рис. 40. Кусочно-линейная аппроксимация заданной кривой.

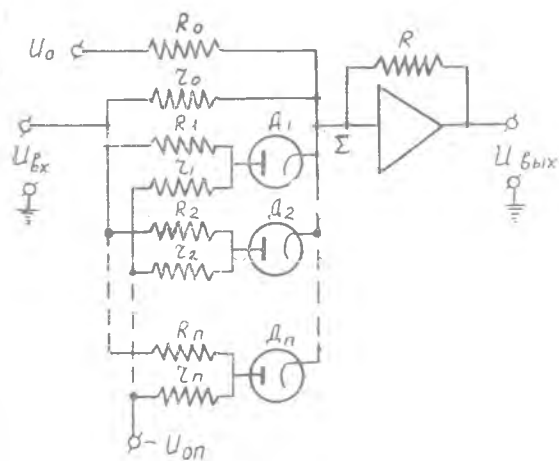


Рис. 41. Схема функционального преобразователя с диодными элементами.

опорного порогового напряжения, запирающего диод при напряжениях меньших, чем заданное. Если этот источник имеет отрицательный знак, то ток, пропускаемый, к примеру, диодом D_1 , составит

$$i = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1} - \frac{U_{\text{оп}}}{r_1} \geq 0.$$

Сопротивлением диода пренебрегаем.

Пороговое напряжение, при котором выпрямитель отпирается и начинает пропускать ток, равно:

$$U_{10} = U_{\text{оп}} \cdot \frac{R_1}{r_1}, \quad (4.4)$$

а наклон характеристики

$$\text{tg } \alpha_1 = \frac{R}{\frac{R_1 \cdot r_0}{R_1 + r_0}}. \quad (4.5)$$

Таким образом, при возрастании входного напряжения диоды D_1, D_2, \dots, D_n будут отпираться по очереди, обеспечивая на каждом участке 1—2, 2—3, . . . необходимый наклон характеристики.

Переключая полюсы диодов, изменяя знак опорного напряжения, подавая прямое или инвертированное входное напряжение, а также включая диодные ячейки на вход или в обратную связь решающего усилителя, можно получать самые разнообразные функциональные зависимости.

В универсальных функциональных преобразователях для удобства набора заданных функций сопротивления R_0, r_0, R_i, r_i выполнены переменными, что придает схеме достаточную гибкость.

Общий вид универсального функционального преобразователя (блока нелинейности) приведен на рис. 42.



Рис. 42. Общий вид универсального блока нелинейностей типа БН-3.

Для настройки функционального преобразователя (блока нелинейностей) на заданную нелинейную зависимость $U_{\text{вх}} = f(U_{\text{вых}})$ обычно прибегают к графическому построению аппроксимирующего многоугольника. Для этого нелинейная зависимость изображается в виде графика на миллиметровой бумаге в координатах $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ в увеличенном масштабе.

Очевидно, что точность аппроксимации возрастет с увеличением числа отрезков разбиения всей шкалы изменения аргумента, а последнее в свою очередь определяется числом диодных ячеек преобразователя. В стан-

дартных блоков нелинейностей таких ячеек обычно имеется от 12 до 16.

Практика построения функциональных преобразователей показала, что для многих преобразований погрешность аппроксимации $\Delta \epsilon = 0,25\%$ обеспечивает суммарную погрешность порядка 0,75—1%. Уменьшение величины ϵ ниже указанного значения приводит к резкому увеличению требуемого числа участков раз-

бияния аргумента, а следовательно, к увеличению числа диодных элементов и потере суммарной точности.

Основной недостаток диодных преобразователей состоит в том, что крутизна воспроизводимых ими функций ограничена. Универсальные диодные функциональные преобразователи сложны в настройке. Подготовка их к работе, то есть задание моделируемой функции, требует определенного времени.

В технике электрического моделирования применяются также универсальные функциональные устройства, основанные на использовании электронно-лучевых трубок.

В заключение следует отметить, что использование нелинейных характеристик некоторых физических элементов электрических цепей в их естественном виде имеет ограниченное применение в электромоделях. Практически используются лишь карборундовые сопротивления (тириты). Недостатками таких элементов являются необходимость температурной компенсации и ограниченные возможности изменения вида характеристик.

При решении ряда сложных задач, таких например, как исследование систем управления летательными аппаратами, систем автоматического управления производственными процессами, решение различных баллистических задач и др., встречается необходимость воспроизведения функций от двух и большего числа аргументов.

Функции двух переменных принципиально могут быть воспроизведены несколькими способами, в том числе:

- посредством использования пространственных кулачков;
- с помощью математического разложения вида:

$$f(x_i, y_i) = g(x_i) + h(y_i) + g'(x_i) \cdot h'(y_i) + g''(x_i) \cdot h''(y_i) + \dots$$

для таблично заданных функций;

— путем кусочно-линейной аппроксимации функции и применения диодных преобразователей с использованием вспомогательных «треугольных функций»;

— наконец, возможно использование рассмотренной выше схемы диодного преобразователя от одного аргумента (рис. 41) в случае, если опорное напряжение $U_{оп}$ сделать также переменным.

При линейном изменении опорного напряжения в функции $U_{вх}$ получается семейство эквидистантных нелинейных кривых. Если изменять $U_{оп}$ по некоторой нелинейной зависимости $U_{оп} = f(U_{вх})$, то можно воспроизвести более сложную по характеру функцию двух переменных.

Однако, следует отметить, что задача воспроизведения функции двух и большего числа аргументов представляет известные трудности и требует дальнейших разработок.

В настоящее время отечественной промышленностью освоен

выпуск электронных блоков нелинейной непрерывной функции от двух переменных $z=f(x, y)$ типа БН2П (рис. 43).

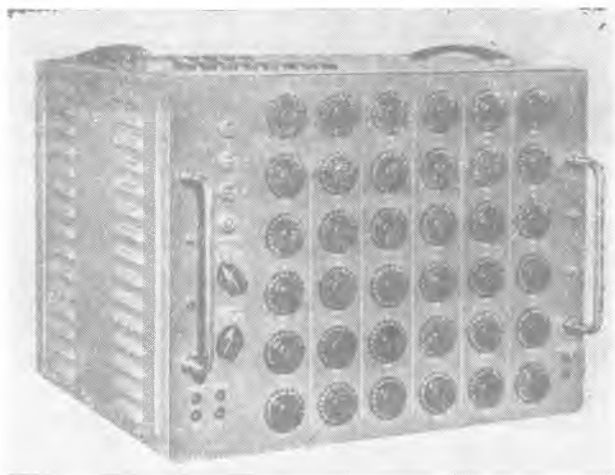


Рис. 43. Общий вид блока воспроизведения нелинейной функции двух переменных типа БН2П.

Литература: [7], [16], [18].

§ 3. Множительные и делительные устройства

Большие трудности возникают при непосредственном умножении (или делении) двух непрерывно изменяющихся зависимых переменных. Поэтому обычно при создании множительных устройств операция умножения сводится к совокупности более простых для моделирования операций: сложения и функционального преобразования. Для этого могут быть использованы различные математические соотношения.

$$z = x \cdot y = \text{anti lg} (\lg x + \lg y), \quad (4.6)$$

$$z = x \cdot y = \frac{1}{2} [\cos(\arcsin x - \arcsin y) - \cos(\arcsin x + \arcsin y)], \quad (4.7)$$

$$z = x \cdot y = \left(\frac{x+y}{2}\right)^2 - \left(\frac{x-y}{2}\right)^2. \quad (4.8)$$

Наибольшее применение получили множительные устройства, основанные на реализации формулы (4. 8). Они состоят из суммирующих усилителей и функциональных преобразователей, воспроизводящих квадратичную зависимость между напряжением на входе и током на выходе. Такие квадраторы строятся или на основе диодных схем (рис. 41) или на основе тиритовых сопротивлений с характеристиками типа квадратичной параболы.

Промышленные блоки производства (например, БП-2) воспроизводят обычно зависимость:

$$U_z = \frac{1}{100} U_x \cdot U_y \quad (4.9)$$

Деление также можно осуществлять несколькими способами.

Одним из них является умножение на обратную величину, получаемую с помощью функционального преобразователя, реализующего гиперболическую зависимость (рис. 44).

$$U_{y^{-1}} = \frac{a}{U_y} \quad (4.10)$$

Однако этот способ дает очень большую погрешность в диапазоне малых значений входной величины U_y и поэтому практически удобен.

Другой способ деления состоит в обращении операции умножения путем включения множительного устройства в цепь обратной связи операционного усилителя по схеме на рис. 45. Пусть множительное устройство производит здесь операцию.

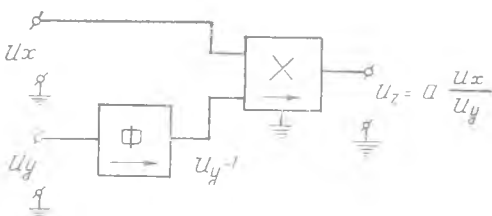


Рис. 44. Схема деления двух переменных путем умножения на обратную величину.

$$U_x = a \cdot U_y \cdot U_z \quad (4.11)$$

Считая, что напряжение на входе усилителя близко к нулю, получим

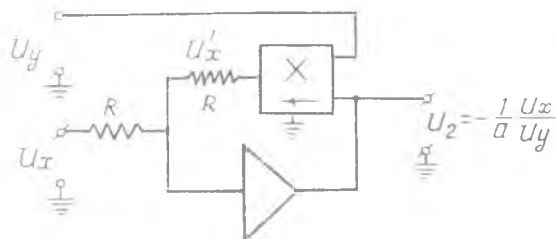


Рис. 45. Схема деления двух переменных путем обращения операции умножения.

$$\frac{U_x}{R} = -\frac{U_x'}{R}, \text{ то есть}$$

$$U_x = -U_x' \quad (4.12)$$

Окончательно имеем:

$$U_z = -\frac{1}{a} \cdot \frac{U_x}{U_y} \quad (4.13)$$

Практически при использовании по-

добных схем воспроизводится зависимость

$$U_z = -10 \frac{U_x}{U_y} \quad (4.14)$$

Чтобы не создавать отдельной конструкции блока деления, можно для этой цели использовать имеющиеся блоки производства БП, если операционный усилитель на выходе блока включить в цепь обратной связи функциональной части этого же блока.

Тогда с помощью несложных переключений можно получить универсальный блок деления — умножения (БДУ). Схема блока представлена на рис. 46.

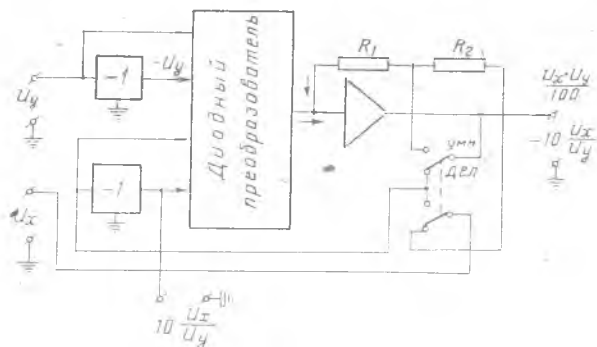


Рис. 46. Схема блока умножения-деления.

Литература: [7], [16], [18].

Глава V. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА МОДЕЛИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ

Для решения на моделирующей установке поставленной задачи необходима, прежде всего, четкая и подробная ее формулировка. Для полноты условий задачи желательно иметь формуляр условий в следующем виде.

1. Введение. Указывается название данной задачи, ссылка на принятые допущения и т. д.

2. Формулировка задачи. Кратко излагается, какие вычисления должны быть выполнены и какие конкретные результаты ожидаются от этих вычислений. Здесь же могут быть приложены чертежи и схемы.

3. Математические соотношения. Вносятся все математические уравнения и неравенства, используемые при вычислениях.

4. Начальные и граничные условия.

5. Перечень принятых обозначений. Для справочных целей даются в виде списка определения всех введенных обозначений.

6. Численные значения постоянных. Указываются численные значения постоянных коэффициентов и единицы измерения.

7. Предполагаемые пределы изменения переменных.

8. Параметры, которые должны варьироваться. При исследовании влияния изменения параметров, необходимо задать либо значения, которые должны принимать эти параметры, либо границы их изменения. Должно быть также указано ориентировочное общее число решений на моделирующей установке, которое надо получить таким образом.

9. Результаты, ожидаемые от вариации параметров.

10. Возможные проверочные решения.

11. Использование результатов. Этот пункт может содержать сведения о конечной цели использования результатов вычислений.

12. Требуемая точность вычислений. Заданная система перед решением вместе с начальными условиями всегда подвергается математической обработке. Полученная путем преобразований и пригодная к набору система, которую обычно называют машинной, может весьма сильно отличаться от заданной.

При преобразованиях к машинному виду следует добиваться выравнивания коэффициентов системы и начальных условий, так как точность набора их в машине обычно бывает ограничена двумя — тремя знаками.

Масштабы представления зависимых переменных и времени определяют, исходя из максимальных значений переменных и желательной длительности процесса решения. Если же эти значения неизвестны (что бывает во многих случаях), то масштабы подбирают ориентировочно, а затем уточняют путем проведения пробных решений. Во всяком случае, для получения более точного решения следует стремиться к полному использованию диапазона шкалы модели (± 100 в).

Общих рецептов для выбора масштабных множителей дать нельзя, их определяют, исходя из конкретных особенностей системы.

Таким образом, в подготовительную часть для решения задачи войдут следующие операции.

1. Приведение задачи к виду, удобному для моделирования.
2. Выбор масштабов представления зависимых переменных.
3. Выбор масштаба времени.
4. Приведение системы к машинному виду.
5. Составление рабочей блок-схемы.
6. Снятие решения.
7. Обработка результатов.

Литература: [16], [17], [19].

§ 1. Решение линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами

Рассмотрим в качестве примера решение задачи по исследованию характера изменения выходной величины механической системы, состоящей из пружины и гидравлического демпфера (рис. 47) при заданном начальном смещении поршня.

Уравнение движения исследуемой системы имеет вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + c \cdot x = 0, \quad (5.1)$$

где m — масса поршня;

$\beta = \frac{S^2}{k}$ — коэффициент вязкого трения демпфера;

S — площадь поршня;

k — коэффициент, определяющий сопротивление шунтирующей трубки движению жидкости, величина которого зависит от степени открытия перепускного вентиля;

c — коэффициент жесткости пружины.

При значениях коэффициентов $m=1$; $\beta=0,4$; $c=0,8$ получаем однородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 0,4 \frac{dx}{dt} + 0,8x = 0. \quad (5.2)$$

При начальных условиях $t=0$; $x_0=1$; $x'_0=0$ уравнение (5.2) описывает затухающий колебательный процесс и имеет аналитическое решение:

$$\begin{cases} x = e^{-0,2t} \cos 0,872t + 0,229 \cdot \sin 0,872t; \\ x' = -0,918e^{-0,2t} \cdot \sin 0,872t. \end{cases} \quad (5.3)$$

Так как решение имеет затухающий характер и максимальные значения искомой функции не могут быть больше начального значения, то масштабы зависимых переменных и времени определяются следующим образом:

$$M_t = \frac{t}{\tau} = 1; \quad M_x = \frac{x_{\max}}{100} = \frac{1}{100} = 0,01 = M_{x'},$$

где τ — машинное время (в данном случае, равное натуральному).
Обозначая машинные переменные как

$$U = \frac{x}{M_x} = \frac{x}{0,01}; \quad U' = \frac{x'}{0,01},$$

переходим к машинному уравнению

$$\frac{d^2U}{d\tau^2} + 0,4 \frac{dU}{d\tau} + 0,8U = 0 \quad (5.4)$$

с начальными условиями

$$\tau = 0; \quad U_0 = 100; \quad \left(\frac{dU}{d\tau}\right)_0 = 0.$$

Разрешаем уравнение относительно старшей производной

$$\frac{d^2U}{d\tau^2} = -0,4 \frac{dU}{d\tau} - 0,8U$$

и переходим к составлению блок-схемы. Учитывая, что коэффициенты уравнения (5.4) меньше единицы, их удобнее набирать на отдельных блоках постоянных коэффициентов. Это позволит в случае необходимости легко производить вариацию коэффициентов.

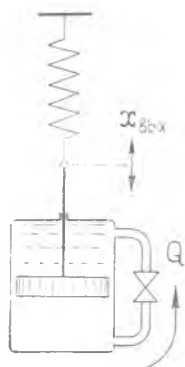


Рис. 47. Схема упругой механической системы.

Таблица 1

τ	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
$U_{\text{выч}}$	67,2	-41,4	9	3,88	-6,4	5,04	-1,9	1,11	-0,2	-0,09	0,14	0,1
U	68	-40,5	7,3	5,6	-7	5	-2,8	1	-0,1	-0,2	0,22	0,15

τ	4	7	11	14
$U_{\text{выч}}$	-45,75	23,29	-11,37	5,32
U	-46,2	24	-12,5	6

Средняя приведенная погрешность решения составляет 0,56%, максимальная — 1,32%.

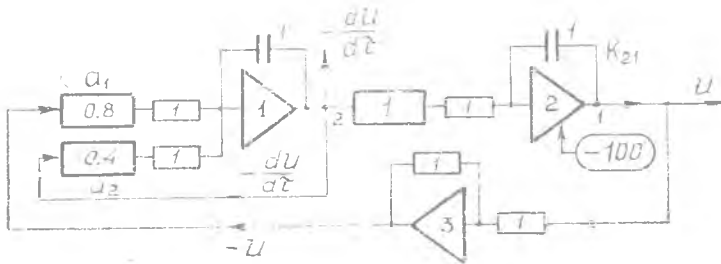


Рис. 48. Рабочая блок-схема для решения дифференциального уравнения 2-го порядка.

Таблица 2

τ	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
$U'_{\text{выч}}$	-57	-25	24,75	-15,15	7,24	-1,84	0	0,72	-0,64	0,37	-0,16	0,04
U'	-56	-26,5	25	-15,5	7	-1,2	0,4	1,5	-0,95	0,45	-0,05	0,08

τ	1,7	5	13	16
$U'_{\text{выч}}$	-65,09	31,67	6,4	-3,67
U'	-65	32	6	-4

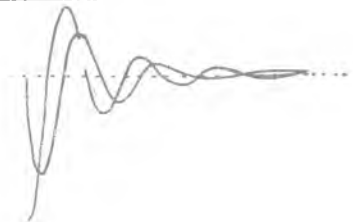


Рис. 49. Осциллограмма к схеме на рис. 48.

Рабочая блок-схема решения задачи представлена на рис. 48. Решение задачи приведено в табл. 1 и 2.

Средняя приведенная погрешность — 0,53%, максимальная — 1,5%. Осциллограмма решения представлена на рис. 49.

Литература: [16].

§ 2. Решение линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами

Решение линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами вида

$$\frac{d^n x}{dt^n} + a_1(t) \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n(t) x = F(t), \quad (5.5)$$

где $a_1(t) \dots a_n(t)$ — переменные коэффициенты, зависящие от времени, осуществляется с использованием блоков переменных коэффициентов, описанных выше в § 1 гл. V.

$$U \rightarrow \boxed{\alpha(t)} \rightarrow \alpha(t) U; \max |\alpha(t)| \ll 1.$$

Для решения уравнений указанного типа необходимо, чтобы каждый из переменных коэффициентов был представлен определенной математической зависимостью либо в виде графика. На основании этих данных и производится настройка блоков переменных коэффициентов.

Рассмотрим решение дифференциального уравнения Лежандра, имеющего большое значение для ряда задач теории поля и теории антенн

$$(1-t^2) \frac{d^2 x}{dt^2} - 2t \frac{dx}{dt} + n(n+1)x = 0, \quad (5.6)$$

где n — действительное целое число, принимающее значения 0, 1, 2, 3...

Разрешая уравнение (5.6) относительно старшей производной и принимая $n=6$, при начальных условиях

$$t = 0; x_0 = -\frac{5}{16}; x'_0 = 0$$

имеем

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{1-t^2} \left[2t \frac{dx}{dt} - 6(6+1)x \right]. \quad (5.7)$$

Принимая пределы изменения переменных $-1 < x < +1$ и $0 < t < 1$, выбираем следующие масштабы представления зависимой переменной и времени:

$$U = \frac{x}{M_x} = \frac{x}{0,01}; \tau = \frac{t}{M_t} = \frac{t}{0,02}.$$

Так как независимая переменная t входит в уравнение (5.7) в явном виде, то ее необходимо представить в установке в виде

машинного времени τ и в виде напряжения T . Подставляя принятые условия в уравнение (5.6), получаем:

$$\frac{d^2(0,01U)}{0,0004d\tau^2} = \frac{1}{1-T^2} \left[2T \frac{d(0,01U)}{0,02d\tau} - 42 \cdot 0,01U \right]$$

или

$$\frac{d^2U}{d\tau^2} = \frac{0,04}{1-T^2} \left[T \frac{dU}{d\tau} - 0,42U \right] \quad (5.8)$$

при $\tau = 0$; $U_0 = -31,25$; $\left(\frac{dU}{d\tau}\right)_0 = 0$.

Далее, принимая

$$A = \frac{0,04}{1-T^2} \text{ и } B = T,$$

выбираем шаг равномерной аппроксимации переменных коэффициентов $A(T)$ и $B(T)$ равным $\Delta T = 0,02$ (масштабу времени) и рассчитываем их значения для $0 < T < 1$. Полученные значения $A(T)$ и $B(T)$ строятся графически, после чего производится их набор на блоках переменных коэффициентов (типа СБ-3). Блок-схема набора задачи приведена на рис. 50.

Решение задачи дано в табл. 3.

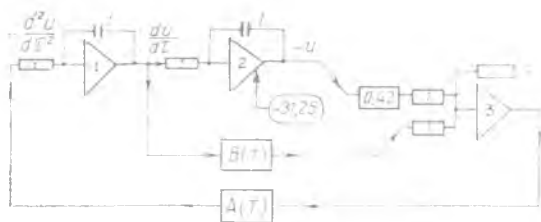


Рис. 50. Блок-схема для решения дифференциального уравнения Лежандра.

Таблица 3

τ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$U_{\text{выч}}$	-31,25	-25	-8	+12	+28	+32	+18	-12	-38	-25
U	-31,25	-25	-8,8	+12	+28,5	+32,4	+19,6	-8	-36	-29,8

Оциллограмма решения приведена на рис. 51.

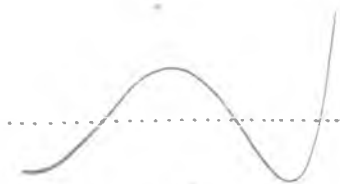


Рис. 51. Оциллограмма решения уравнения Лежандра.

Литература: [16], [19].

§ 3. Решение нелинейных дифференциальных уравнений

Моделирующие установки с комплектом нелинейных блоков, позволяющих воспроизводить заданные нелинейные зависимости и получать произведение двух переменных, дают возможность исследовать и нелинейные дифференциальные уравнения. В качестве примера рассмотрим решение нелинейного уравнения Ван дер Поля.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu(x^2 - 1) \frac{dx}{dt} + x = 0, \quad (5.9)$$

где μ — постоянный параметр.

Уравнение Ван дер Поля может быть использовано, например, для описания процесса возникновения колебаний в некоторых электрических цепях. Его решение является интересным примером моделирования нелинейного дифференциального уравнения. Нетрудно видеть, что уравнение Ван дер Поля похоже на уравнение (5.2), описывающее затухающие гармонические колебания, но имеет нелинейный член, который стремится увеличить амплитуду колебаний при малых значениях x и уменьшить при больших значениях x . Если генератору колебаний такого типа придать малое начальное отклонение x , то после окончания переходного процесса установятся периодические колебания с постоянной амплитудой.

Предположим, что $\mu = 0,1$. Известно также, что в уравнении Ван дер Поля $x_{\max} \approx 2$.

Поэтому принимаем следующие масштабы: $x = 2,5 \cdot U$, $t = \tau$.

Однако, поскольку в блок-схеме будут использованы блоки произведения (типа БП-2), уменьшающие выходное напряжение в 100 раз, масштабы следует принять: $x = 2,5 \cdot 0,01 \cdot U$; $t = \tau$. Тогда машинное уравнение будет иметь вид:

$$\frac{d^2U}{d\tau^2} = 0,1 \frac{dU}{d\tau} - 0,625 \left(U \cdot \frac{dU}{d\tau} \right) \cdot \frac{U}{100} - U. \quad (5.10)$$

Начальные условия:

$$\tau = 0; \quad U_0 = 10;$$

$$\left(\frac{dU}{d\tau} \right)_0 = 0$$

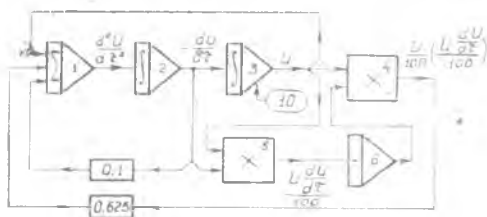


Рис. 52. Блок-схема для решения дифференциального уравнения Ван дер Поля.

Литература: [16], [17], [19].

§ 4. Решение краевых задач на моделирующих установках

Постановка многих новых научных и технических задач требует расширения возможностей применяющихся в настоящее время электрических моделей.

Так, ряд задач теории упругости, авиационной техники и внешней баллистики сводится к краевым задачам для обыкновенных дифференциальных уравнений.

Разработка дополнительной аппаратуры и методов использования электрических моделей для решения краевых задач существенно увеличивает экономический эффект применения этих моделей.

Краевые задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений решаются методом Рунге—Галеркина, методами вариационного исчисления, методом сведения к нескольким задачам Коши (для линейных уравнений), методом последовательных приближений, методом проб и др.

Наиболее простой является двухточечная граничная задача, решение которой сводится к нахождению функций $y(x)$, удовлетворяющих системе n дифференциальных уравнений

$$\frac{dy_i}{dt} f_i(y_1, y_2, \dots, y_n, t) \text{ для } i = 1, 2, \dots, n \quad (5.11)$$

и системе n краевых условий

$$H_i [y_1(a), y_2(a), \dots, y_n(a), y_1(b), y_2(b), \dots, y_n(b)] = 0. \quad (5.12)$$

Практически приемлемыми для электромоделирования можно считать метод проб и метод сведения задач к нескольким задачам Коши. Однако, как известно, применение последнего метода ограничивается линейными уравнениями.

Наиболее простым подходящим для решения краевых задач на электромоделях является метод проб, одинаково применимый как к линейным, так и нелинейным дифференциальным уравнениям. Сущность метода проб для уравнения второго порядка поясняется рис. 53.

Чтобы получить решение, проходящее через точки A и B , необходимо выполнить ряд решений с пробными начальными условиями.

При благоприятных условиях точка B может быть захвачена в «вилку» и начальные условия уточнены путем интерполяции.

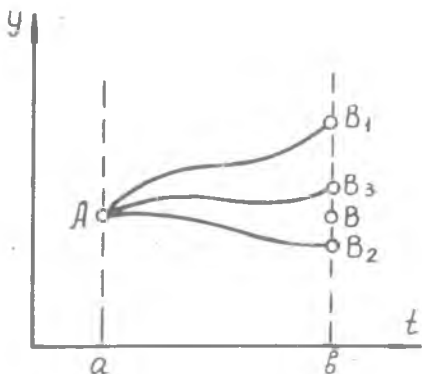


Рис. 53. К решению краевой задачи. методом проб: $y(a) = A$ и $y(b) = B$ — заданные концевые решения. AB_1, AB_2, AB_3 — пробные решения.

Благодаря большому быстрдействию электромоделей можно в течение короткого промежутка времени исследовать много вариантов решения задачи и выбрать вариант, удовлетворяющий заданным граничным условиям.

Эффективность электромоделей еще более увеличивается при работе их в режиме повторения решения и использования принципа «минимизации», который в применении к граничным задачам состоит в следующем.

Обозначим в уравнениях (5. 12)

$$H_i [y_1(a), \dots, y_n(a), y_1(b), \dots, y_n(b)] = \varepsilon_i, \quad (5.13)$$

где y_i — функции, удовлетворяющие заданной системе уравнений (5. 11), но не удовлетворяющие граничным условиям (5. 12).

Составим функцию

$$\mu = \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|. \quad (5.14)$$

Для решения задачи достаточно «минимизировать» функцию.

Эта операция может быть осуществлена с помощью «электронно-лучевого минимизатора». Прибор обеспечивает образование величины μ по выражению (5. 14) и наблюдение этой величины во времени по экрану электронно-лучевой трубки, а также нанесение метки конца интервала B .

Его отличительным качеством является возможность непрерывного наблюдения за величиной μ при автоматической периодизации процесса решения. Устройство для получения суммы модулей величин ε (получение величины μ) имеет шесть входов, что обеспечивает возможность моделирования систем до шестого порядка.

Для решения краевых задач могут быть также использованы серийные моделирующие установки типа МН-11. Эти установки позволяют производить автоматическое решение задач методом «минимизации», полуавтоматическое отыскание решения задач методом «обзора», а также моделирование обыкновенных дифференциальных уравнений до 6—9 порядка.

Литература: [7], [13], [18].

§ 5. Моделирование систем автоматического регулирования

За последнее время большое значение в расчетах и исследованиях систем автоматического управления и регулирования особенно при расчете и исследовании систем, содержащих нелинейности, а также релейных систем приобрели моделирующие машины. Из различных способов применения моделей для указанных целей отмечаем следующие:

1. Вся замкнутая система автоматического регулирования воспроизводится на модели.

2. Объект управления моделируется и сопрягается с реальным управляющим элементом (например, регулятором). Это позволяет производить наладку его не в натуральных условиях, что подчас затруднительно, а на стенде. Указанный способ, например, очень удобен при наладке автопилотов, сопрягаемых с моделью, воспроизводящей уравнения движения самолета.

3. Моделируется управляющий элемент (например, регулятор) и сопрягается с реальным объектом. Подобное моделирование проводится при изучении работы вновь проектируемого регулятора при различных его параметрах.

Возможно, наконец, моделирование части объекта или регулятора.

Если имеется полное математическое описание исследуемой системы автоматического регулирования, то процесс моделирования может быть осуществлен обычными способами, аналогично описанным в § 1, 2, 3 настоящей главы. Однако в практике наибольшее применение получил другой способ решения задач, заключающийся в том, что модель исследуемой системы собирается из отдельных элементов, соответствующих определенным звеньям структурной схемы.

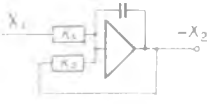
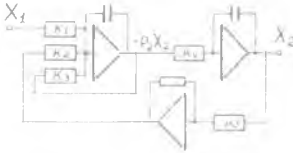
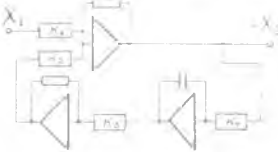
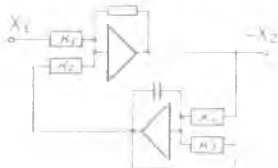
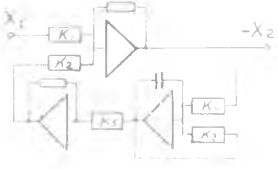
Этот способ предпочтительнее в силу ряда причин. Во-первых, системы автоматического регулирования обладают явно выраженной направленностью передачи воздействий, равно как и составляющие их звенья, передаточные функции которых выражают математическую зависимость двух величин (входной и выходной) и поэтому удобны для моделирования по звеньям. Во-вторых, набор задачи по структурной схеме дает ясное представление о соответствии величин и параметров в исследуемой системе и модели, что удобно при подборе корректирующих связей. Наконец, такой способ позволяет осуществлять набор задачи путем сочетания небольшого числа элементов модели, соответствующих типовым звеньям направленного действия, из которых обычно составляется структурная схема системы автоматического регулирования.

Масштабы переменных величины задаются при этом обычными способами. Чаще всего моделирование ведется в замедленном ($M_t < 1$) или натуральном ($M_t = 1$, при сочетании модели с реальной аппаратурой) масштабе времени.

В таблице 4 приведены некоторые схемы набора и передаточные функции часто встречающихся звеньев систем автоматического регулирования и управления.

Для пояснения принципов моделирования систем автоматического регулирования по звеньям рассмотрим в качестве примера моделирование контура стабилизации продольного движения самолета со свободным и демпфирующим гироскопами. Структурная схема такого контура изображена на рис. 54.

Для удобства моделирования эту схему преобразуем таким образом, чтобы она представляла собой сочетание типовых звеньев

	Передаточная функция	Схема набора	Коэффициенты
а	$\frac{x_2(p)}{x_1(p)} = \frac{k}{T_p + 1}$		$k_1 = \frac{k}{T} M_t;$ $k_2 = \frac{1}{T} M_t$
б	$\frac{x_2(p)}{x_1(p)} = \frac{k}{T_p^2 + 2\zeta T_p + 1}$		$k_1 = \frac{k}{T^2} M_t^2;$ $k_2 k_3 = \frac{1}{T^2} M_t^2;$ $k_2 = \frac{2\zeta}{T} M_t; k_4 = 1$
в	$\frac{x_2(p)}{x_1(p)} = k \frac{p}{T_p + 1}$		$k_1 = \frac{k}{T};$ $k_2 k_3 k_4 = \frac{1}{T} M_t$
г	$\frac{x_2(p)}{x_1(p)} = k \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1};$ $T_1 < T_2$		$k_1 = k \frac{T_1}{T_2};$ $k_3 = \frac{1}{T_1} M_t;$ $k_2 k_4 = k_3 - \frac{1}{T_2} M_t$
д	$\frac{x_2(p)}{x_1(p)} = k \frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1};$ $T_1 > T_2$		$k_1 = k \frac{T_1}{T_2};$ $k_3 = \frac{1}{T_1} M_t;$ $k_2 k_4 k_5 = \frac{1}{T_2} M_t - k_3$

системы автоматического регулирования, приведенных в таблице 4, при этом воспользуемся тем обстоятельством, что в линейной структурной схеме коэффициенты усиления можно перераспределять между звеньями, не охваченными обратными связями (рис. 55).

Если поставлена задача выбора коэффициента усиления демпфирующего гироскопа $k_{д.г.}$ при минимальном времени переходного процесса системы, работающей в режиме управления, то,

очевидно, должны быть известны все исходные параметры системы, кроме $k_{д.г.}$.

Для нашего случая принимаем

$k_{д.г.}$	$k_{с.г.}$	$k_{р.т.}$	κ	T_1	$T_{р.т.}$	T	ξ
var	3	0,6	3,8	0,375	0,05	0,12	0,26

Используя таблицу 4, составим структурную схему модели системы (рис. 56) и рассчитаем передаточные коэффициенты.

Масштаб времени принимаем $M_t = 0,1$.

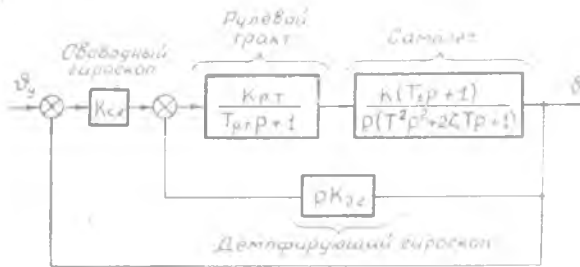


Рис. 54. Схема контура стабилизации продольного движения самолета.

$$k_1 = 0,133 \cdot 7,5 = 1,0;$$

$$k_2 = k_1 \cdot k_{д.г.} =$$

$$= \text{var} = 0 \div 10;$$

$$k_3 \cdot k_4 \cdot k_6 =$$

$$= \frac{1}{T_{р.т.}} M_t - k_5 =$$

$$= \frac{1}{0,05} \cdot 0,1 - 0,267 =$$

$$= 1,73;$$

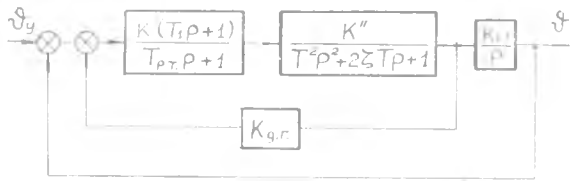


Рис. 55. Схема контура стабилизации продольного движения самолета.

$$k_2 = \frac{1}{T_1} M_t = \frac{1}{0,375} \cdot 0,1 = 0,267.$$

Если принять $k_3 = k_4 = 1$, то $k_6 = 1,73$,

$$k_7 = \frac{2\xi}{T} M_t = \frac{2 \cdot 0,26}{0,12} \cdot 0,1 = 0,433; k_9 = 1; k_{10} \cdot k_7 = \frac{1}{T^2} M_t^2 =$$

$$= \frac{1}{1,44 \cdot 10^{-1}} \cdot 0,01 = 0,695.$$

Если $k_7 = 1$, то $k_{10} = 0,695$;

$$k_{11} = \frac{k''}{T^2} M_t^2 = \frac{17,1}{1,44 \cdot 10^{-2}} \cdot 0,01 = 11,88; k_{12} = k_{с.г.} \cdot M_t = 3 \cdot 0,1 = 0,3.$$

$$k_1 = k' \frac{T_1}{T_{р.т.}} =$$

$$= k' \frac{0,375}{0,05} = k' \cdot 7,5,$$

чтобы получить коэффициент k_1 равный 1, перераспределяем коэффициенты k' и k'' следующим образом:

$$k_{р.т.} \cdot k = 0,6 \cdot 3,8 =$$

$$= 2,28 = k' \cdot k'' =$$

$$= 0,133 \cdot 17,1, \text{ тогда}$$

Для выравнивания порядка коэффициентов k_{12} и k_{11} перераспределяем их следующим образом:

$$k'_{12} = \frac{k_{12}}{0,3} = 1,0; \quad k'_{11} = k_{11} \cdot 0,3 = 3,56, \quad \text{тогда } k'_2 = \frac{k_2}{0,3},$$

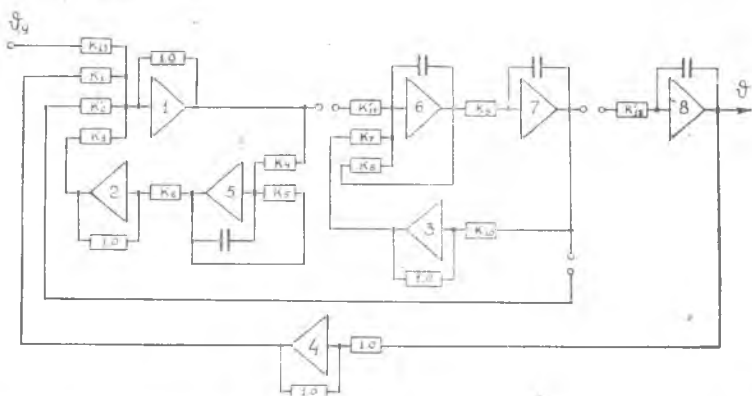


Рис. 56. Структурная блок-схема для моделирования контура стабилизации продольного движения самолета.

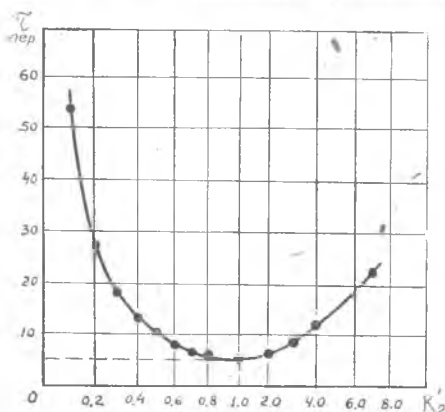


Рис. 57. Зависимость времени переходного процесса от коэффициента усиления демпфирующего гироскопа.

В конечном итоге принимаем:

$k_1 = 1,0$	$k_7 = 1,0$
$k_2 = 0 \div 10$	$k_8 = 0,433$
$k_3 = 1,0$	$k_9 = 1,0$
$k_4 = 1,0$	$k_{10} = 0,695$
$k_5 = 0,267$	$k_{11} = 3,56$
$k_6 = 1,73$	$k_{12} = 1,0$
	$k_{13} = 1,0$

Кривая зависимости времени переходного процесса $\tau_{пер}$ от коэффициента k'_2 при управляющем сигнале $v_y = 50$ приведена на рис. 57.

Из графика определяем оптимальное значение коэффициента усиления демпфирующего гироскопа $k_{д.г}$ при $\tau_{пер \cdot min}$

$$k_{д.г.} = k'_2 \cdot 0,3 = 1,0 \cdot 0,3.$$

При $k'_2 = 0$ получаем незатухающие колебания.

Кривая переходного процесса, соответствующая оптимальному $k_{д.с.}$, измеренная по точкам, приведена на рис. 58.

Литература: [11], [16].

З заключение следует отметить, что моделирующие устройства могут быть также использованы для решения систем линейных алгебраических уравнений, некоторых видов интегральных уравнений, например, уравнения Фредгольма II рода,

$$\varphi(x) = f(x) + \lambda \int_a^b k(x,S) \cdot \varphi(S) dS, \quad (5.15)$$

задач специального типа и т. д. Однако применение типовых моделирующих установок в подобных случаях зачастую требует использования дополнительной сложной и дорогой аппаратуры и не всегда себя оправдывает, особенно, при решении разнородных задач. Кроме того, точность решения задачи может оказаться неудовлетворительной. В этих случаях целесообразнее и экономичнее выполнение расчетов производить на электронных цифровых вычислительных машинах.

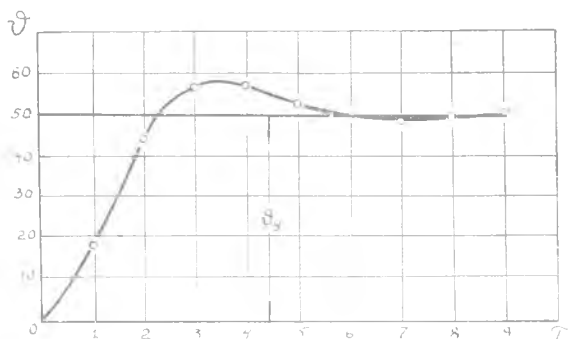


Рис. 58. Кривая переходного процесса при оптимальном коэффициенте усиления демпфирующего гироскопа.

Литература: [14], [17].

§ 6. Электронные моделирующие установки общего назначения

В настоящем параграфе рассматриваются основные технические данные некоторых типов электронных моделирующих устройств, разработанных в СССР.

В общем случае моделирующие установки для решения обыкновенных линейных дифференциальных уравнений включают в себя (рис. 59):

- набор блоков операционных усилителей, число которых определяет разрешающую способность модели;
- набор блоков постоянных коэффициентов;
- набор блоков переменных коэффициентов;
- пульт управления;
- стабилизированные источники питания;
- коммутационную аппаратуру.

Моделирующие установки для решения нелинейных дифференциальных уравнений комплектуются дополнительно набором блоков нелинейностей, в состав которых входят универсальные функциональные преобразователи и блоки умножения — деления.

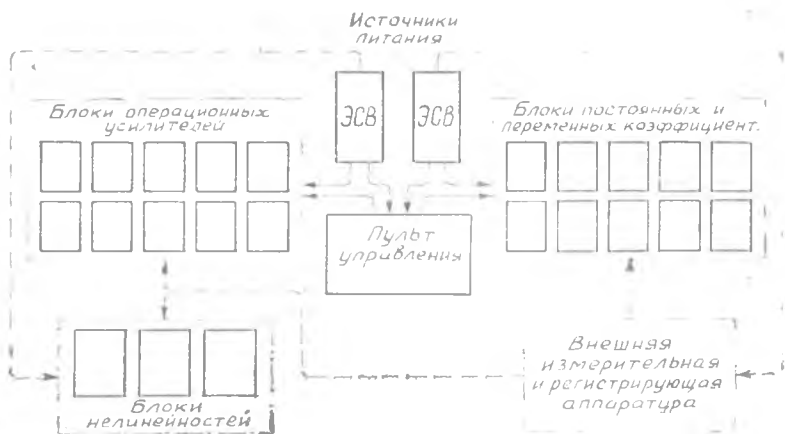


Рис. 59. Состав моделирующей установки общего назначения.

Конструктивно моделирующие установки выполняются либо блочного типа, с автономными блоками, либо стендовыми (моноблочными). В последнем случае все решающие элементы заключены в общий корпус (моноблок), а все входы и выходы элементов модели выведены на общую коммутационную панель, выполненную в виде мнемонической схемы.

Модели блочного типа более удобны в эксплуатации, так как в силу взаимозаменяемости блоки, не используемые при решении

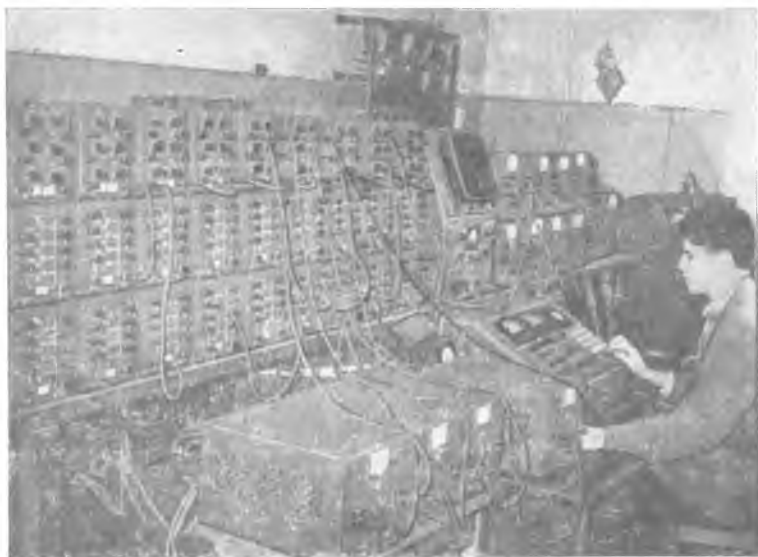


Рис. 60. Общий вид моделирующей установки типа ИПТ-5.

задачи, могут быть взяты на проверку и наладку; при необходимости количество блоков легко увеличить; отдельные блоки удобны в переноске. С другой стороны, модели стендовые значительно компактнее и могут быть размещены на любом столе.

Соединение решающих элементов в соответствии с блок-схемой решения определенной задачи в любом случае производится с помощью внешних коммутационных шнуров.

Для удобства снятия решения модели обычно дополняются внешней контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратурой: электронно-лучевыми индикаторами, самописцами, точными вольтметрами и т. п.

Все установки обычно допускают сопряжение с аппаратурой автоматического регулирования.

Общий вид блочной моделирующей установки типа ИПТ-5 приведен на рис. 60.

Промышленные образцы серийных моделирующих установок

ИПТ-5

Установка предназначена для решения обыкновенных линейных дифференциальных уравнений до 9-го порядка включительно с постоянными и переменными коэффициентами. Конструктивно оформлена в виде отдельных блоков (в одном блоке расположен один решающий элемент), соединяемых с помощью гибких проводов в соответствии с поставленной для решения задачей. Полный комплект решающих блоков получает питание от двух стабилизированных выпрямителей.

В состав установки входят 18 решающих усилителей, 18 блоков постоянных коэффициентов, 18 блоков переменных коэффициентов и пульт управления.

МПТ-9-3

Установка предназначена для решения обыкновенных линейных дифференциальных уравнений до 16-го порядка включительно с постоянными и переменными коэффициентами. Конструктивно оформлена в виде отдельных секций-стендов.

В состав установки входят 48 решающих усилителей; из них 16 интегрирующих и 32 масштабных суммирующих, 48 блоков постоянных коэффициентов и 20 блоков переменных коэффициентов.

Решающие усилители выполнены с автоматической стабилизацией нулевого уровня.

МПТ-11М

Установка предназначена для решения обыкновенных линейных и нелинейных дифференциальных уравнений до 12-го порядка включительно с постоянными коэффициентами. Конструкция установки блочного типа.

В состав модели входят:

1. Блоки интегрирующих решающих усилителей (по два усилителя в каждом) — 6 шт.
2. Блоки масштабных и суммирующих усилителей (по 4 усилителя в каждом) — 12 шт.
3. Блоки постоянных коэффициентов (по 4 делителя в каждом) — 6 шт.
4. Универсальные функциональные преобразователи — 18 шт.
5. Блоки перемножения — 6 шт.
6. Пульт управления.

Решающие усилители выполнены с автоматической стабилизацией нулевого уровня. Функциональные преобразователи выполнены на диодных элементах. Множительные устройства построены на диодных квадраторах.

МН-7М

Установка предназначена для решения обыкновенных линейных и нелинейных дифференциальных уравнений до 6-го порядка включительно с постоянными коэффициентами. Установка выполнена в виде портативного настольного прибора с отдельным блоком питания.

В состав модели входят 16 решающих усилителей, 6 из которых могут выполнять функции интегрирования. Остальные усилители используются как сумматоры и знакоинверторы. Установка имеет четыре ячейки, в которые могут вставляться множительные блоки или блоки универсальных диодных функциональных преобразователей.

Набор задачи осуществляется с помощью проводников со штеккерами на общем наборном поле.

Для увеличения порядка решаемых уравнений предусматривается возможность сочленения двух моделей МН-7М. В этом случае одна из них работает как ведущая, другая как ведомая.

ЭМУ-8

Электронная моделирующая установка ЭМУ-8 предназначена для решения обыкновенных линейных и нелинейных дифференциальных уравнений. Конструктивно выполнена в виде отдельных базовых блоков, рассчитанных на решение дифференциальных уравнений 2-го порядка. Каждый базовый блок снабжен четырьмя решающими усилителями и некоторым количеством линейных и нелинейных цепей обратной связи, выполненных в виде сменных вставок. Электронные лампы используются в установке, в основном, только в решающих усилителях. Остальные элементы выполнены на германиевых диодах и карборундовых (гиритовых) сопротивлениях.

ЭМУ-10

Установка предназначена для решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений с постоянными и переменными коэффициентами до 24 порядка включительно. В состав установки входят две стойки: одна универсальная и другая — специализированная, работающая совместно с основной стойкой при решении задач с управляемым запаздыванием и оптимизацией решения по заданному критерию.

В состав машины входят 48 решающих усилителей с автоматической стабилизацией нулевого уровня, функциональные преобразователи, множительные устройства, потенциометры с ручной и автоматической установкой передаточных коэффициентов и др.

Универсальная стойка снабжена сменным наборным полем для автономного набора и хранения набора блок-схемы решения задач.

Установка может быть использована для исследования динамики сложных систем управления и регулирования и т. п.

МН-10

Машина МН-10 предназначена для решения и исследования методом электрического моделирования задач, описываемых обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями до 6-го порядка. МН-10 позволяет решать дифференциальные уравнения, содержащие до четырех нелинейных зависимостей функции одной переменной и до четырех функций перемножения двух переменных при любом сочетании этих зависимостей по количеству в пределах шести.

В состав машины входят 24 малогабаритных операционных усилителя постоянного тока УПТ-20 м.

Схема самой машины и источника питания построена полностью на полупроводниковых диодах и триодах.

МН-11

Математическая машина МН-11 предназначена для автоматического отыскания решения, удовлетворяющего некоторым наперед заданным критериям.

Основными режимами работы машины МН-11 являются:

автоматическое отыскание решения задачи методом «минимизации», когда поочередное изменение искомого величин производится в соответствии с результатами предыдущих решений;

полуавтоматическое отыскание решения задачи методом «обзора», когда поочередное изменение искомого величин производится по определенной, наперед заданной программе;

электрическое моделирование систем обыкновенных линейных или нелинейных дифференциальных уравнений до 6—9-го порядка.

Машина может для одной системы дифференциальных уравнений до 6—9-го порядка производить отыскание шести неизвестных параметров по шести заданным условиям.

Поиск значений неизвестных осуществляется с помощью дискретных схем, воспринимающих результаты электрического моделирования и изменяющих искомые величины.

Схема управления — электронная, что обеспечивает работу машины в режиме периодизации с частотой до 100 полных решений в секунду.

МН-14

Математическая машина МН-14 относится к классу машин средней мощности и предназначена для моделирования сложных динамических систем, описываемых обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями с большим числом нелинейных зависимостей.

Основным элементом схем операционных блоков является усилитель постоянного тока типа У-1 с автоматической компенсацией «дрейфа нуля».

Кроме обычных универсальных линейных блоков машина МН-14 содержит:

1. 50 блоков умножения — деления, позволяющих производить следующие операции:

$$\text{умножение двух переменных } y = - \frac{x_1 \cdot x_2}{100};$$

$$\text{деление двух переменных } y = - 10 \frac{x_1}{x_2};$$

$$\text{извлечение квадратного корня } y = - 10 \sqrt{x}.$$

2. 20 блоков универсальных нелинейностей, позволяющих воспроизводить нелинейные функции от одной переменной $y = f(x)$.

3. 4 блока специальных нелинейностей вида: ограничение, зона нечувствительности и петля гистерезиса.

4. 6 блоков тригонометрических функций.

Полный комплект блоков машины позволяет осуществлять до 30 операций интегрирования, 30 операций суммирования, 20 операций инвертирования.

Большая часть нелинейных блоков и источников питания машины построена на полупроводниковых элементах. Длительность интегрирования может находиться в пределах от 1 до 10000 сек.

Машина МН-14 имеет развитую и гибкую систему управления и контроля, обеспечивающую возможность автоматизации ввода и вывода данных. Потребляемая машиной мощность — около 15 ква.

Литература: [16].

§ 7. Моделирующие устройства специализированного типа

Специализированные моделирующие устройства в настоящее время находят все большее применение на практике.

Известно применение их в качестве комплексных авиационных и других транспортных тренажеров, электронных моделирующих установок для исследования атомных и химических реакторов, многоклетевых прокатных станов, нефтяных месторождений и даже отдельных биологических систем (сердца и др.).

Ниже приводятся некоторые специализированные моделирующие устройства, с успехом применяющиеся в различных отраслях народного хозяйства страны.

Вычислительная машина для энергосистем. Изображенная на рис. 61 вычислительная машина предназначена для автоматизации расчета потерь напряжения и мощности в радиальных электрических сетях напряжением 220, 110 и 35 кв. Эти расчеты необходимы для выбора режима работы энергосистемы.

Расчеты ведутся по следующим формулам.

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= \frac{R_i \sum_{i=1}^n P_i + X_i \sum_{i=1}^n Q_i}{U}; \quad \Delta P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 + \sum_{i=1}^n Q_i^2}{U^2} R_i; \\ \delta U &= \frac{X_i \sum_{i=1}^n P_i - R_i \sum_{i=1}^n Q_i}{U}; \quad \Delta Q = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 + \sum_{i=1}^n Q_i^2}{U^2} X_i, \end{aligned} \right\} (5.16)$$

где ΔU и δU — продольная и поперечная составляющие потерь напряжения;

ΔP и ΔQ — активная и реактивная потери мощности;

R и X — активное и реактивное сопротивления линии.

Вычислительная машина производит расчет этих параметров одновременно для пяти участков электрической сети. Результаты расчета получают в виде уровней напряжения на специальном приборе. Предусмотрена также воз-

возможность преобразования их в цифровые величины и получения результатов расчета в печатном виде.

Блок-схема машины приведена на рис. 62.

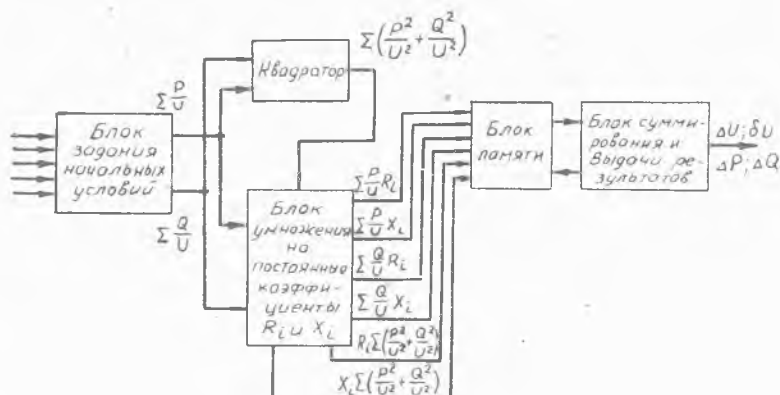


Рис. 62. Блок-схема вычислительной машины для энергосистем.

Расчет вручную потерь напряжения и мощности на пяти участках сети по приведенным формулам занимает 15—20 мин, машина же выполняет эту работу за 1—2 мин.

Машина может быть использована как в службах режимов энергосистемы, так и в диспетчерских службах для оперативных расчетов.

Точность решения задачи составляет $\pm 1\%$.

Вычислительная машина для определения наивысшей производительности металлорежущих станков — МНП-2. Вычислитель-

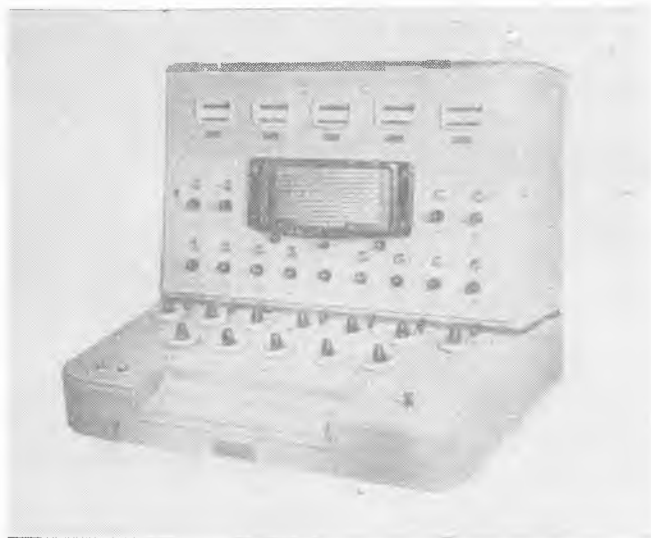


Рис. 63. Вычислительная машина МНП-2 для определения наивысшей производительности металлорежущих станков.

ная машина МНП-2 (рис. 63) предназначена для определения наивысшей производительности металлорежущих станков с главным вращательным движением. Она моделирует степенные функции, причем, результаты преобразуются в дискретные величины, которые фиксируются на отсчетных регистрах машины в цифровой форме.

Вычислительная машина имеет 5 электрических каналов, решающих следующие задачи.

1-й канал. Определение числа оборотов шпинделя станка по формуле обобщенного вида, охватывающей точение, растачивание, сверление, зенкерование, развертывание, фрезерование (торцовое, дисковое, цилиндрическое и фасонное),

$$n = \frac{318C_v K_v}{T^m t^{x_v} S^{y_v} D^{q_v} Z^{p_v} B^{u_v} (B/D)^{r_v}} \text{ об/мин.} \quad (5.17)$$

2-й канал. Определение производительности (минутной подачи) по формуле

$$П = S_2 n z \text{ мм/мин.} \quad (5.18)$$

3-й канал. Определение машинного времени по формуле

$$T_0 = \frac{L}{П} \text{ мин.} \quad (5.19)$$

4-й канал. Определение эффективной мощности на шпинделе станка по формуле

$$N_e = \frac{M_{кр} \cdot n}{974} \text{ квт.} \quad (5.20)$$

5-й канал. Определение двойного крутящего момента на шпинделе станка по обобщенной формуле

$$M = 2M_{кр} = \frac{C_p}{1000} K_p t^{x_p} S^{y_p} D^{q_p} Z^{p_p} B^{u_p} (B/D)^{r_p} \text{ кг м.} \quad (5.21)$$

По приведенным выше основным формулам на пульте машины предварительно устанавливаются конкретные численные значения входящих в них параметров. После этого на машине могут быть решены следующие задачи:

- определение оптимального режима резания на отдельных операциях;
- определение режима наивысшей производительности при полном использовании скоростной и силовой характеристик металлорежущих станков;
- расчет технически обоснованной нормы по машинному времени;
- выбор оптимальных режимов для отдельных инструментов на агрегатных и т. п. станках, работающих в автоматических поточных линиях с принудительным ритмом (тактом) и периодом остановки линии для переточки и смены инструмента.

Ответы выдаются в цифровой форме одновременно с множителями, которые должны быть учтены при считывании результата решения всех задач.

Пределы устанавливаемых чисел 0,01—10000.

Погрешность решения $\pm 2\%$.

Более простым устройством для аналогичных целей является вычислительный прибор для определения режимов резания при точении, фрезеровании и сверлении (ВППР-2), на котором определение режимов резания осуществляется по трансцендентным уравнениям вида

$$a_1^{b_1} a_2^{b_2} \dots a_n^{b_n} = 1, \quad (5.22)$$

где a_i и b_i — постоянные действительные величины, одна из которых подлежит определению.

Погрешность решения $\pm 5\%$.

Специализированная электронная вычислительная машина ЭАСП—С. Специализированная электронная вычислительная машина (ЭАСП—С) электронный анализатор стационарных случайных процессов) — одна из первых в СССР вычислительных машин, содержащая электронно-оптическое устройство ввода, полностью исключаящее ручной труд по подготовке и вводу данных в вычислительное устройство.

Она предназначена для автоматизации корреляционного или спектрального анализа данных, записанных в виде кривых на обычной бумажной ленте, фотобумажной ленте, киноленте или поступающих в виде электрического напряжения. Электронно-оптическое устройство обеспечивает автоматическое считывание кривых (графиков) с последующим автоматическим вводом прочитанных данных в вычислительную машину непосредственно с оригинала.

При помощи вычислительной машины могут быть определены следующие характеристики записей: корреляционные функции; взаимные корреляционные функции; функции спектральной плотности; функции взаимной спектральной плотности; коэффициенты рядов Фурье.

Конструктивно ЭАСП-С выполнен в виде трех отдельных устройств.

1. Электронно-оптического считывающего устройства.
2. Накопителя и запаздывающего устройства, предназначенных для хранения данных, подлежащих обработке на электронном вычислителе, а также для автоматического создания дискретного запаздывания, которое необходимо при вычислении корреляционных функций.

3. Электронного вычислителя и выводного устройства. Выводное устройство обеспечивает регистрацию результатов вычисления на бумаге в виде отдельных точек графика.

Диапазон частот анализируемых процессов в натуральном масштабе времени от 0 до 1000 *гц*, в машинном масштабе времени от 0 до 50 *гц*.

Точность вычислений при корреляционном анализе не ниже 6%; при спектральном анализе не ниже 8%.

Машина ЭАСП-С может быть успешно использована при исследовании, проектировании и конструировании различных объектов, работающих под влиянием случайных воздействий, например:

- систем автоматического управления промышленными объектами;
- систем передачи информации;
- летательных аппаратов;
- наземных транспортных средств;
- надводных и подводных средств передвижения;
- буровых устройств, угледобывающих машин;
- энергетических установок и т. д.

ЭАСП-С может найти эффективное применение также при исследовании самых разнообразных явлений живой и неживой природы, например:

- различных физических явлений;
- биологических объектов;
- физиологических процессов и т. п.

ЭАСП-С может оказаться чрезвычайно полезной при проведении исследований в области диагностики различных заболеваний.

Низкочастотный статистический анализатор НСА. Статистический анализатор НСА предназначен для вычисления авто- и взаимокорреляционных функций, а также функции спектральной плотности в диапазоне частот исследуемых сигналов — 0,1—20 *гц*.

Сигналы, подлежащие статистической обработке на анализаторе

ре, записываются по двум дорожкам магнитной ленты серийного магнитофона «Яуза-10», а затем после сдвига на заданный временной интервал поступают на аналоговое вычислительное устройство.

Вычисление функции спектральной плотности предусмотрено в двенадцати фиксированных точках.

Погрешность вычисления корреляционных функций не превышает $\pm 5\%$.

Следует отметить также специализированные вычислительные машины:

— моделирующая установка, предназначенная для исследования динамики трехклетевых непрерывных прокатных станков;

— вычислительная машина для регулирования доменного процесса, предназначенная для автоматического контроля и регулирования радиального распределения газового потока на основе математической обработки данных о распределении температуры по диаметру колосника доменной печи;

— вычислительная машина для определения температуры расплавленной стали в мартеновских печах;

— вычислительная машина для регулирования процесса ректификации нефти, с помощью которой регулируется статический температурный режим нефтяных ректификационных колонн;

— моделирующая установка-синтезатор электрокардиограмм «СИНЭК», предназначенная для исследований электрической активности сердца путем искусственного воспроизведения различных электрокардиограмм на основе гипотезы монофазных кривых.

Выпущена специализированная машина «Катализ», предназначенная для моделирования таких химических процессов, как реакция с выделением тепла в реакторе, дистилляция в тарельчатых колоннах, контактная реакция и др. Эта машина может быть использована для решения задач азотной промышленности, промышленности синтетических спиртов и в ряде других областей химии. В ее состав входит 430 операционных усилителей, 90 различных нелинейных блоков, 160 делителей напряжения, 20 блоков запаздывания и др.

Литература: [16].

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ АНАЛОГИЙ

Глава VI. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ-АНАЛОГОВ

§ 1. Моделирование на основе аналогий

При построении моделей-аналогов используются системы аналогий между явлениями различной физической природы, например, аналогии между механическими и электрическими явлениями, между электрическими и акустическими, между электрическими и тепловыми явлениями и др. Возможно также построение электрических моделей электрических же цепей. Переход из одной области физических явлений в другую позволяет значительно упростить исследования, облегчить методику и повысить точность измерения искомых величин.

Практически моделирование здесь сводится к построению соответствующих электрических схем замещения, с помощью которых воспроизводится процесс, аналогичный исследуемому.

Так например, движение механического маятника вблизи положения равновесия и движение зарядов в цепи с сосредоточенными постоянными L , R и C описываются аналогичными дифференциальными уравнениями (рис. 64, 65).

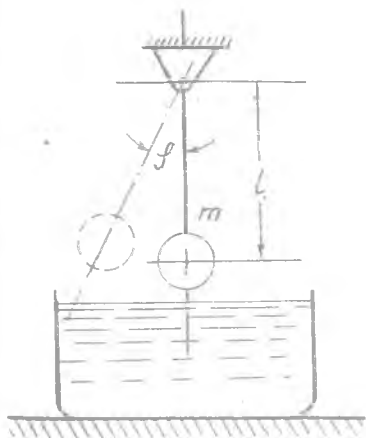


Рис. 64 Маятник

$$J_{\varphi} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + S \frac{d\varphi}{dt} + mg l \varphi = F(t).$$

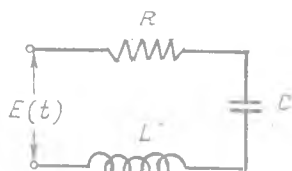


Рис. 65. Колебательный контур

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E(t);$$

q — эл. заряд.

Идентичность дифференциальных уравнений позволяет при соответствующем подборе постоянных проводить изучение механических колебаний на электрической модели и наоборот

Литература: [8], [17], [19].

§ 2. Электромеханические аналогии

Рассмотрим построение электромеханических аналогий в применении к моделированию упругих систем, состоящих из конечного числа сосредоточенных масс, соединенных упругими связями.

Одномерные линейные механические системы содержат элементы (звенья) трех видов, упругие, инерционные и фрикционные (демпфирующие).

Упругие элементы представляются в виде идеализированной пружины, которая лишена трения и не имеет массы. Тогда сила, действующая на упругий элемент, если x — перемещение.

$$Q = C_n \cdot x = \frac{1}{e_n} x, \quad (6.1)$$

где C_n — жесткость пружины;
 e_n — податливость.

Инерционные элементы представляются в виде «материальных точек» — абсолютно жестких тел.

$$Q_m = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (6.2)$$

где m — масса.

Фрикционные элементы представляются в виде демпферов, лишенных упругости и массы.

$$Q_s = S_n \frac{dx}{dt}, \quad (6.3)$$

где S_n — коэффициент вязкости.

Механическая система с одной степенью свободы может быть представлена простейшей схемой (рис. 66), для которой уравнение динамического равновесия Даламбера

$$Q_m + Q_s + Q_e = Q(t), \quad (6.4)$$

где $Q(t)$ — внешняя сила.

Если в качестве переменной принять скорость $v = \frac{dx}{dt}$, то уравнение принимает вид

$$m \frac{dv}{dt} + S_n v + \frac{1}{e_n} \int v dt = Q(t). \quad (6.5)$$

Электрические модели в виде цепей из пассивных элементов могут быть построены по двум системам электромеханических аналогий.

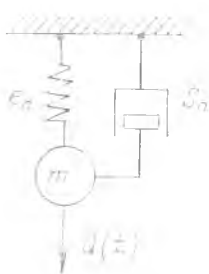


Рис. 66. Механическая упругая система с одной степенью свободы

В первой системе энергия магнитного поля соответствует кинетической энергии, а энергия электрического поля — потенциальной (рис. 67, а).

Во второй системе, наоборот, энергия магнитного поля соответствует потенциальной энергии, а энергия электрического поля — кинетической (рис. 67, б):

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = U(t). \quad (6.6)$$

$$C \frac{du}{dt} + gu + \frac{1}{L} \int u dt = I(t). \quad (6.7)$$

В этих схемах $U(t)$ — генератор напряжения; $I(t)$ — генератор тока.

Таким образом, каждый элемент механической системы может быть замещен соответствующими элементами электрической системы.

В приведенной ниже таблице даны схемы замещения основных элементов.

Обозначения параметров приведены в табл. 5.

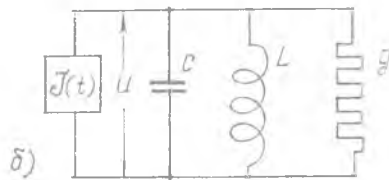
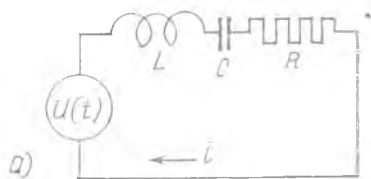


Рис. 67. Системы электромеханических аналогий.

Таблица 5

Механическая система	Электрическая модель	
	I сист. аналогий	II сист. аналогий

Рассмотрим вопрос выбора параметров электрических моделей механических систем. Сопоставлением уравнений механической и

электрической систем можно установить, что для подобия явлений должны быть выполнены следующие четыре критерия подобия:

Для I системы аналогий

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{Qt}{mv} = \frac{Ut_3}{L \cdot i}, \\ \Pi_2 &= \frac{Q}{S_n v} = \frac{U}{Ri}, \\ \Pi_3 &= \frac{Qe_n}{vt} = \frac{UC}{it_3}, \\ \Pi_4 &= \omega t = \omega_3 t_3. \end{aligned} \right\} (6.8)$$

Для II системы аналогий

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{Qt}{mv} = \frac{It_3}{Cu}, \\ \Pi_2 &= \frac{Q}{S_n v} = \frac{I}{gu}, \\ \Pi_3 &= \frac{Qe_n}{vt} = \frac{IL}{ut_3}, \\ \Pi_4 &= \omega t = \omega_3 t_3. \end{aligned} \right\} (6.9)$$

Из приведенных критериев подобия с помощью простых алгебраических преобразований можно получить критерии в более удобной для использования форме. Так, например, для первой системы аналогий вместо первых трех критериев запишем:

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 &= \omega^2 m e = \omega_3^2 L C; \\ \Pi_2 &= \frac{\omega m}{S} = \frac{\omega_3 L}{R}; \\ \Pi_3 &= \frac{Q}{v} \left| \frac{e}{m} = \frac{U}{i} \right| \left| \frac{v}{L} \right| \end{aligned} \right\} (6.10)$$

а $\Pi_4 = \omega = \omega_3 t_3$ остается без изменений.

Для точного соответствия механической и электрической систем необходимо выбрать параметры элементов модели так, чтобы по первой системе аналогии получить:

$$\left. \begin{aligned} L_1 : L_2 : L_3 : \dots : L_n &= m_1 : m_2 : m_3 : \dots : m_n \\ C_1 : C_2 : C_3 : \dots : C_n &= e_1 : e_2 : e_3 : \dots : e_n \\ R_1 : R_2 : R_3 : \dots : R_n &= S_1 : S_2 : S_3 : \dots : S_n \end{aligned} \right\} (6.11)$$

Однако последнее условие не всегда может быть точно выполнено, так как во многих случаях нам неизвестны исходные данные, например, распределение малых механических потерь в элементах упругой системы.

При наличии в системе элементов, рассеяние энергии в которых велико (например, специальных демпферов трения), электрическая модель должна содержать особые, эквивалентные демпферам элементы электрического активного сопротивления, которые выбираются исходя из условий точного подобия, как и другие параметры системы.

Рассмотрим в качестве примера моделирование подвески корпуса автомобиля (рис. 68).

Здесь e_1 — суммарная податливость передних рессор;

e_2 — суммарная податливость задних рессор;

S_1 и S_2 — коэффициенты вязкого трения, характеризующие работу амортизаторов;

ϵ_3 и ϵ_4 — податливости автомобильных шин;

m_1 — массы корпуса и неподресоренных частей;

Θ — момент инерции массы корпуса автомобиля.

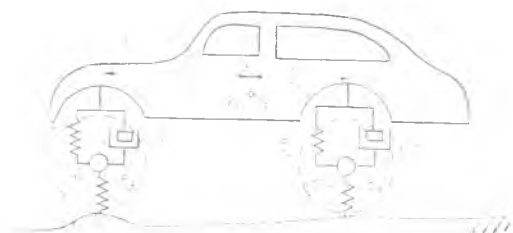


Рис. 68. Механическая система подвески корпуса автомобиля.

Источником возмущения рассматриваемой системы является принудительное вертикальное смещение колес при преодолении препятствий.

Электрическая схема замещения по второй системе аналогий изображена на рис. 69.

Задание закона изменения вертикальных скоростей производится с помощью источников напряжения так, что импульс напряжения, задаваемый на элементы, моделирующие передние колеса, должен опережать импульс, задаваемый на задние колеса, на время:

$$\Delta t_3 = \frac{a}{v_0} \frac{1}{N_f},$$

где a — база автомобиля;
 v_0 — скорость движения;

N_f — константа подобия (масштаб времени).

В общем случае для составления электрических схем замещения в настоящее время применяется так называемый метод «ортогональных линий», сущность которого заключается в следующем. Если в плоскости чертежа механической системы сделать

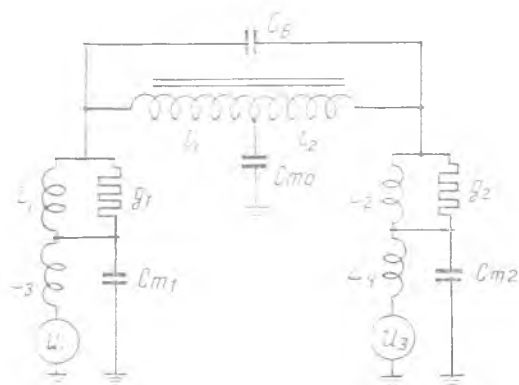


Рис. 69. Моделирование подвески корпуса автомобиля.

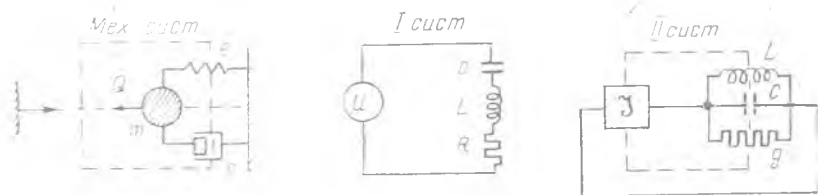


Рис. 70. Принцип построения электрических схем замещения механических систем.

столько разрезов, сколько требуется для того, чтобы отделить все узлы механической системы, то полученная система разрезов будет соответствовать начертанию электрической схемы по первой системе аналогий. При этом каждый механический элемент разрезается только один раз и в месте пересечения его линией разреза располагается элемент модели (рис. 70).

Литература: [8], [19].

§ 3. Электрическое моделирование стержневых систем

С помощью электрических моделей — аналогов возможно также исследование плоских и пространственных стержневых систем (рам, ферм и т. п.) при проектировании сооружений.

Метод решения задач изгиба стержневых систем и пространственных ферм заключается в том, что стержневая система моделируется по стержням-участкам системы. Различные элементы системы представляются в виде сочетания электрических моделей растяжения, изгиба и кручения.

Таким образом, каждый стержень замещается электрической схемой, воспроизводящей связи между динамическими перемещениями, углами поворота, изгибающими моментами и поперечными силами на его концах. Участки стержневой системы соединяются между собой в соответствии с условиями сопряжения и граничными условиями. Так, например, при плоском изгибе напряженное состояние стержня постоянной жесткости (рис. 71, а) описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M_A &= \frac{2EI}{l} (2\varphi_A + \varphi_B) + \bar{M}_A, \\ M_B &= \frac{2EI}{l} (\varphi_A + 2\varphi_B) + \bar{M}_B. \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

где M_A, M_B — изгибающие моменты в конечных сечениях стержня;

\bar{M}_A, \bar{M}_B — то же, для жестко заделанных концов;

φ_A, φ_B — углы поворота конечных сечений стержня;

$\frac{EI}{l}$ — погонная жесткость при изгибе.

На рис. 71, б приведена электрическая схема замещения для рассматриваемого случая. Здесь изгибающие моменты моделируются токами, а углы поворота конечных сечений — напряжениями. I_A и I_B — источники тока. Проводимости схемы рассчитываются по формулам.

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= g_2 = \gamma_q \cdot \frac{AEI}{l}, \\ g_3 &= g_4 = \gamma_q \cdot \frac{2EI}{l}. \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

где γ_q — масштабный коэффициент.

С помощью подобных схем-аналогов можно, например, производить расчет многопролетных балок на различных опорах и основаниях, плоских и пространственных рам произвольной конфигурации и др.

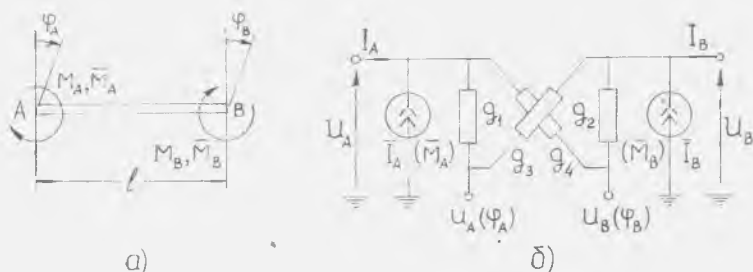


Рис. 71. Электрическая схема замещения изгиба стержня.

В настоящее время выпускается специальная вычислительная машина ЭМСС-8 — электрическая модель стержневых систем, предназначенная для определения изгибающих моментов, углов поворота и других величин в узлах плоских и пространственных балок и рам, стержни которых под воздействием внешних нагрузок, температуры и других силовых факторов испытывают деформации изгиба или кручения.

Состав элементов ЭМСС-8 позволяет рассчитывать многопролетные балки и рамы с числом стержней до 85 с постоянной и переменной жесткостью.

Общая приведенная погрешность при решении задач составляет не более $\pm 2\%$.

Электрические модели-аналоги широко применяются также для решения задач проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем, при анализе вопросов о распределении напрягов и расходов в элементах гидравлических и газовых сетей в стационарных условиях и т. д.

Литература: [20].

Глава VII. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Большой круг научных и инженерных задач связан с исследованием процессов в физических полях различной природы и описываемых теми или иными дифференциальными уравнениями в частных производных.

При рациональном проектировании мощных сооружений и машин, разработке многих природных полезных ископаемых и исследовании ряда других вопросов возникает необходимость решения дифференциальных уравнений в частных производных с различными краевыми условиями. Так, например, для технически

обоснованного проектирования различных тепловых устройств (нагревательные печи, доменные и мартеновские печи, обогревательные радиаторные устройства, сушильные печи, теплообменники и т. д.) нужно знать распределение температуры в различных частях этих устройств и в объектах обогрева при стационарных и нестационарных режимах. Проектирование строительных сооружений (плотин, шлюзов, крупных зданий и т. п.) требует знания возникающих в них нормальных и касательных напряжений, деформаций, осадок. Для проектирования турбомашин требуется знание законов распределения давлений и скоростей в проточной части и напряжений в рабочих лопатках. При проектировании различных кораблей и самолетов требуется знать распределение скоростей среды. При проектировании рациональной разработки нефтяных месторождений, схем подъемной газификации, организации поисковых работ по рудным ископаемым нужно знать распределение пластовых давлений, дебит жидкости или газа, распределение потенциалов.

Можно отметить и такие инженерные задачи:

- расчет магнитных полей в электрических машинах и аппаратах;
- расчет электрических полей конденсаторов, изоляторов и т. д.
- расчеты температурных полей в сооружениях, деталях машин и аппаратах;
- решение задач о кручении различных валов и стержней при расчетах гребных валов морских судов, валов прокатных станов, винтов самолета и т. д.;
- решение плоских задач теории упругости.

Трудно составить даже неполный перечень важных проблем, которые решаются с помощью уравнений математической физики.

Моделирование полей основано на аналогиях. Так как электростатическое поле в диэлектрике, постоянное магнитное поле и стационарное электрическое поле тока в проводящей среде одинаково описываются уравнением Лапласа, то в принципе любое из них может служить математической моделью при экспериментальном исследовании многих физических полей. Естественно, что в каждом отдельном случае должны быть определены соответствующие критерии подобия.

В настоящее время при решении краевых задач с помощью моделирования физических полей различают два основных метода: **метод сплошных сред** и **метод электрических сеток**. По первому методу моделью служит поле электрического тока в сплошной проводящей среде. Во втором — используют электрические цепи с сосредоточенными параметрами, модель получается в виде электрической сетки, основанной на дискретном представлении элементарных объемов моделируемой области с помощью схем замещения.

Однако применение первого метода возможно лишь в краевых

задачах математической физики, которые в основном сводятся к уравнению Лапласа. Для других типов физических полей единственно возможным является метод электрических сеток, представляющий гораздо более универсальный метод моделирования.

§ 1. Моделирование полей методом сплошных сред

Основным преимуществом метода сплошных сред является простота моделируемых устройств и большая точность соответствия между граничными условиями натуры и модели. Принципиально этот метод может быть реализован двумя путями — методом электролитической ванны и методом твердых моделей.

Преимуществами, обеспечившими широкое применение электролитических ванн, являются большая однородность моделирующей среды по сравнению с твердыми полупроводниками и сравнительно легкий доступ к внутренним точкам исследуемой области при моделировании объемных полей.

С другой стороны, твердые модели более портативны и удобны в работе, что также обеспечивает им определенные области применения.

Метод электролитической ванны основан на использовании ионной проводимости электролитов, в качестве которых применяются растворы поваренной соли, очищенной соды, едкого калия, серной кислоты, различных купоросов и т. п. Обычно используются лишь очень слабые концентрации ионов. Так, например, одна капля серной кислоты растворяется в 10 литрах воды. Регулируя концентрацию, можно в случае необходимости изменять проводимость электролита в широких пределах. Хорошие результаты дает применение обыкновенной водопроводной воды.

В зависимости от поставленной задачи электролитические ванны могут быть объемными и плоскими. Объемные ванны обычно выполняются из керамики или стекла, плоские — в виде деревянного водонепроницаемого короба, в дно которого вставлен лист «зеркального» стекла. Можно выполнять ванны и из толстого органического стекла. Толщина слоя жидкости в плоской ванне должна быть строго постоянной и составлять несколько сантиметров.

При определении размеров электролитических ванн следует иметь в виду, что чем больше масштаб модели, тем точнее осуществляется задание граничных условий и производство измерений, тем точнее результаты моделирования. Практически размеры ванн могут достигать 2×2 м.

Принцип моделирования весьма прост и поясняется рис. 72.

В зависимости от постановки задачи решением будет являться либо картина распределения силовых линий поля (траектории движения зарядов), либо расположение эквипотенциальных линий (изолний).

Граничные условия задаются обычно при помощи делителей напряжения с большим числом отводов, причем полное напряжение

делителя для удобства принимают за 100%. Необходимые потенциалы, соответствующие заданным граничным условиям, снимаются с делителя и подаются на электроды ванны. Питание электролитической ванны производится переменным током промышленной частоты 50 гц либо повышенной частоты порядка 400 гц.

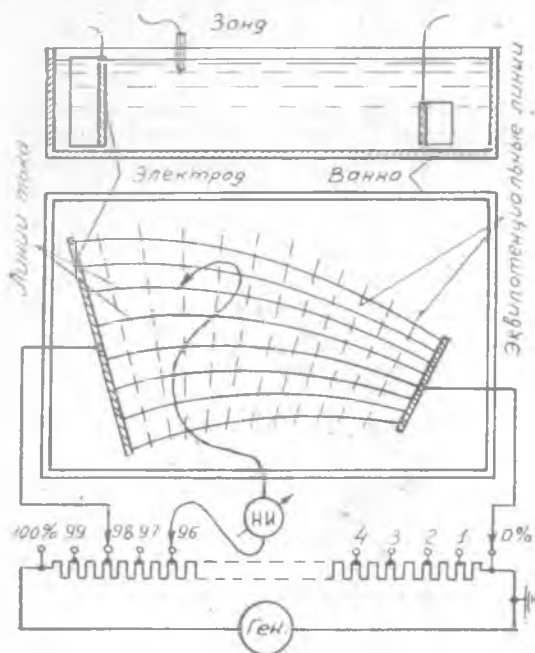


Рис. 72. Моделирование методом электролитической ванны.

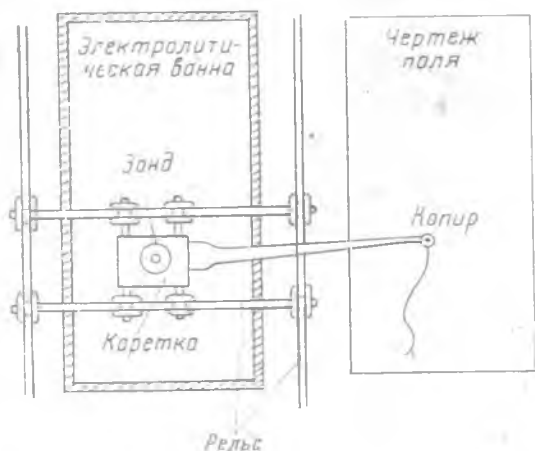


Рис. 73. Координатная система для фиксации точек электрического поля.

Для измерения потенциалов в электролитической ванне используются зонды, включенные в измерительную схему. Измерение производится компенсационным или мостовым методом с помощью нуль-индикатора обычного типа (электронный осциллограф, ламповый усилитель со стрелочным гальванометром или телефоном и т. п.). В качестве зондов применяются тонкие проволоочки, вставленные в изоляционную оправу или впаянные в стеклянную трубку.

Для точной фиксации координат точек поля, в которые устанавливается зонд, электролитическая ванна снабжается координатной системой и устройствами для переноса линий поля на чертеж (рис. 73).

Направляющие рельсы снабжаются линейками отсчета координат зонда. Для переноса поля на чертеж рядом с ванной устанавливается доска, на которую наносится чертеж в натураль-

ном масштабе. Можно применить и другие координатные системы, например, пантограф и т. п.

В некоторых случаях для моделирования плоского поля можно получить хорошие результаты с простейшей ванной, без какой-либо координатной системы. Ванна состоит из листа стекла, на котором по заданной конфигурации выполнены границы из пластилина. Слой электролита должен быть равномерным и составляет обычно несколько сантиметров. Координатная сетка выполняется в виде листа графленой бумаги, подложенной под стекло.

При моделировании плоских полей в неоднородных средах, проводимость которых изменяется в функции координат поля, можно использовать однородный электролит, имеющий различную толщину слоя в функции координат. Это достигается соответствующим профилированием дна электролитической ванны.

Твердые модели получили распространение, главным образом, для моделирования плоских полей. В качестве токопроводящей среды наилучшие результаты дает электропроводная бумага. При добавлении в бумажную массу различных количеств сажи и графита удается получить широкий диапазон значений удельных сопротивлений слоя бумаги от десятков $ом/см$ до десятков $ггом/см$. Удобнее всего использовать бумагу с сопротивлениями от 10^3 до 10^4 $ом/см$. Проводимость бумаги электронная, поэтому возможна работа на постоянном токе, что упрощает схему прибора и позволяет получить более точные, чем на электролитах, результаты измерений.

Границы моделируемой области и модели тел получаются путем соответствующих вырезов и перфораций. Electroды изготовляются из медных шин и прижимаются к бумаге струбциками.

Принцип моделирования по существу аналогичен моделированию на электролитической ванне и иллюстрируется рис. 74 для случая исследования фильтрации под бетонной плотиной в слое водопроницаемого грунта.

Построение картины поля на электропроводной бумаге облегчается тем, что эквипотенциальные линии строят, отыскав при помощи измерительной иглы (зонда) ряд точек с заданным потенциалом и соединив их плавными кривыми. Затем эквипотенциальные линии вычерчиваются цветными карандашами непосредственно на электропроводной бумаге, так что отпадает необходимость применения каких-либо координатных систем. При необходимости с электропроводной бумаги можно снять копии на белую бумагу или на кальку.

Моделирование неоднородной среды может производиться склеиванием отдельных зон, вырезанных из различных сортов бумаги, электропроводным клеем, а также подкрашиванием и ретушированием бумаги мягкими графитными карандашами.

При помощи штриховки легко создать модель слоистой анизотропной среды. В этом случае электропроводная бумага заштри-

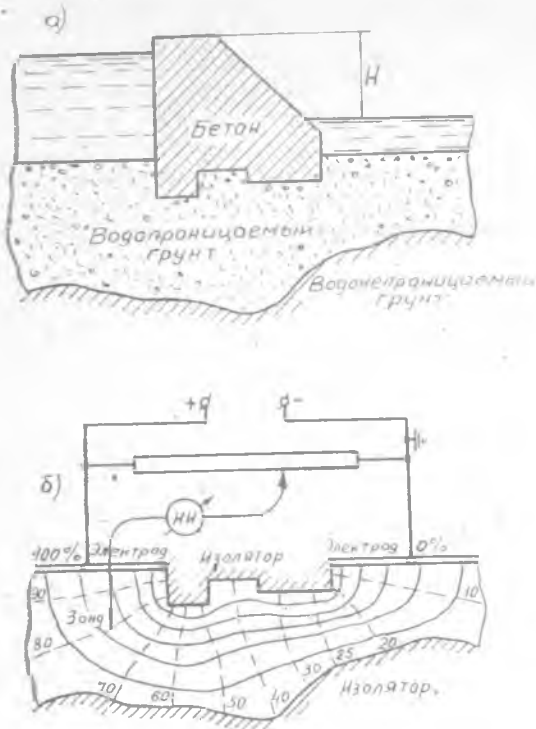


Рис. 74. Принцип моделирования процесса фильтрации под бетонной плотиной.

движения грунтовых вод в фильтрующей среде, исследования установившихся течений жидкости и газа в различных трубопроводных сетях и колебаний жидкости или газа в гидродинамических системах. Наибольшее признание этот метод завоевал себе в гидротехнике. При проектировании подавляющего большинства крупных гидротехнических сооружений в СССР был использован метод ЭГДА.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается прибор ЭГДА 9/60, работающий на электропроводной бумаге. Интегратор ЭГДА 9/60 (рис. 75) служит для решения методом электроаналогий двумерных и осесимметричных краевых задач, описываемых уравнением эллиптического типа

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[A_1(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_2(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = 0 \quad (7.1)$$

с постоянными коэффициентами.

Конструктивно интегратор выполнен в виде стола-панели и съемных блоков: измерительного устройства, собранного по мостовой схеме, блока питания и двух блоков с 20 потенциометрическими делителями напряжения, которые позволяют снимать любой заданный потенциал с точностью до 0,1% от рабочего напряжения. Это обеспечивает реализацию любых граничных условий при моделировании уравнения Лапласа и тем самым существенно расширяет круг моделируемых задач.

ховывается серией жирных параллельных линий, не соприкасающихся между собой, что и создает различную проводимость в направлении этих линий и перпендикулярно к ним.

Создание твердых моделей для исследования объемных полей пока сопряжено с большими трудностями.

Следует отметить, что моделирование неэлектрических полей методом сплошных сред (с применением электролитических ванн или электропроводной бумаги) находит широкое применение при построении электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) для исследования установившихся течений идеальной жидкости, исследования

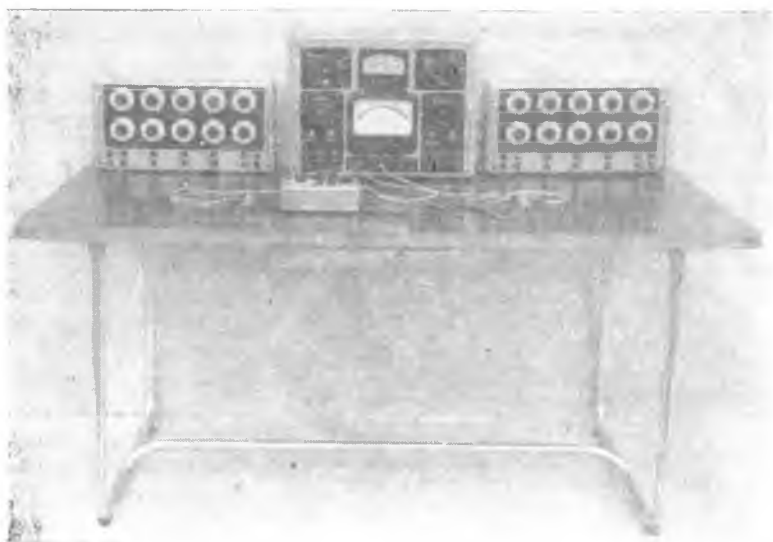


Рис. 75. Электронинтегратор типа ЭГДА.

Интегратор работает на постоянном токе. Основная инструментальная погрешность прибора не превосходит $\pm 4\%$.

Необходимо отметить, что в последнее время начинает применяться также метод моделирования плоских полей путем конформного отображения исследуемой области на бесконечную полосу. Это повышает точность моделирования, когда исследуемое поле резко неоднородно.

Примером подобного устройства может служить электронинтегратор типа ЭДН-1. Решение задачи на интеграторе производят в три этапа:

- конформное отображение рассматриваемой области на бесконечную полосу;
- преобразование краевых значений искомой функции, заданных на границе рассматриваемой области в краевые значения функции на полосе;
- решение задачи на бесконечной полосе.

Решающими элементами интегратора служат два отрезка полосы в форме прямоугольника, изготовленные из листовой легированной нержавеющей стали.

Электронинтегратор ЭДН-1 может быть использован для расчета магнитных полей электрических машин постоянного тока, для расчета магнитных систем реле и аппаратов, расчета напряжений при кручении стержней сложной формы сечения и т. п.

Относительная погрешность определения искомой функции составляет примерно 1% .

Литература: [8], [15], [19].

§ 2. Моделирование полей методом электрических сеток

Метод электрических сеток, предложенный в 1926 г. советским ученым С. А. Гершгориним, основан на математическом описании полей с помощью уравнений в конечных разностях.

Идея метода электрических сеток заключается в том, что моделируемая область, состоящая из сплошной среды, разбивается на элементарные объемы (рис. 76).

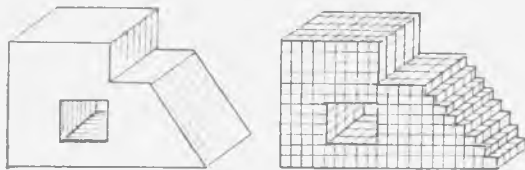


Рис. 76. Принцип разбиения моделируемой области на элементарные объемы.

Такая замена непрерывного распределения исследуемой функции дискретным соответствует конечно-разностной аппроксимации уравнений поля и, естественно, вносит

некоторую систематическую погрешность.

Выделим из области элементарный объем в виде прямоугольного параллелепипеда с гранями Δx , Δy , Δz и представим его электрической схемой замещения из проводимостей g_{ax} , g_{ay} , g_{az} (рис. 77).

Тогда проводимости между противоположными гранями элементарного объема определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} g_x &= \gamma \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} \\ g_y &= \gamma \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} \\ g_z &= \gamma \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \end{aligned} \right\} (7.2)$$

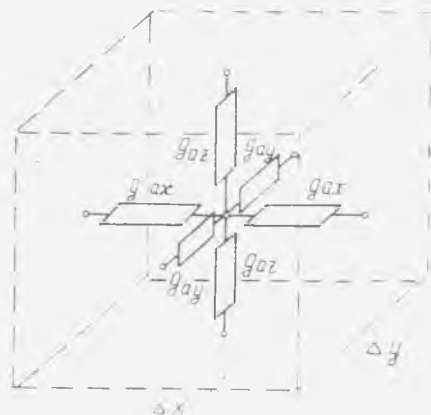


Рис. 77. Схема замещения элементарного объема

где γ — удельная проводимость сплошной однородной среды.

При сопряжении между собой элементарных схем замещения в соответствии с моделируемой областью получаем электрическую сетку, узловые точки которой приобретают геометрический смысл, так как соответствуют определенным точкам моделируемой области, координаты которых заданы (рис. 78). При этом проводимости между смежными узлами будут равны g_x , g_y и g_z .

В случае моделирования плоскопараллельного поля трехмерная сетка превращается в двухмерную. Если разделить область на квадратные элементы, приняв $\Delta x = \Delta y$, то плоская сетка строится при этом из равных проводимостей. В принципе возможно разделение области на элементы любой формы, лишь бы они непрерывно ее заполняли.

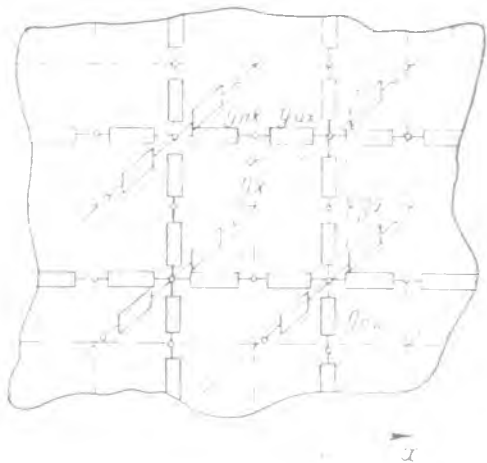


Рис. 78. Принцип построения электрической сетки.

Рассмотрим распределение токов в i -ой узловой точке электрической сетки с координатами x, y, z . Если распределение потенциалов U в узлах электрической сетки удовлетворяет некоторой функции координат сплошной проводящей среды, то

для смежных узлов 1, 2, 3, 4, 5, 6 сетки (рис. 79) имеем:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_{i+\Delta x}; \\ U_2 &= U_{i-\Delta x}; \\ U_3 &= U_{i+\Delta y}; \\ U_4 &= U_{i-\Delta y}; \\ U_5 &= U_{i+\Delta z}; \\ U_6 &= U_{i-\Delta z}. \end{aligned} \right\} (7.3)$$

Токи, притекающие к узлу i , по закону Ома:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= g_x(U_{i+\Delta x} - U_i); \\ i_2 &= g_x(U_{i-\Delta x} - U_i); \\ i_3 &= g_y(U_{i+\Delta y} - U_i); \\ i_4 &= g_y(U_{i-\Delta y} - U_i); \\ i_5 &= g_z(U_{i+\Delta z} - U_i); \\ i_6 &= g_z(U_{i-\Delta z} - U_i). \end{aligned} \right\} (7.4)$$

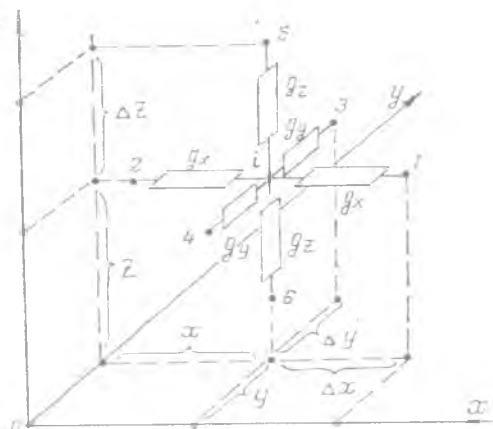


Рис. 79. Схема к определению потенциалов в узловых точках.

Теперь, учитывая (7.2), нетрудно получить алгебраическую сумму токов в узле i , то есть $\sum_{j=1}^6 i_j = 0$.

$$\gamma \Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{U_{i+\Delta x} - 2U_i + U_{i-\Delta x}}{(\Delta x)^2} + \frac{U_{i+\Delta y} - 2U_i + U_{i-\Delta y}}{(\Delta y)^2} + \frac{U_{i+\Delta z} - 2U_i + U_{i-\Delta z}}{(\Delta z)^2} \right) = 0, \quad (7.5)$$

что соответствует конечно-разностному представлению уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \text{ или } \nabla^2 U = 0. \quad (7.6)$$

Таким образом, электрическая сетка, составленная из одинаковых элементов, позволяет моделировать поле в однородной среде с методической погрешностью, пропорциональной квадрату выбранного шага сетки $\Delta x, \Delta y, \Delta z$.

Если моделируется поле в анизотропной или неоднородной среде, то удельные проводимости по соответствующим координатам должны иметь различные значения и электрическая сетка будет отвечать приближенному воспроизведению эллиптического уравнения более общего вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0. \quad (7.7)$$

К решению уравнения Лапласа сводятся задачи теории потенциалов; задачи по обтеканию тела несжимаемой жидкостью; установившиеся тепловые процессы (при условии отсутствия внутри области источников тепла), некоторые задачи фильтрации жидкости через пористую среду; задачи, связанные с расчетами электрических и магнитных полей и т. д.

Возможности простых резистивных сеток могут быть расширены, если к узлам сетки подключить источники тока I — «истoki» или проводимости нагрузки на землю Y — «стоки». При наличии только одних источников для однородной среды (рис. 80) моделируется уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma} j(x, y, z), \quad (7.8)$$

где $j(x, y, z)$ — некоторая функция распределения «исток».

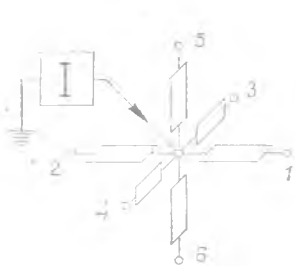


Рис. 80. Ячейка сетки с источником.

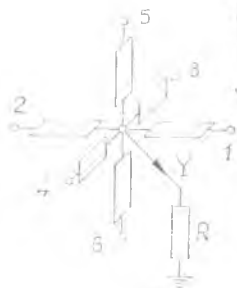


Рис. 81. Ячейка сетки с активным «стоком».

Выполнив «стоки» из активных сопротивлений (рис. 81), получим модель решения уравнения Поккельса:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \varphi(x, y, z) U. \quad (7.9)$$

Наконец, при наличии емкостных

«стоков» (рис. 82), приходим к уравнению Фурье, важному, в частности, при исследовании процессов теплопередачи:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \psi(x, y, z) \frac{\partial U}{\partial t} \quad (7.10)$$

Электрические сетки могут быть выполнены из реактивных элементов. Так, с помощью плоской реактивной сетки, показанной на рис. 83, моделируется волновое уравнение вида:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \xi(x, y) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (7.11)$$

Если с помощью сетки LC можно моделировать электромагнитное поле в диэлектрике, то схема замещения, состоящая из элементов LR, будет моделировать поле в проводящей среде.



Рис. 82 Ячейка сетки с емкостным «стоком».

Более сложная реактивная сетка, показанная на рис. 84, может быть использована для решения уравнений гиперболического типа

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_L \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_C \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0. \quad (7.12)$$

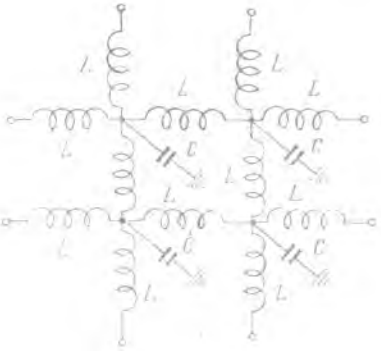


Рис. 83. Реактивная сетка для моделирования волнового уравнения.

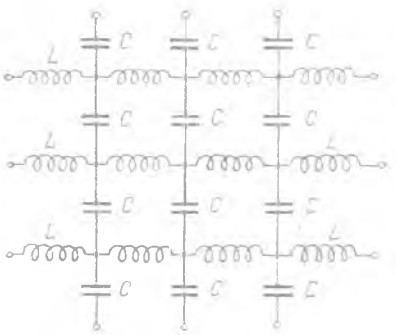


Рис. 84. Реактивная сетка для решения уравнений гиперболического типа

Наибольшее распространение получили интеграторы с резистивными двухмерными сетками из переменных сопротивлений, емкостными истоками или стоками, предназначенные для решения уравнений Лапласа, Пуассона и Фурье.

Любое из приведенных уравнений может иметь бесчисленное множество решений. Так, например, уравнению Лапласа удовлетворяют функции $\varphi = \text{const}$, $\varphi = C$, $\varphi = x^2 - y^2$, а также любая линейная комбинация этих функций. Для выделения из множества

решений одного, нужного решения, необходимо задание дополнительных условий, которым должно удовлетворять это решение.

Как известно, для однозначного решения обыкновенных дифференциальных уравнений обычно задают: $\varphi(0)$, $\varphi'(0)$, $\varphi''(0)$, . . ., $\varphi^{(n)}(0)$, то есть условия в начале, так называемые *начальные условия*. Такое задание условий называется *задачей Коши*. В некоторых задачах математической физики задаются условия в двух точках a и b — границах области (интервала с концами в этих точках), то есть задаются $\varphi(a)$ и $\varphi(b)$, или $\varphi'(a)$ и $\varphi'(b)$ и т. п. Эти условия называются *граничными*, или *краевыми*, поэтому и соответствующая задача называется *краевой*.

Рассмотрим разницу физического смысла обоих типов задания граничных условий на примере дифференциального уравнения.

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = f(x). \quad (7.13)$$

Если это уравнение описывает движение тела под воздействием силы $P(x) = m \cdot f(x)$, где m — масса тела; x — время, то по смыслу задачи известны положение тела и его скорость в момент времени, принимаемый за начальный, то есть $\varphi(a)$ и $\varphi'(a)$.

Этим же уравнением может описываться равновесие струны, натянутой между точками с абсциссами a и b под воздействием нагрузки $q(x) = T \cdot f(x)$, где T — натяжение струны (x — абсцисса точки струны). В этом случае известны лишь координаты точек закрепления струны, то есть $\varphi(a)$ и $\varphi(b)$.

Таким образом, обычно задача Коши возникает в том случае, если независимым переменным является время. При этом известны любые данные настоящего времени и неизвестны данные будущего времени. Иначе говоря, решение зависит от начальных данных, на которые не влияет последующее поведение функции.

Краевая задача обычно возникает в том случае, если независимым аргументом является пространственная координата. Тогда известны данные на обоих концах интервала, но не определена функция внутри заданного интервала.

Наиболее часто встречаются следующие способы задания условий на границе исследуемой области.

1. На границе задается значение функции $\varphi_r(s) = j(s)$, где $j(s)$ — известная функция от координат точек S контура. Этот случай называется *первой краевой задачей или задачей Дирихле*.

Граничные значения напряжения в данном случае весьма просто подводятся при помощи гибких проводов от делителя напряжения.

На рис. 85 приведен пример решения подобной задачи при определении температурного поля на передней поверхности резца.

2. На границе задается значение нормальной производной от искомой функции $\frac{\partial \varphi_r(s)}{\partial n} = f(s)$. Это так называемая *второй краевая задача*, или *задача Неймана*. Для сеточной области этому соответствует задание конечных нормальных разностей напряже-

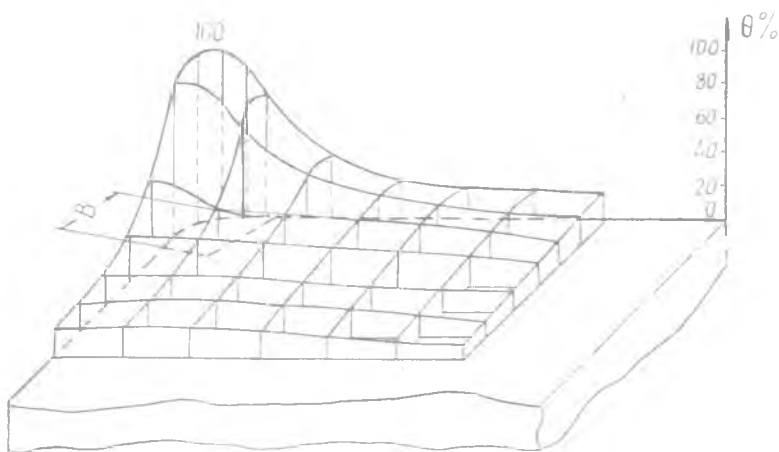


Рис. 85. Определение температурного поля на передней поверхности резца.

ний между значениями U_0 на контуре и значениями U_1 в узловых точках внутри контура, ближайших к граничным точкам. Нормальная производная, следовательно, заменяется через разности по направлениям линий сетки. При этом

$$\frac{\partial U}{\partial n} \approx \frac{U_0 - U_1}{l_1} = i_r. \quad (7.14)$$

Для задания нормальных производных к граничным элементам присоединяются относительно большие сопротивления X_c , через которые протекают токи заданных значений (подобно тому, как это выполняется для задания истоков поля). В идеальном случае ток, заданный в граничном элементе, не должен быть зависим от сопротивления сетки и происходящих в сетке процессов.

3. При *третьей* или *смешанной краевой задаче* задается линейная комбинация

$$f_1(s) \cdot \varphi_r(s) + f_2(s) \frac{\partial c_r(s)}{\partial n} = f_3(s). \quad (7.15)$$

Схемы задания граничных условий приведены на рис. 86.

Краевые условия I рода, как указывалось выше, задаются путем подачи определенных напряжений к граничным узловым точкам сетки от делителя напряжения D .

Для задания краевых условий II рода необходимо использовать сопротивления, величина которых должна значительно превосходить (в тысячи раз) сопротивление остальной части схемы. Это достигается применением конденсаторов, емкостное сопротивление X_c которых переменному току весьма велико.

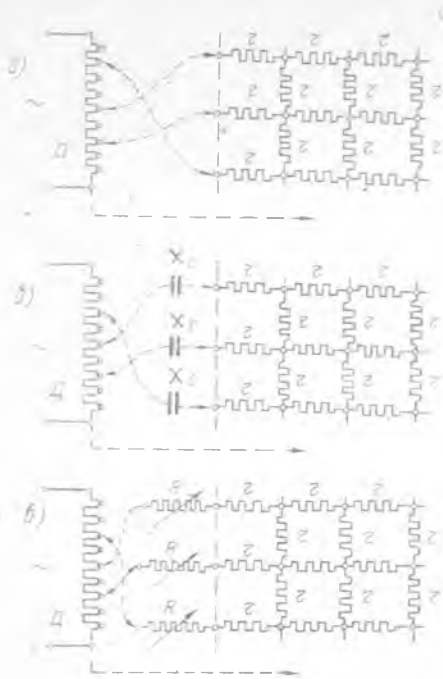


Рис. 86. Способы задания граничных условий:

а) I рода; б) II рода; в) III рода; r — сопротивления сетки; X_c — емкостные сопротивления; R — сопротивления для задания граничных условий III рода

явление в электрической модели периодически повторяется в неизменном виде в течение необходимого промежутка времени, достаточного для измерения напряжений на всех узловых точках модели, иначе говоря, для полного исследования интересующей нас части пространственно-временной области.

В качестве примера на рис. 87 приведено решение задачи по охлаждению балки с помощью двухмерной электрической сетки из R и C в различные моменты времени.

При выделении контуров моделируемой области на панели сеточного интегратора необходимо систему координат и количество элементарных объемов, на которые разделяется моделируемая область, выбирать так, чтобы узлы на панели сетки использовались наиболее полно. Вместе с тем необходимо обратить внимание на возможно более точное представление границ области.

Если моделируемая область имеет прямоугольные формы, то набор границ не вызывает особых затруднений. Несколько сложнее выделить область с нелинейными границами.

В сетке из переменных сопротивлений набор границы в этом случае можно уточнить, «притягивая» внешние узлы на фактиче-

Кревые условия III рода задаются по схеме, представленной на рис. 86, в. Подбором напряжения на делителе D и величины сопротивления R задается сочетание напряжения граничных узловых точек и разности между напряжениями граничной узловой точки и ближайшей узловой точки, лежащей внутри области, что приблизительно соответствует заданию условия

$$aU_0 + b \frac{\partial U}{\partial n} = C. \quad (7.16)$$

При решении уравнений типа Фурье

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \psi(x, y, z) \frac{\partial U}{\partial t}$$

приходится иметь дело с нестационарными во времени процессами, что при малом времени длительности явления (0,1—0,01 сек), вносит определенные трудности при снятии решения. Обычно такие задачи решаются методом периодизации, то есть исследуемое

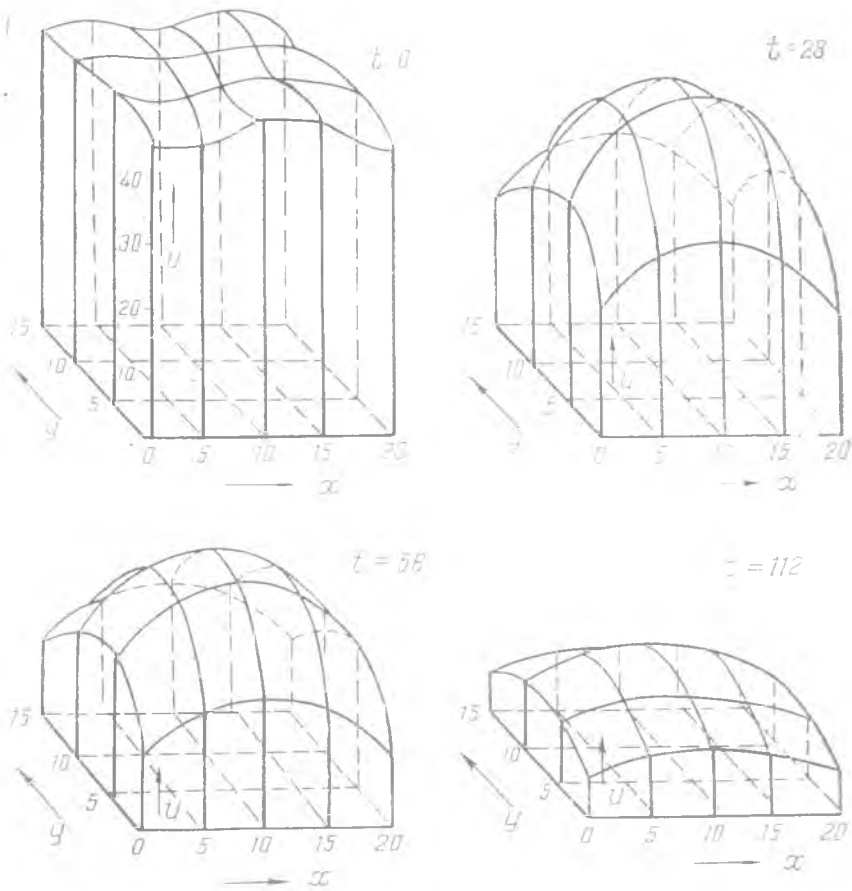


Рис. 87. Решение задачи по охлаждению балки на двумерной сетке в различные моменты времени.

ские контуры. Для достижения этой цели контур набирается по внешним узлам, как показано на рис. 88, чем несколько нарушается геометрическое подобие заданной границы и расстановки узлов вблизи контура. Зато сопротивления между узлами на участках, пересекаемых заданным контуром, уменьшаются в соответствии с отношением полученных отрезков на граничных элементах. Так, на рис. 88 сопротивление между узлами a и b составляет:

$$r_{ab} = r_x \frac{a_1 b}{ab}, \quad (7.17)$$

а между узлами c и b

$$r_{cb} = r_y \frac{c_1 b}{cb}. \quad (7.18)$$

Точность набора границ области может быть также увеличена путем преобразования системы координат, увеличения числа ячеек сетки и др.

Рассмотрим в качестве примера решение задачи стационарной теплопроводности на сеточном электронном интеграторе.



Рис. 88. Формирование контура с нелинейными границами.

Пусть требуется найти распределение температуры внутри стенки и фундамента нагревательной печи (рис. 89), удовлетворяющее уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0.$$

Максимальная температура печи $T = 800^\circ\text{C}$ принята за 100%.

Шаг сетки $\Delta x = \Delta y = 1$ (при этом сопротивление сетки берется максимальными и равными 100%).

Граничные значения температуры на поверхности стенок и фундамента печи приняты соответственно:

- на сторонах $АН$ и $НГ$ — $T(x, y) = 1$ (%),
- на стороне $АВ$ — $T(x, y) = 0,5x + 1$ (%),
- на стороне $ВС$ — $T(x, y) = 2,5$ (%),
- на стороне $ДЕ$ — $T(x, y) = 6y + 34$ (%),
- на стороне $ЕF$ — $T(x, y) = 52$ (%).

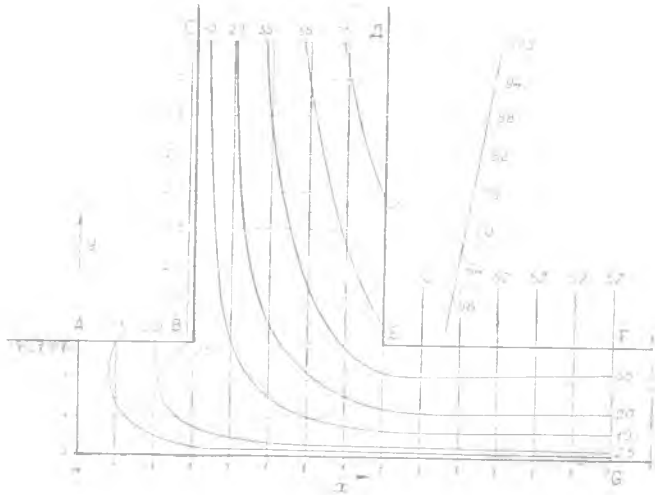


Рис. 89. Решение задачи определения температурного поля

Решение задачи показано также на рис. 89 в виде соответствующих изолиний.

Литература: [12], [15], [19].

§ 3. Статические электроинтеграторы

В последнее время широкое распространение получили новые принципы решения нестационарных краевых задач типа уравнения теплопроводности с использованием дискретного разбиения временной и пространственных координат. В устройствах, реализующих эти принципы, воспроизведение осуществляется с помощью электрической схемы конечно-разностной аппроксимации исходного дифференциального уравнения. Решение производится с помощью одного и того же счетно-решающего элемента, выполненного в виде n — лучевой звезды, на концы которой последовательно подаются заданные значения потенциалов. Таким образом, *статические электроинтеграторы* (СЭИ) можно отнести к устройствам типа *интегрирующих звезд*.

Рассмотрим принцип действия счетно-решающего элемента СЭИ применительно к решению уравнения типа

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (7.19)$$

где $k = \frac{\lambda}{c\rho}$ — коэффициент температуропроводности.

Для одномерного случая уравнение запишется так:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t}. \quad (7.20)$$

Представим уравнение (7.20) в конечных разностях

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} &\approx \frac{\varphi_{i-1,t} - 2\varphi_{i,t} + \varphi_{i+1,t}}{(\Delta x)^2}, \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} &\approx \frac{\varphi_{i,t+\Delta t} - \varphi_{i,t}}{\Delta t}. \end{aligned} \right\} \quad (7.21)$$

После несложных преобразований получим:

$$\varphi_{i,t+\Delta t} = \frac{k \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} (\varphi_{i-1,t} - 2\varphi_{i,t} + \varphi_{i+1,t}) + \varphi_{i,t}. \quad (7.22)$$

Если теперь для простоты положить

$$\frac{k \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{3} = \frac{1}{M}, \quad (7.23)$$

то

$$\begin{aligned} \varphi_{i,t+\Delta t} &= \\ &= \frac{1}{3} (\varphi_{i-1,t} + \varphi_{i,t} + \varphi_{i+1,t}). \end{aligned} \quad (7.24)$$

Для моделирования функции $\varphi_{i,t}$ электрическим потенциалом $U_{i,t}$ применяется счетно-решающий (суммирующий)

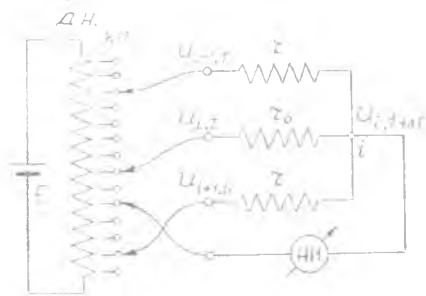


Рис. 90. Счетно-решающий элемент СЭИ.

элемент в виде трехлучевой звезды, схема которого приведена на рис. 90. Для этого элемента, на основе первого закона Кирхгофа, можно записать следующее равенство:

$$\frac{U_{i-1,t} - U_{i,t+\Delta t}}{r} + \frac{U_{i,t} - U_{i,t+\Delta t}}{r_0} + \frac{U_{i+1,t} - U_{i,t+\Delta t}}{r} = 0, \quad (7.25)$$

которое преобразуется к виду:

$$U_{i,t+\Delta t} = \frac{r_0(U_{i-1,t} + U_{i+1,t}) + r \cdot U_{i,t}}{r + 2r_0} = \frac{r_0}{r + 2r_0} (U_{i-1,t} + U_{i+1,t}) + \frac{r}{r + 2r_0} U_{i,t}. \quad (7.26)$$

Если теперь принять $r = r_0$, получим уравнение

$$U_{i,t+\Delta t} = \frac{1}{3} (U_{i-1,t} + U_{i,t} + U_{i+1,t}), \quad (7.27)$$

соответствующее (7.24). При этом потенциалы U будут численно равными или пропорциональными исследуемой функции φ .

Решение задачи, таким образом, сводится к поочередному заданию нужных потенциалов $U_{i-1,t}$, $U_{i,t}$ и $U_{i+1,t}$ на счетно-решающий элемент и измерению значения $U_{i,t+\Delta t}$ в его узле. Необходимые потенциалы снимаются с коммутационной панели КП делителя напряжения ДН (рис. 90), результат ищется с помощью нуль-индикатора НИ на той же панели. Решение получается последовательным заполнением таблицы следующего вида (табл. 6):

Таблица 6

	0	Δt	$2\Delta t$	$3\Delta t$
$i=0$	100	100	100	100
$i=1$	0			
$i=2$	0			
$i=3$	0			

Общий вид статического интегратора типа «СЭИ-1» показан на рис. 91.

Статические электроинтеграторы значительно облегчают решение разнообразных задач, связанных с исследованием физических полей в одно-, двух- и трехмерном пространстве (расчеты температурных полей в различных сооружениях, исследование пограничного слоя и др.). Существенно, что на одном и том же приборе возможно решение как линейных, так и нелинейных уравнений, когда необходимо учитывать, например, изменение теплофизических свойств вещества в зависимости от температуры, коэффициентов диффузии от концентрации и др. Являясь чрезвычайно удобным прибором для решения многих нестационарных

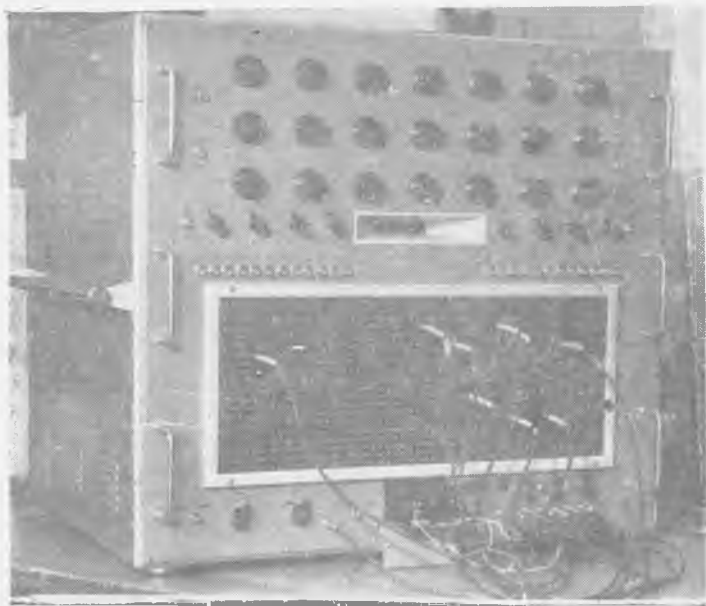


Рис. 91. Общий вид статического интегратора «СЭИ-1».

задач с переменными коэффициентами, истоками, стоками и т. д. статические интеграторы в то же время требуют значительных затрат времени на различного рода переключения, запись результатов на каждом шаге решения и т. п.

Литература: [12].

§ 4. Электроинтеграторы для решения краевых задач математической физики

Для решения различных научных и инженерных задач в настоящее время построено несколько разновидностей сеточных моделей, как универсальных, так и специального типа. Большое распространение получили резистивные сеточные электроинтеграторы для решения уравнений Лапласа, Пуассона и Фурье.

Электроинтегратор ЭИ-12. Предназначен для исследования полей, описываемых однородными уравнениями Лапласа

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (7.28)$$

или более общего вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[p(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[q(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = 0 \quad (7.29)$$

при граничных условиях I, II и III рода, и неоднородными уравнениями Пуассона

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = F(x, y) \quad (7.30)$$

или общего вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[p(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[q(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = F(x, y) \quad (7.31)$$

для краевой задачи при нулевых значениях функции на границе области и при граничных условиях II рода.

Электроинтегратор ЭИ-12 работает на переменном токе промышленной частоты и состоит из следующих основных узлов (рис. 92): сетка переменных сопротивлений; сопротивления для ввода граничных условий; набор емкостей; делители напряжения для задания граничных условий и истоков; коммутационные панели; измерительное устройство.

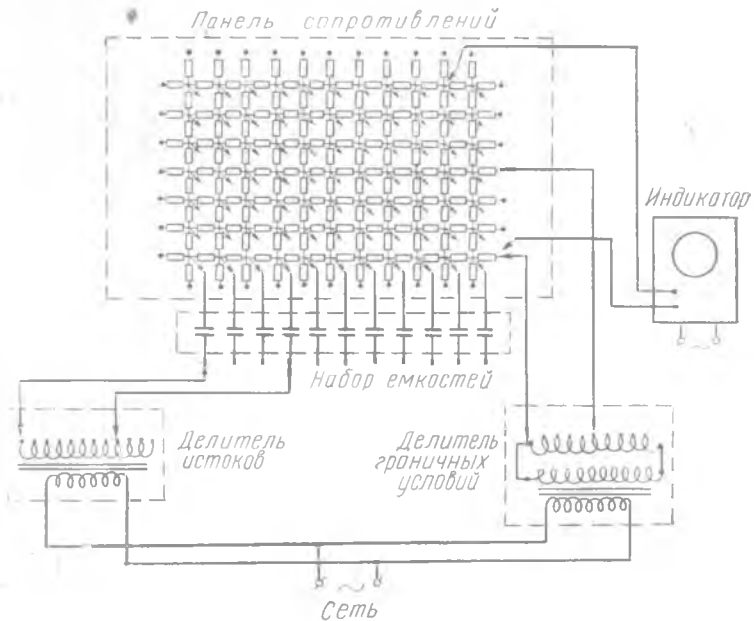


Рис. 92. Схема электроинтегратора ЭИ-12.

Интегратор представляет собой стол с вертикальной панелью. На наборной панели расположены 28 вертикальных и 16 горизонтальных рядов магазинов сопротивлений и штепсельные гнезда, к которым присоединены узлы электрической сетки (рис. 93). Всего имеется 852 магазина, которые образуют сетку интегратора, и 88 граничных магазинов для задания граничных условий III рода. Общее число узловых точек в сетке — 448. Сеточные магазины имеют максимальное сопротивление 1000 ом, а граничные — 10 000 ом.

При решении задачи на электроинтеграторе на панель переменных сопротивлений наносится контур, аппроксимирующий область, для которой находится решение. Отсоединяя внешние узлы сетки, создают изолированные участки границы, а замыкая узлы накоротко, — проводящие границы области. Сопротивления между внутренними узлами устанавливаются в соответствии с расчетными значениями проводимостей.

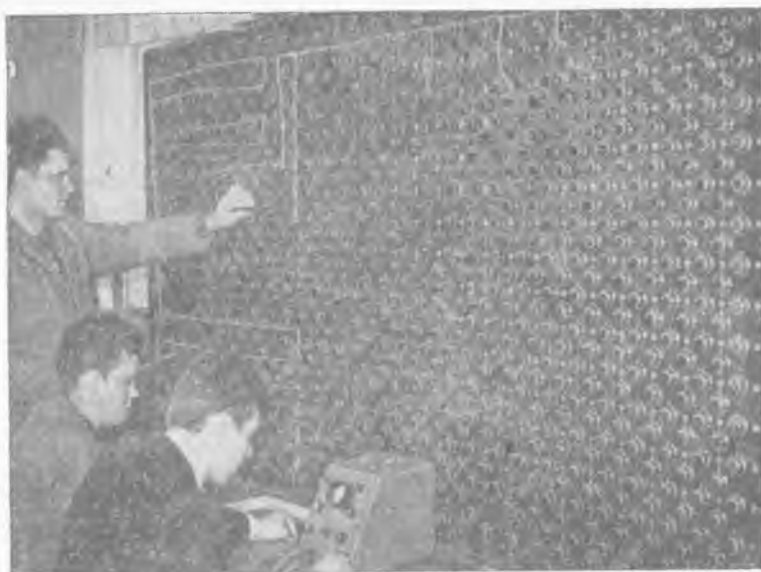


Рис. 93. Панель сопротивлений сеточного электронинтегратора ЭИ-12.

После набора моделируемой области задают граничные условия в виде соответствующих потенциалов, получаемых от делителя граничных условий.

Измерение потенциалов в узлах сетки осуществляется компенсационным способом с помощью электронно-лучевого нуль-индикатора.

Погрешность решения на интеграторе для различных задач находится в пределах от 0,1 до 1% от максимального значения искомой функции во всей рассматриваемой области.

Электронинтегратор ЭИ-22. Электронинтегратором ЭИ-22 решаются уравнения Фурье для двухмерной области при заданных начальных и граничных условиях

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = F(x, y) \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7.32)$$

Интегратор смонтирован на одном столе и состоит из следующих основных узлов: сетки постоянных сопротивлений; магазинов емкостей для задания стоков в узлах сетки; устройств задания начальных условий в виде начальных значений напряжений в узлах сетки; устройств задания граничных условий в виде напряжений, изменяющихся по заданному закону; измерительного устройства; устройств периодизации процесса решения; устройств разряда конденсаторов модели для приведения электрической сетки в начальное состояние.

В интеграторе предусмотрена периодизация процесса решения, для чего электрическая сетка периодически отключается от источников тока, а конденсаторы сетки полностью разряжаются так, что сетка в конце рабочего цикла приходит в исходное состояние для повторного воспроизведения исследуемого явления. Каждый цикл периодизированного процесса состоит из времени работы модели, в течение которого происходит решение задачи, и времени подготовки модели, то есть разряда конденсаторов сетки. Продолжительность цикла работы находится в пределах от 0,8 до 2,4 секунды.

Задание постоянных значений напряжений начальных и граничных условий производится от делителя напряжения, включаемого в начале рабочего цикла.

Задание граничных условий в виде напряжений, изменяющихся во времени, осуществляется с помощью простейших электромеханических функциональных устройств — программных коммутаторов.

Погрешность решения на интеграторе для различных задач находится в пределах от 1 до 5% от максимального значения искомой функции во всей рассматриваемой области.

Электронинтегратор ЭИ-31. В электронинтеграторе ЭИ-31 объединены математические возможности моделей ЭИ-12 и ЭИ-22, что позволяет использовать его для решения уравнений типов:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0; \quad (7.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[p(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[q(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = 0; \quad (7.34)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = F(x, y); \quad (7.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[p(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[q(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = F(x, y); \quad (7.36)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x, y) \frac{\partial u}{\partial t}; \quad (7.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[p(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[q(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = f(x, y) \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7.38)$$

Уравнения типа Лапласа (7.33) и (7.34) решаются для краевых, условий I, II и III рода.

Уравнения типа Пуассона (7.35) и (7.36) решаются при нулевых значениях функции на границе и при задании на границе краевых условий II рода.

Уравнения типа Фурье (7.37) и (7.38) решаются для произвольных начальных условий и для постоянных и переменных граничных условий.

Сетка интегратора состоит из переменных трехдекадных сопротивлений и имеет 450 узловых точек. В каждой узловой точке сетка имеет переменную емкость в виде трехдекадного магазина.

Для периодизации процесса при решении уравнений типа Фурье, задания переменных граничных условий и измерения мгновенных значений искомой функции электронинтегратор имеет вращающееся электромеханическое устройство.

Погрешность интегратора составляет для различных задач от 0,1 до 5% от максимального значения искомой функции во всей области.

Методика решения задач на интеграторе ЭИ-31 аналогична методике для электронинтеграторов ЭИ-12 и ЭИ-22.

МСМ-1. Малая сеточная модель МСМ-1 предназначена для исследования физических процессов, описываемых системой дифференциальных уравнений в частных производных эллиптического типа:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[A_1(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_2(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = f(x, y). \quad (7.39)$$

Задачи, решаемые на модели, сводятся к определению функции $u(x, y)$ в замкнутой области при заданных граничных условиях первого, второго или третьего рода.

Сетка модели набрана из сопротивлений 1 ком и содержит $(19 \times 19) 361$ узлов. Каждое сопротивление имеет параллельно включенное, нормально разомкнутое гнездо, и два последовательно включенных, нормально замкнутых гнезда, что позволяет с помощью съемных штеккерных сопротивлений изменять сопротивление шага сетки. Каждая третья узловая точка сетки имеет магазин емкостей, состоящий из четырех номиналов емкостей.

Дискретность задания граничных условий в пределах $\pm 100\% - 0,5\%$. Потребляемая мощность 0,15 ква. Габариты $1250 \times 2070 \times 1924$.

УСМ-1. Универсальная сеточная модель типа УСМ-1 предназначена для исследования физических процессов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных эллиптического и параболического типов

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[A_1(x, y, z) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_2(x, y, z) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_3(x, y, z) \frac{\partial u}{\partial z} \right] = F(x, y, z); \quad (7.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[A_1(x, y, z) \frac{\partial u}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[A_2(x, y, z) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_3(x, y, z) \frac{\partial u}{\partial z} \right] = a^2 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (7.41)$$

а также некоторых процессов описываемых дифференциальными уравнениями 4-го порядка.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] = P(x, y). \quad (7.42)$$

Блок электрической сетки выполнен по трехкоординатной системе и имеет 1459 узловых точек.

Общая погрешность при решении стационарных задач — 1%, при решении нестационарных задач — 5% от шкалы граничных условий.

Потребляемая мощность комплекта — 25 кВт.

Занимаемая площадь — 70 м².

СЭИ. Статический электроинтегратор СЭИ предназначен для решения нестационарных нелинейных уравнений типа теплопроводности и сводящихся к ним.

Принцип действия его основан на методе математического моделирования с помощью электрической схемы исходных уравнений, аппроксимированных конечными разностями. Вследствие того, что решение ведется в дискретных пространственно-временных координатах, удается легко учитывать различные нелинейности (зависимость коэффициентов от функции, движущиеся границы фазовых переходов и др.), наличие переменных источников и стоков, сложных условий на границах области и др.

Статический электроинтегратор состоит из нескольких функциональных дискретных потенциометров высокой разрешающей способности. Отводы от потенциометров выведены на общую коммутационную панель с пространственно совмещенными гнездами.

Перед началом решения на функциональных потенциометрах программируется изменение коэффициентов. После этого решение осуществляется поочередным перемещением счетно-решающего элемента по узловым точкам сеточной области. Прибор допускает решение в пространстве нескольких измерений при различном делении области функции на элементы (прямоугольные, шестиугольные, треугольные и др.), в декартовых, цилиндрических или сферических координатах.

Интегратор работает в полуавтоматическом режиме, решение выдается в цифровом виде с точностью до третьего знака после запятой.

СЭИ может применяться при определении температурных полей в блоках строящихся плотин, выборе оптимальной толщины теплозащитных покрытий, решении задач теории пограничного слоя, магнитной газовой динамики, переноса нейтронов в ядерных реакторах, фильтрации жидкостей и др.

Мощность потребляемая интегратором — 150 вт.

Литература: [12], [15], [19].

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Глава VIII. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Основным преимуществом цифровых вычислительных устройств перед машинами непрерывного действия является значительно большая точность вычислений и универсальность. В цифровых машинах числа представляются в виде последовательности цифр, благодаря чему всегда можно обеспечить любую заданную точность решения, что достигается включением в состав машины достаточного количества элементов, изображающих разряды чисел. При этом требования к точности изготовления и стабильности работы самих элементов не повышаются. Решение задачи сводится к выполнению отдельных арифметических действий над исходными числами. Поэтому цифровые машины иногда называются также машинами дискретного счета.

Таким образом, цифровые вычислительные машины не моделируют заданное уравнение, а решают его тем или иным численным методом. Принципиально, следовательно, оказывается возможным решение любой задачи, если известен алгоритм, то есть система формальных правил, четко и однозначно определяющих процесс выполнения задания. Известно, что широко разработанные математические численные методы сводят решение самых разнообразных математических задач к последовательному выполнению четырех арифметических действий и некоторых логических операций. В общем случае для решения математических задач характерны:

1. Необходимость выполнения больших последовательностей различных арифметических и логических операций.
2. Наличие большого количества промежуточных результатов, которые сразу же используются для продолжения вычислений.
3. Необходимость изменять направление вычислительного

процесса в зависимости от результатов промежуточных вычислений.

Таким образом, для того чтобы машина полностью решала математические задачи, она должна производить все необходимые элементарные арифметические и логические операции, иметь достаточную емкость устройств для хранения промежуточных и исходных величин и быть способной автоматически выбирать нужное направление дальнейших вычислений в зависимости от результатов промежуточных операций.

Литература: [1], [3], [27].

§ 1. Функциональная схема ЭВМ. Принцип работы

С точки зрения принципа работы любая электронная вычислительная машина универсального назначения может содержать следующие основные части (рис. 94):

1. Арифметическое устройство.
2. Запоминающее устройство.
3. Устройство управления.
4. Устройство ввода информации.
5. Устройство выдачи результатов.

Арифметическое устройство служит для выполнения арифметических и логических операций над числами. К логическим относятся: операция сравнения чисел, операция нахождения целой части числа, операция нахождения модуля числа и др. Основными характеристиками арифметических устройств являются скорость выполнения операций, принцип действия и многообразие видов операций.

Запоминающее устройство содержит программу решения задачи, числовой материал, запоминает результаты вычислений и выдает их для дальнейших действий, когда это предусматривается программой. Программа вычислений содержит перечень инструкций или команд, по которым машина выполняет те или иные операции, и каждая такая команда изображается в виде некоторого числа. Команды-числа «записываются» и «воспроизводятся» запоминающим устройством так же, как и обыкновенные числа. Числовой материал, который нужно запоминать, может быть самым различным как по содержанию, так и по количеству. К нему могут относиться начальные данные задачи, промежуточные и конечные результаты и, наконец, табличные данные.

К запоминающим устройствам ЭВМ предъявляются два основных требования, которые до настоящего времени не удалось вполне реализовать в одном устройстве в силу их противоречивости: высокая скорость приема и выдачи чисел; большое количество запоминаемой информации.

В связи с этим запоминающее устройство машины обычно состоит из нескольких отдельных устройств.

1. Запоминающее устройство с малым временем выборки (до 10 мксек и менее), называемое оперативным накопителем или внутренней памятью. Это устройство строится в большинстве случаев на основе ферритовых матриц и имеет относительно небольшую емкость, порядка 1024—4096 чисел. Оперативный накопитель непосредственно связан с арифметическим устройством и содержит обычно только программу и те данные, которые необходимы для ближайшего ряда вычислений.

2. Запоминающее устройство со средним временем выборки (порядка 10 мксек) представляет собой чаще всего магнитный вращающийся барабан. Емкость такого ЗУ составляет от 4096 до 8192 чисел. У некоторых машин имеется несколько таких барабанов.

3. Запоминающее устройство с большим временем выборки (до нескольких минут). Сюда относятся ЗУ на магнитных лентах, наподобие магнитофонных и, реже, на магнитных дисках. Емкость таких ЗУ составляет 100 000—400 000 чисел; их также может быть несколько.

В отличие от оперативного накопителя два последних ЗУ получили название внешних запоминающих устройств.

Не все машины снабжены этими тремя ступенями памяти, но в любом случае информация, которую содержат внешние запоминающие устройства, не участвует непосредственно в вычислениях, а перед этим передается в оперативный накопитель.

Для удобства записываемая информация помещается в определенных зонах внешних ЗУ в виде некоторых массивов чисел. Поэтому перенос информации из одного ЗУ в другое производится только группами чисел.

Запись в устройствах памяти сохраняется даже при выключенном напряжении, что позволяет удерживать необходимую часть информации и не вводить ее каждый раз заново.

Устройство управления служит для автоматического управления работой машины в процессе вычислений. Оно обеспечивает последовательное выполнение операций по заданной программе, а также управление работой различных устройств машины. В общем случае устройство управления содержит (рис. 94) регистр команд (РК), который служит для приема из оперативного накопителя кодированной команды и сохранения этой команды на все время выполнения заданной операции; счетчик команд (СК), с помощью которого осуществляется переход от одной команды к другой, и дешифратор команд (ДК), в котором числовой код, изображающий команду, преобразуется в электрические сигналы, управляющие работой машины.

К устройству управления относится также система ручного управления и контроля. Ручное управление служит для запуска и остановки машины. Оно позволяет выполнять по отдельным операциям введенную программу в том случае, если необходимо проверить работу машины. Контрольное устройство представляет

собой систему сигнальных лампочек, которые регистрируют выполняемые машиной операции.

Устройства ввода информации и вывода результатов являются, по существу, органами общения человека с машиной. Устройство ввода служит для восприятия вводимой информации, пред-

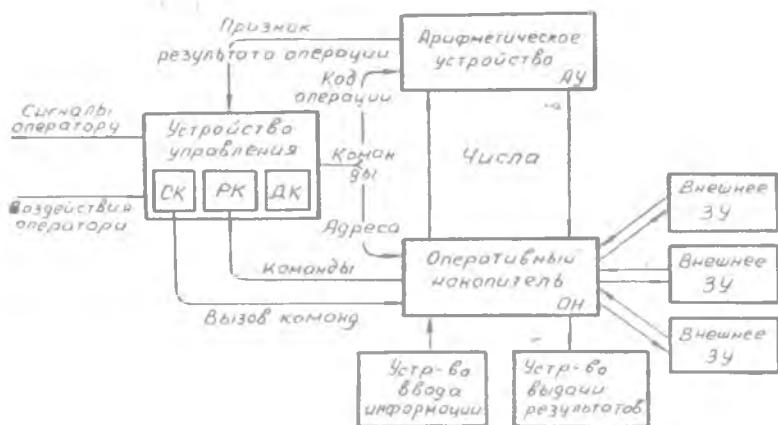


Рис. 94. Общая функциональная схема ЭЦМ.

ставленной в виде пробивок на перфокартах или перфолентах, преобразования их в электрические сигналы и передачи в запоминающие устройства. Выводное устройство служит для преобразования выводимого из машины результата решения, представленного электрическими сигналами, в числовой материал, печатаемый на бумажной ленте, или в специальный код, который пробивается на перфолентах или перфокартах. Некоторые современные машины снабжаются устройствами алфавитно-цифрового ввода и вывода, позволяющими вводить и выводить информацию как в цифровом, так и буквенном кодах.

Кроме рассмотренных устройств, образующих собственно вычислительную машину и связанных между собой системой магистралей, в состав любой ЭЦМ входят еще *внешние устройства*, которые не имеют электрической связи с машиной и служат для подготовки исходной информации к вводу в машину. С помощью внешних устройств исходные данные и программа, записанные на бумаге, переносятся на перфокарты или перфоленты. В состав внешних устройств входят *клавишные устройства*, на которых набирается исходная информация, *входные перфораторы*, пробивающие соответствующий код на лентах или картах, *контрольщики*, а для печатания результатов, выданных машиной на перфокарты или перфоленты — специальные *печатающие устройства*. По существу, внешние устройства машины и ее устройства ввода и вывода являются приборами для перекодировки информации.

В некоторых случаях устройства ввода и вывода обеспечивают также согласование малой скорости поступления информации с большой скоростью действия машины.

В общем случае электронная цифровая машина представляет собой целый комплекс различных основных и вспомогательных устройств, находящихся между собой в определенной взаимосвязи.

Принцип работы ЭВМ

Машина выполняет ограниченное число основных операций: сложение, вычитание, умножение, деление, сравнение двух чисел и некоторые другие. Каждая операция выполняется машиной под воздействием специального управляющего сигнала — *команды*.

Команда — это информация, представляемая обычно в числовой форме и определяющая действия машины в течение некоторого времени. В общем случае команда, как группа цифровых знаков, воспринимаемых машиной, делится на несколько частей. Одна часть является кодом операции и определяет, что должна сделать машина (сложить, умножить и т. д.), остальные части, называемые адресами, указывают номера ячеек оперативного накопителя, где находятся числа, над которыми производится операция или куда нужно записать результат. Например, команда

<u>05</u>	<u>0231</u>	<u>0342</u>	<u>1215</u>	
код операции	1-й адрес	2-й адрес	3-й адрес	(8.1)

или

05023103421215

может означать: умножить (05) число, находящееся в ячейке памяти № 0231, на число, находящееся в ячейке № 0342, результат поместить в ячейку № 1215. Команды программы кодируются и хранятся в машине в ячейках памяти таким же образом, как и обычные числа. Последовательность команд образует *программу* работы машины. Программа составляется заранее и вводится в машину вместе с исходными данными перед решением задачи; после этого все решения выполняются машиной автоматически.

Может возникнуть вопрос: есть ли разница между числовыми величинами и командами программы внутри вычислительной машины? С формальной точки зрения разницы нет никакой. Поэтому, если ввести команду в арифметическое устройство — оно выполнит над ней заданную вычислительную операцию, как над обычным числом. Это обстоятельство позволяет в ряде случаев производить над командами арифметические и логические операции, изменять их и даже формировать новые команды, что является одним из мощных средств программирования. С другой стороны, если в устройство управления ввести произвольное число, то оно будет воспринято как команда, и машина попытается ее

выполнить, что может, конечно, привести к полной бессмыслице. Таким образом, устройство управления воспринимает число по смысловому значению, а арифметическое — по количественному. Чтобы не произошло путаницы, машину заставляют работать, начиная с первой команды программы, а затем команды выдаются из оперативного накопителя в устройство управления поочередно в заранее заданном порядке до последней, вызывающей остановку машины.

Каждая очередная команда выбирается из оперативного накопителя на регистр команд (РК) устройства управления. После расшифровки на дешифраторе (ДК) код операции поступает в арифметическое устройство и переключает его на заданную операцию. Адреса поступают в оперативный накопитель, а выбранные по ним числа направляются в арифметическое устройство для вычислений. Результат операции может быть послан обратно в оперативный накопитель, в ячейку, номер которой указан в соответствующем адресе данной или другой команды. Записью результата операции в память заканчивается выполнение данной команды. Выборка из оперативного накопителя следующей команды производится с помощью счетчика команд (СК). На нем в определенный момент должен быть записан номер ячейки, содержащей очередную команду, подлежащую переносу в РК, т. е. команду, к которой надлежит перейти после выполнения данной. Обычно содержимое счетчика после выполнения каждой команды увеличивается на единицу, что и обеспечивает нормальную последовательность выборки команд в порядке номеров ячеек оперативной памяти.

Из арифметического устройства в устройство управления поступают сигналы (признаки) о характере результатов, получающихся при выполнении операций. При получении определенных сигналов устройство управления изменяет порядок выполнения команд программы или характер работы машины. При этом на счетчик команд из РК переносится адрес новой команды, к выполнению которой (вместо очередной) машина должна перейти. Благодаря этому машина может повторять нужное число раз отдельные участки программы, переходить от одной части программы к другой и т. п., что в значительной степени расширяет ее возможности.

Помимо команд арифметических операций машиной выполняются и команды другого рода, необходимые для автоматической работы машины (команды передачи данных из одного места памяти в другое, выдачи данных из машины, остановки и др.).

Выше был рассмотрен принцип работы машин с так называемой трехадресной системой управления. К ним относятся БЭСМ, М-20, «Стрела» и др.

Существуют также системы управления с сокращенным количеством адресов — двухадресные и одноадресные. Эти системы

обеспечивают большую экономию в аппаратуре, благодаря сокращению числа регистров и количества тактов работы схем.

При одноадресной системе каждая команда содержит лишь код операции и один адрес. При этом для выполнения арифметической операции над двумя числами с записью результата в запоминающее устройство требуются в общем случае три команды. Например, рассмотренная выше трехадресная команда перемножения двух чисел:

05 0231 0342 1215

в одноадресной системе запишется следующим образом:

02 0231

05 0342

16 1215

Здесь первая команда означает: (02) — передача содержимого ячейки № 0231 в сумматор, вторая (05) — умножение числа в сумматоре на число, хранящееся в ячейке № 0342, третья (16) — передача результата из сумматора в ячейку № 1215 запоминающего устройства.

К машинам с одноадресной системой управления относятся: «Урал», «Проминь», «Сетунь» и др.

При двухадресной системе каждая команда содержит код операции и адреса первого и второго чисел. Результат операции записывается по одному из адресов, например, по второму. Такая система используется в машинах «Минск», «Наири», «Раздан» и др.

Практически скорость выполнения машиной вычислений почти не зависит от выбранной адресности команд, так как общее время всех обращений к запоминающему устройству, необходимых для выполнения каждой полной операции, не зависит от адресности команд. Однако для программирования трехадресные команды удобнее, чем одноадресные.

Следует отметить, что если в принципе можно построить машину, работающую в обычной (десятичной) системе счисления, то по целому ряду причин более удобным для машинной техники оказываются другие системы счета, из которых наибольшее применение получила так называемая двоичная (или бинарная) система счисления.

Литература: [8], [9], [27], [36].

§ 2. Системы счисления. Перевод чисел из одной системы в другую

С древнейших времен человечество пользовалось различными способами счета и записи чисел. Вначале появились так называемые непозиционные системы счисления, основанные на использовании набора опорных символов. Разновидностью непозиционной системы является римская система, в которой для записи чисел используются буквы латинского алфавита. При этом буква I

всегда означает единицу, буква V — пять, X — десять, L — пятьдесят, C — сто, D — пятьсот, M — тысячу и т. д. Число 268 запишется в римской системе в виде CCLXVIII.

Величина числа получается здесь сложением величин, изображаемых отдельными буквами. По этой причине непозиционные системы иногда называют также *аддитивными* (от латинского *additio* — сложение).

Правда, для сокращения записи установили, что если поместить букву, означающую меньшее число, слева от большего, то это меньшее число следует вычитать. Например, четыре записывается как IV, девять — IX, сорок — XL и т. д. Однако это изменение никак не отражается на основном принципе, где каждая используемая буква всегда означает одно и то же число.

Подобные системы счисления неудобны и практически почти не применяются.

Широко распространенные *позиционные* системы счисления являются наиболее удобными для вычислительных операций. В них любое число изображается ограниченным количеством знаков. Но здесь важным стало не только начертание знака, но и место, позиция этого знака в изображении числа. Появился позиционный знак — нуль. Количество различных цифр, применяемых в позиционной системе счисления, называют ее *основанием*.

К позиционным системам счисления относится и общепринятая десятичная система, берущая свое начало от счета на пальцах. Она была изобретена в Индии, затем заимствована там арабами и уже через арабские страны пришла в Европу. В этой системе для записи чисел используется десять различных знаков — цифр 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9.

Цифры обозначают десять последовательных целых чисел, начиная с нуля и кончая девятью. Число десять изображают уже двумя цифрами «10». Эта величина, являющаяся основанием системы, определяет постоянное весовое отношение соседних разрядов.

Таким образом, в этой системе любое целое число x может быть однозначно представлено в виде

$$x = \alpha_{n-1} \cdot 10^{n-1} + \alpha_{n-2} \cdot 10^{n-2} + \dots + \alpha_1 \cdot 10^1 + \alpha_0 \cdot 10^0 = \alpha_{n-1} \alpha_{n-2} \dots \alpha_1 \alpha_0, \quad (8.2)$$

где α — одна из десятичных цифр,

n — количество разрядов числа.

Например, число 4309 запишется так:

$$4309 = 4 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 9 \cdot 10^0,$$

Из равенства (8. 2) очевидно, что каждый последующий разряд в десять раз больше предыдущего.

Возможны системы счисления с любым основанием. В древнем Вавилоне, например, применялась шестидесятеричная система счисления. Остатки ее мы находим в делении часа или граду-

са на 60 минут, минуты на 60 секунд и т. п. Употреблялась также и двенадцатеричная система, следами которой является сохранившийся обычай считать некоторые предметы дюжинами, делить год на 12 месяцев. Встречалась также (например, в древней Руси) пятеричная система.

Рассмотрим некоторые системы счисления, получившие применение в вычислительной технике.

Принимая за основание системы число «восемь», получим восьмеричную систему. В этой системе счисления для записи всевозможных чисел применяют восемь различных цифр

$$0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,$$

обозначающих целые последовательные числа, начиная с нуля и кончая семью. Число восемь записывают уже двумя цифрами в виде «10». Тогда восьмеричное изображение любого целого числа будет

$$\begin{aligned} x &= \beta_{n-1} \cdot 8^{n-1} + \beta_{n-2} \cdot 8^{n-2} + \dots + \beta_1 \cdot 8^1 + \beta_0 \cdot 8^0 = \\ &= \beta_{n-1} \beta_{n-2} \dots \beta_1 \beta_0. \end{aligned} \quad (8.3)$$

где β_i — одна из цифр от 0 до 7.

Например, десятичное число 789 в восьмеричной системе изобразится так:

$$789 = 1 \cdot 8^3 + 4 \cdot 8^2 + 2 \cdot 8^1 + 5 \cdot 8^0 = 1425_8.$$

В современной машинной математике особое место заняла система записи чисел с основанием «два». Это связано с тем, что электромеханические и электронные элементы быстродействующих машин, как, например, обыкновенное реле, могут иметь только два устойчивых состояния: «включено» и «выключено». Если одно из таких состояний, например, «включено», обозначить единицей, а другое состояние нулем, то удобство изображения чисел в машине в двоичной системе станет понятным. Кроме этого, двоичная система счисления обладает рядом преимуществ при выполнении арифметических и логических операций и др.

В двоичной системе применяются только две цифры: 0 и 1. Таким образом, любое целое число представляется в виде:

$$\begin{aligned} x &= \gamma_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \gamma_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + \gamma_1 \cdot 2^1 + \gamma_0 \cdot 2^0 = \\ &= \gamma_{n-1} \gamma_{n-2} \dots \gamma_1 \gamma_0. \end{aligned} \quad (8.4)$$

где $\gamma_i = 0$, или 1.

Например, десятичное число 215 в двоичной системе будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} 215 &= 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = \\ &= 11010111_2. \end{aligned}$$

Таким образом, в позиционной системе счисления с основанием q используется q различных цифр, имеющих количественные значения целых чисел, начиная с нуля и кончая числом $q-1$. Любое

число записывается в виде последовательности цифр, в которых целая часть отделена от дробной части запятой и каждая цифра имеет значение в q раз большее, чем та же цифра на предыдущем месте.

Поэтому в системе счисления с основанием q произвольное число x записывается в виде

$$x = (\alpha_{n-1} \alpha_{n-2} \dots \alpha_1 \alpha_0, \alpha_{-1} \alpha_{-2} \dots \alpha_{-m})_q.$$

Здесь $\alpha_{n-1} \alpha_{n-2} \dots \alpha_1 \alpha_0$ — целая часть чисел, $\alpha_{-1} \alpha_{-2} \dots \alpha_{-m}$ — его дробная часть.

Развернутая запись этого числа имеет вид:

$$x = \alpha_{n-1} \cdot q^{n-1} + \alpha_{n-2} \cdot q^{n-2} + \dots + \alpha_1 \cdot q^1 + \alpha_0 \cdot q^0 + \alpha_{-1} \cdot q^{-1} + \dots + \alpha_{-m} \cdot q^{-m}, \quad (8.5)$$

или в сокращенной форме записи

$$x = \pm \sum_{i=1}^{l+r} \alpha_i \cdot q^{\pm i}, \quad (8.6)$$

где r — число разрядов;

l — заданное фиксированное число, определяющее положение запятой.

Переход от десятичной системы счисления к любой другой системе с основанием q осуществляется с помощью такого простого правила: надо произвести последовательные деления данного числа x и получающихся частных на q , полученные остатки, начиная с последнего, и будут «цифрами» при записи числа x в системе с основанием q . Так, например,

$$\begin{array}{r} 789 \quad | \quad 8 \\ \hline 5 \quad | \quad 98 \quad | \quad 8 \\ \hline 2 \quad | \quad 12 \quad | \quad 8 \\ \hline 4 \quad | \quad 1 \end{array}$$

Остатки 1, 4, 2, 5 и есть цифры, изображающие десятичное число 789 в восьмеричной системе, то есть $789_{10} = 1425_8$. Пользуясь этим правилом, нетрудно перевести запись любого целого числа из десятичной системы в двоичную. Ниже, в табл. 7 приведено соотношение нескольких первых чисел натурального ряда, записанных в десятичной, восьмеричной и двоичной системах.

Некоторое неудобство практического применения двоичной системы состоит в том, что для изображения даже небольших чисел нужны длинные выражения, а это приводит к увеличению числа разрядов. Поэтому при обычном ручном счете десятичная система счисления удобнее двоичной. Однако в электронных машинах существенно не число разрядов (элементов), а общее число устойчивых состояний всех элементов, необходимых для

Десятичная	Восьмеричная	Двоичная	Десятичная	Восьмеричная	Двоичная
0	0	000	10	12	1010
1	1	001	11	13	1011
2	2	010	12	14	1100
3	3	011	13	15	1101
4	4	100	14	16	1110
5	5	101	15	17	1111
6	6	110	16	20	10000
7	7	111	17	21	10001
8	10	1000	18	22	10010
9	11	1001	19	23	10011

изображения чисел. В этом отношении двоичная система значительно выгоднее десятичной.

Рассмотренный выше принцип перевода относился только лишь к целой части чисел. Для перевода дробной части числа в систему с основанием q необходимо произвести последовательное умножение дробных частей получающихся произведений на q . Тогда получающиеся целые части произведений и составляют изображение дробной части числа в системе с основанием q . Например, дана десятичная дробь 0,6875. Требуется найти ее двоичную запись:

0,	6875
	×2
1,	3750
	×2
0,	7500
	×2
1,	5000
	×2
1,	0000

Двоичная запись дроби имеет вид: 0,1011₂.

Если ту же десятичную дробь 0,6875 перевести в восьмеричную систему счисления

0,	6875
	×8
5,	5000
	×8
4,	0000,

получим восьмеричную запись: 0,54₈.

Таким образом, если имеем число, содержащее целую и дробную части, например 725, 9375, то перевод его в другую систему счисления, например в восьмеричную, осуществляется в два приема:

725	8				
5	90	8			
	2	11	8		
		3	1		

0,	9375	
	$\times 8$	
7,	5000	$\times 8$
4,	0000	

Восьмеричная запись числа имеет вид: $1325,74_8$.

Здесь мы рассматривали перевод чисел из системы с большим основанием в систему с меньшим основанием. Обратный перевод в систему с большим основанием удобнее производить нахождением суммы произведений коэффициентов на соответствующую степень меньшего основания ($8 \cdot 5$). Вычисления при этом производятся по правилам системы с большим основанием. Примеры: Перевести число 413_8 в десятичную систему:

$$413_8 = 4 \cdot 8^2 + 1 \cdot 8^1 + 3 \cdot 8^0 = 267_{10}.$$

Перевести в десятичную систему двоичную дробь $0,110101_2$:

$$\begin{aligned} 0,110101_2 &= 1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} + 0 \cdot 2^{-3} + 1 \cdot 2^{-4} + 0 \cdot 2^{-5} + 1 \cdot 2^{-6} = \\ &= 0,5 + 0,25 + 0 + 0,0625 + 0 + 0,015625 = 0,828125_{10}. \end{aligned}$$

Перевести в десятичную систему число $37,65_8$

$$\begin{aligned} 37,65_8 &= 3 \cdot 8^1 + 7 \cdot 8^0 + 6 \cdot 8^{-1} + 5 \cdot 8^{-2} = 24 + 7 + 0,75 + \\ &+ 0,078125 = 31,828125_{10}. \end{aligned}$$

Следует особо отметить то важное обстоятельство, что основание восьмеричной системы кратно целой степени основания двоичной системы: $8 = 2^3$. Эта взаимосвязь позволяет переводить числа из восьмеричной системы в двоичную и обратно простым способом, — путем записи каждой триады двоичных цифр в виде одной цифры восьмеричного числа (см. табл. 7).

$$\overline{\overline{100}}_4 \overline{\overline{001}}_1 \overline{\overline{011}}_3 = 413_8.$$

Наоборот, если восьмеричное число 126_8 нужно перевести в двоичную систему, то каждую цифру числа представляем соответствующей двоичной триадой:

$$\overline{\overline{1}}_{001} \overline{\overline{2}}_{010} \overline{\overline{6}}_{110} = 1010110,$$

(нули перед старшим разрядом опускаем)

Таким образом, для перевода чисел из десятичной системы в двоичную удобнее сначала перевести десятичную запись в восьмеричную, которая затем просто переводится в двоичную.

Восьмеричная система используется при программировании для записи номеров команд, адресов чисел, кодов операций, исходных данных и ряда других констант.

Такая запись удобна тем, что занимает меньше места, чем двоичная и, кроме того, наиболее близка к десятичной. При вводе исходного материала в машину с помощью клавишного устройства восьмеричная запись автоматически преобразуется в двоичную.

Для удобства ввода числового материала (особенно при вводе больших массивов чисел) часто используются вспомогательные приемы, основанные на принципе двоичного кодирования десятичных чисел. Наиболее широко применяется так называемая *десятично-двоичная система*. Ее особенность состоит в том, что каждая из десятичных цифр 0, 1, 2, . . . , 9 изображается в коде 8 4 2 1 набором (тетрадой) четырех двоичных цифр, как показано в таблице 8.

Таблица 8

	8	4	2	1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1

Например, число 2795_{10} в десятично-двоичной записи имеет вид:

$$\begin{array}{cccc} \underline{2} & \underline{7} & \underline{9} & \underline{5} \\ 0010011110010101_{10} & 0110 & 1001 & 0101 \end{array}$$

Система эта, очевидно, является избыточной, так как допускает кодирование десятичных чисел и другими сочетаниями двоичных цифр в рамках тех же четырех разрядов.

Переход от десятичного вида записи к десятично-двоичному производится автоматически с помощью обычного клавишного устройства, что облегчает ввод десятичных чисел в машину без предварительного перевода их в восьмеричную систему.

Однако десятично-двоичное изображение чисел не равнозначно двоичному. В этом нетрудно убедиться, переведя предыдущее число в двоичную систему:

$$2795_{10} = 101011101011_2$$

Дальнейший переход от десятично-двоичного вида к двоичному осуществляется в процессе работы машины по специальной программе перевода. Для вывода результатов из машины на печать обратным преобразованием осуществляется переход к двоично-десятичному виду, который уже техническим путем преобразуется в десятичную форму.

Схемы процессов ввода информации в машину показаны на рис. 95.

Возможны и другие варианты кодирования десятичных чисел. Так, например, в машине «Проминь» кроме рассмотренной системы используется представление десятичных цифр в коде 5 2 1 1 (см. таблицу 9), который также является избыточным. Широко известен международный телеграфный код № 2 и др.

Таблица 9

	5	2	1	1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	1	0	1
4	0	1	1	1
5	1	0	0	0
6	1	0	0	1
7	1	0	1	1
8	1	1	0	1
9	1	1	1	1

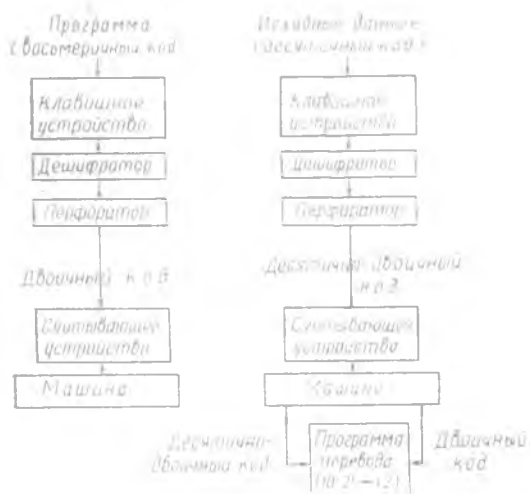


Рис. 95. Схемы процессов ввода информации в машину.

Что же касается способов представления и обработки информации в самой машине, то в большинстве случаев принята обыкновенная двоичная система счисления. Можно лишь отметить такие редкие исключения, как машину М-2, в которой используется шестнадцатеричная система, и машину «Сетунь», работающую в троичной системе счисления.

Литература: [1], [22], [25], [27].

§ 3. Арифметические операции в двоичной системе счисления

Одним из преимуществ двоичной системы счисления является простота выполнения арифметических действий. Сложение производится по следующим правилам:

0	+	0	=	0
0	+	1	=	1
1	+	0	=	1
1	+	1	=	10

(в последнем случае должен быть осуществлен перенос единицы в следующий — старший разряд суммы).

Пример 1. Сложение двух чисел.

Двоичная система

$$\begin{array}{r} + 110101 \\ + 101001 \\ \hline 1011110 \end{array}$$

Десятичная система

$$\begin{array}{r} + 53 \\ + 41 \\ \hline 94 \end{array}$$

$$(1011110)_2 = 94.$$

Вычитание производится по следующим правилам:

$\begin{array}{l} 0 - 0 = 0 \\ 1 - 0 = 1 \\ 1 - 1 = 0 \\ 10 - 1 = 1 \end{array}$
--

Пример 2. Вычитание двух чисел:

Двоичная система

$$\begin{array}{r} - 110101 \\ - 101001 \\ \hline 001100 \end{array}$$

Десятичная система

$$\begin{array}{r} - 53 \\ - 41 \\ \hline 12 \end{array}$$

$$(1100)_2 = 12.$$

Умножение производится по следующим правилам:

$\begin{array}{l} 0 \times 0 = 0 \\ 0 \times 1 = 0 \\ 1 \times 0 = 0 \\ 1 \times 1 = 1 \end{array}$

Как видно, по сравнению с громоздкой десятичной таблицей умножения, двоичная достаточно проста.

Числа умножаются по обычным правилам арифметики, причем процесс умножения осуществляется со сдвигом частных произведений как влево, так и вправо. В первом случае умножение начинается с младшей цифры множителя, во втором — со старшей.

Пример 3. Умножение двух чисел.

Десятичная система

$$\begin{array}{r} \times 10 \\ \times 13 \\ \hline 30 \\ + 10 \\ \hline 130 \end{array}$$

Двоичная система

Сдвиг влево

$$\begin{array}{r} \times 1010 \\ \times 1101 \\ \hline 1010 \\ + 0000 \\ 1010 \\ 1010 \\ \hline 1000010 \end{array}$$

Сдвиг вправо

$$\begin{array}{r} \times 1010 \\ \times 1101 \\ \hline 1010 \\ + 1010 \\ 0000 \\ 1010 \\ \hline 1000010 \end{array}$$

$$(10000010)_2 = 130.$$

Из этого примера легко заметить, что при умножении двоичных чисел частное произведение равно множимому (если в соответствующем разряде множителя стоит единица) или нулю (если соответствующий разряд множителя равен нулю). Поэтому умножение фактически состоит из последовательных сдвигов множимого и сложения частных произведений, получающихся в результате сдвигов.

В связи с тем, что в вычислительных машинах операции в большинстве случаев производятся над числами, по абсолютной величине меньшими 1, умножение технически осуществляется со сдвигом вправо, причем частные произведения, равные нулю, опускаются.

Например:

$$\begin{array}{r|l}
 \times 0,11001101 & \\
 0,11101001 & \\
 \hline
 01100110 & 1 \\
 00110011 & 01 \\
 + 00011001 & 101 \\
 00000110 & 01101 \\
 00000000 & 11001101 \\
 \hline
 0,10111010 & 10010101
 \end{array}$$

Округление: 0,10111011.

Операция деления ведется в два действия: умножение и вычитание.

Пример 4. Деление двух чисел.

Десятичная система

$$\begin{array}{r|l}
 210 & 15 \\
 - 15 & 14 \\
 \hline
 60 & \\
 - 60 & \\
 \hline
 00 &
 \end{array}$$

Двоичная система

$$\begin{array}{r|l}
 11010010 & 1111 \\
 - 1111000 & 1110 \\
 \hline
 1011010 & \\
 - 111100 & \\
 \hline
 011110 & \\
 - 11110 & \\
 \hline
 000000 &
 \end{array}$$

$$(1110)_2 = 14.$$

Таким образом, с помощью приведенных таблиц сложение, вычитание, умножение и деление двоичных чисел выполняется по тем же правилам, что и в обычной арифметике десятичных чисел.

Особенностью умножения и деления двоичных чисел является то обстоятельство, что эти операции сводятся к сложению (или вычитанию) и сдвигу чисел, благодаря чему значительно упрощается конструкция арифметического устройства вычислительных машин.

Литература: [1], [22], [25], [27].

§ 4. Машины с фиксированной и плавающей запятой. Нормальная форма представления чисел

Как промежуточные, так и окончательные результаты решения задачи на машине могут быть весьма различны по своей величине. Поэтому необходимо точно знать положение запятой, отделяющей целую часть числа от дробной. Возможны два подхода к решению этой задачи: либо отвести для запятой постоянное место, либо по мере надобности менять ее положение.

При первом способе представления чисел это соответствует тому, что в равенстве (8.6) число τ задано наперед и фиксировано. Существуют машины, для которых $\tau=0, 1, 2, 3, \dots$. Последнее и означает, что запятая занимает постоянное место, а число представляется в виде последовательности цифр, разделенных запятой на целую и дробную части.

Все числа, получающиеся в процессе счета, в машинах с фиксированной запятой должны быть всегда ограничены, то есть должны быть меньше некоторого постоянного для данной машины числа. Если получающиеся числа больше этого числа, то машина «теряет» старшие разряды таких чисел; происходит, как говорят, переполнение разрядной сетки. В результате искажается решение задачи. Поэтому в машинах с фиксированной запятой все величины, входящие в решаемую задачу, нужно заранее умножать на масштабные коэффициенты, то есть на множители, подобранные с таким расчетом, чтобы в процессе вычислений разрядная сетка не переполнялась.

Для облегчения подбора масштабных коэффициентов в большинстве машин запятая фиксирована перед первым цифровым разрядом ячейки памяти (рис. 96),



Рис. 96. Разрядная сетка машины с фиксированной запятой.

а нулевой разряд используется для обозначения знака числа по правилу: $+ = 0$; $- = 1$. При этом в ячейке могут быть записаны только правильные дроби. На рис. 97, а показана запись в такую ячейку положительного числа, а на рис. 97, б — отрицательного.

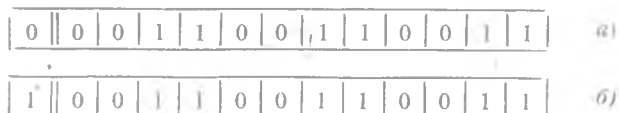


Рис. 97. Запись чисел в ячейках машины с фиксированной запятой.

Существенными недостатками всех машин с фиксированной запятой являются небольшой диапазон представления чисел и различная относительная погрешность представления чисел, зависящая от их величины. Чем меньше число, тем с большей относительной погрешностью изображается оно в машине. Покажем это на примере двух десятичных чисел разных порядков с ограниченным количеством разрядов, например, чисел 0,9816734 и 0,0000996. Нетрудно видеть, что если эти числа представляются шестью дробными разрядами, то есть в виде 0,981673 и 0,000100, то абсолютная погрешность представления исходных чисел будет примерно одинакова и равна $1 \cdot 10^{-6}$, а относительная погрешность представления первого числа равна примерно 10^{-6} , второго числа — примерно 10^{-2} .

Другим недостатком машин с фиксированной запятой является трудность подбора масштабных коэффициентов, связанная с предварительным определением границ изменения значений результатов при решении сложных математических задач. Не умея достаточно точно определить эти границы, часто выбирают завышенные масштабы, что ведет к снижению точности вычислений. Большим достоинством машин с фиксированной запятой является сравнительная простота их конструкции.

При втором способе представления чисел, когда запятая меняет свое место, τ меняется от числа к числу. Машины, где применяется этот способ, называются машинами с плавающей запятой. Все числа в таких машинах представляются в так называемой *нормальной форме*:

$$x = M_x \cdot q^{\pm p}, \quad (8.7)$$

где q — основание системы счисления;
 p — целое число, называемое порядком.

Величина M_x называется мантиссой числа x и для нее должны соблюдаться неравенства

$$q^{-1} \leq M_x < 1,0; \quad (8.8)$$

при этом условии число x называется *нормализованным*.

Разъясним запись (8.7) на примерах. В десятичной системе, когда $q=10$, нужно, чтобы $0,1 \leq M_x < 1,0$, то есть мантисса должна быть правильной дробью, имеющей после запятой одну из цифр 1, 2, . . . , 9.

Пример 1. Число $x=25,3798$ в нормальной форме и нормализованное будет $x=0,253798 \cdot 10^{+2}$.

Пример 2. Число $x=0,0031452$ в нормальной форме:

$$x = 0,31452 \cdot 10^{-2}.$$

В двоичной системе, когда $q=2$, нужно, чтобы $\frac{1}{2} \leq M_x < 1,0$.

Пример 3. Число $x=5 \frac{7}{8}$ в нормальной форме в двоичной системе будет $x=0,101111 \cdot 2^{+1}$. Здесь $p=11$ (двоичное 3).

Таким образом, знак и величина порядка $\pm p$ указывают действительное положение запятой.

Каждая ячейка памяти машины с плавающей запятой, кроме знакового и цифровых разрядов, имеет еще некоторое количество дополнительных разрядов, образующих указатель положения запятой (рис. 98).



Рис. 98. Разрядная сетка машины с плавающей запятой.

Знаки (мантиссы и порядка) по-прежнему изображаются в соответствии с правилом: $+ = 0$, $- = 1$.

Изображение в машине некоторых чисел с плавающей запятой приведено в таблице 10 (для мантиссы условно отведено 7 разрядов, для порядка — 4).

Таблица 10

Десятичная запись числа	Нормализованная форма числа в двоичной системе	Представление числа в машине				Условная форма записи числа
		знак мант.	мантисса	знак пор.	порядок	
+11,25	$+0,101101 \cdot 2^{+100}$	0	1011010	0	0100	$+101101+100$
-11,25	$-0,101101 \cdot 2^{+100}$	1	1011010	0	0100	$-101101+100$
+0,23046875	$+0,111011 \cdot 2^{-10}$	0	1110110	1	0010	$+111011-10$
-0,23046875	$-0,111011 \cdot 2^{-10}$	1	1110110	1	0010	$-111011-10$

Нормализация чисел может производиться при вводе чисел в машину, при выполнении арифметических действий и осуществляется с помощью особой операции, которая называется *сдвиг*. Сущность этой операции заключается в том, что все разряды мантиссы сдвигаются так, чтобы абсолютная величина ее попала внутрь интервала (8. 8). При этом, если сдвиг происходит вправо, то порядок увеличивается на столько единиц, на сколько разрядов произошел сдвиг мантиссы. При сдвиге влево величина порядка уменьшается на соответствующее число единиц.

Пример 4. Число записано в двоичной системе в нормальной форме, но не нормализовано:

$$x = 0,00101 \cdot 2^{110}.$$

Нормализуем его путем сдвига мантиисы влево на два разряда, порядок при этом уменьшается на две единицы ($-110-10 = -1000$). После нормализации будем иметь

$$x = 0,101 \cdot 2^{-1000}.$$

Арифметические операции в машинах с плавающей запятой выполняются в несколько приемов. Так, при сложении чисел сначала уравниваются порядки слагаемых, а затем складываются мантиисы. Порядком суммы является общий порядок слагаемых. Уравнивание порядков заключается в том, что меньший порядок числа увеличивается до большего и при этом соответственно изменяется мантииса, т. е. происходит денормализация числа. Полученная сумма (при необходимости) нормализуется.

Пример 5. Сложить два нормализованных числа.

$$x = +0,10110111 \cdot 2^{+101}$$

$$y = +0,10011001 \cdot 2^{+11}.$$

Увеличиваем порядок числа y на две единицы:

$$y = +0,0010011001 \cdot 2^{+101}.$$

Производим сложение:

$$\begin{array}{r|l} x = 0,10110111 & \\ + & \\ y = 0,00100110 & 01 \\ \hline 0,11011101 & 01 \end{array}$$

Если при денормализации младшие разряды выходят за пределы разрядной сетки, то они теряются.

Окончательно получаем:

$$x + y = +0,11011101 \cdot 2^{+101}.$$

Умножение чисел в машинах с плавающей запятой производится также в несколько приемов: определяется знак произведения; перемножаются мантиисы сомножителей; складываются порядки сомножителей; нормализуется результат (если необходимо).

Мантиисы перемножаются по обычным правилам.

Пример 6. Перемножить два нормализованных числа

$$x = +0,1011 \cdot 2^{+110}$$

$$y = +0,1001 \cdot 2^{+10}.$$

Получаем: $x \cdot y = +0,0110 \mid 0011 \cdot 2^{+100}$.

Нормализуем результат, и окончательно:

$$x \cdot y = +0,1100 \mid 011 \cdot 2^{+111}.$$

Младшие разряды при умножении также могут быть потеряны.

Диапазон представляемых чисел в машинах с плавающей запятой значительно шире, чем в машинах с фиксированной запятой. Кроме того, отпадает необходимость в подборе масштабных коэффициентов для исходных величин, что значительно облегчает программирование и расширяет круг решаемых задач.

Однако в машинах с плавающей запятой, так же как и с фиксированной запятой, возможно переполнение разрядной сетки, которое заключается теперь в том, что в результате какой-либо операции возникает число, имеющее порядок с большей разрядностью, чем допустимая при представлении порядка в машине. Возможно также появление *машинных нулей*, т. е. нормализованных чисел, имеющих порядок, меньший самого малого порядка, представляемого в машине; обычно машинные нули записываются в виде «нулевой» мантиссы и «нулевого» порядка.

Машины с плавающей запятой конструктивно более сложны и стоимость их выше.

Литература: [1], [22], [25], [27].

§ 5. Кодовое представление чисел

Осуществление в вычислительных машинах арифметических действий над отрицательными числами связано с рядом неудобств. Например, для выполнения операций сложения и вычитания потребовались бы два отдельных устройства, причем устройство вычитания имело бы довольно сложную конструкцию. Чтобы избежать этих затруднений, применяются *прямой, обратный и дополнительный* коды, позволяющие операцию прямого вычитания заменить обычным сложением.

Знак числа во всех кодах изображается нулем или единицей, причем знаковый разряд в машинах с фиксированной запятой можно рассматривать как разряд целой части. Если знаковую цифру и мантиссу рассматривать как единое число, то все положительные числа имеют вид $0, x_1 x_2 x_3 \dots x_n$ и лежат в интервале $0 \ll x < 1$, а отрицательные — имеют вид $1, x_1 x_2 x_3 \dots x_n$ и лежат в интервале $1 \ll x < 2$.

Такой прием позволяет отрицательному числу, находящемуся в интервале $-1 \ll x \ll 0$, поставить в соответствие положительное число $[x]$, взятое в интервале $1 \ll [x] \ll 1 + [x]$.

Изображение положительных чисел в прямом, обратном и дополнительном кодах совпадает и имеет вид обычного изображения двоичных чисел:

$$X = 0, x_1 x_2 x_3 \dots x_n, \quad (8.9)$$

то есть

$$[X]_{\text{пр}} = [X]_{\text{обр}} = [X]_{\text{доп}} = X. \quad (8.10)$$

Например:

$$[0,11011]_{\text{пр}} = [0,11011]_{\text{обр}} = [0,11011]_{\text{доп}} = 0,11011.$$

Здесь символом $[X]_{\text{пр}}$ обозначается прямой код числа X , символом $[X]_{\text{обр}}$ — обратный код и символом $[X]_{\text{дон}}$ — дополнительный код того же числа.

Основное отличие появляется при изображении отрицательных чисел.

Прямой код

Отрицательное число $X = -0, x_1 x_2 x_3 \dots x_n$ в прямом коде изображается в виде числа

$$[X]_{\text{пр}} = 1, x_1 x_2 x_3 \dots x_n. \quad (8.11)$$

Например, отрицательная двоичная дробь $-0,101011$ в прямом коде будет иметь вид $[-0,101011]_{\text{пр}} = 1,101011$.

Таким образом, прямой код двоичного числа совпадает по изображению с записью самого числа, но в разряде знака стоит 0 или 1 соответственно для положительных или отрицательных чисел.

Нуль в прямом коде имеет два изображения. Изображение «положительного» нуля

$$[+0]_{\text{пр}} = 0,0000 \dots 0, \quad (8.12)$$

изображение «отрицательного» нуля

$$[-0]_{\text{пр}} = 1,0000 \dots 0. \quad (8.13)$$

Обратный код

Чтобы записать отрицательное число в обратном коде, необходимо в знаковом разряде поставить единицу, а в мантиссе нули заменить единицами, а единицы — нулями.

Таким образом, если имеем отрицательное число

$$X = -0, x_1 x_2 x_3 \dots x_n,$$

то его изображение в обратном коде будет

$$[X]_{\text{обр}} = 1, \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \dots \bar{x}_n, \quad (8.14)$$

где \bar{x}_i есть инвертированное x_i . Например:

$$X = -0,101011; [X]_{\text{обр}} = 1,010100.$$

Нуль в обратном коде, как и в прямом, имеет два изображения. «Положительный» нуль имеет вид

$$[+0]_{\text{обр}} = 0,0000 \dots 0, \quad (8.15)$$

«отрицательный» нуль

$$[-0]_{\text{обр}} = 1,1111 \dots 1. \quad (8.16)$$

При сложении двух чисел, выраженных в обратном коде, для получения обратного кода суммы необходимо поступить с ними

как с обычными числами, включая и знаковый разряд. В случае возникновения единицы переноса в знаковом разряде, ее необходимо прибавить к младшему разряду. Такая операция называется *циклическим переносом* и возникает тогда, когда арифметическая сумма обратных кодов чисел X и Y удовлетворяет неравенству

$$\{X\}_{обр} + \{Y\}_{обр} \geq 10.$$

Если арифметическая сумма обратных кодов меньше, чем 10 (два), то «циклическое» сложение совпадает с арифметическим. Покажем, что при циклическом сложении «сумма» обратных кодов двух правильных дробей равна обратному коду их алгебраической суммы.

Предположим, что слагаемые X и Y и их алгебраическая сумма $X+Y$ являются правильными дробями, то есть $X < 1$, $Y < 1$, $X+Y < 1$, и что каждое слагаемое изображается равным количеством разрядов n .

Рассмотрим четыре возможных случая.

Случай 1. Слагаемые являются величинами положительными, то есть $X > 0$ и $Y > 0$. В этом случае сумма также будет положительной и

$$\{X\}_{обр} + \{Y\}_{обр} = X + Y = \{X + Y\}_{обр}.$$

Например:

$$X = 0,001001 (0,140625);$$

$$Y = 0,101101 (0,703125);$$

$$\{X\}_{обр} = X \quad \{Y\}_{обр} = Y$$

$$\begin{array}{r} 0,001001 \\ + 0,101101 \\ \hline 0,110110 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 0,140625 \\ + 0,703125 \\ \hline 0,843750 \end{array}$$

0,110110 — обратный код положительной суммы 0,110110 (0,843750).

Случай 2. Слагаемые являются числами разных знаков, а их сумма $X+Y > 0$.

Например:

$$X = -0,001001 (-0,140625);$$

$$Y = 0,110001 (0,765625);$$

$$\{X\}_{обр} = 1,110110; \quad \{Y\}_{обр} = 0,110001;$$

$$\begin{array}{r} 1,110110 \\ + 0,110001 \\ \hline 10,100111 \\ \hline 0,101000 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 0,140625 \\ - 0,765625 \\ \hline 0,625000 \end{array}$$

↑ — циклический перенос

В этом случае возникает циклический перенос из знакового разряда числа и результат 0,101000 представляет обратный код положительной суммы 0,101000 — (0,625).

Случай 3. Пусть слагаемые $X < 0$ и $Y > 0$, но сумма этих чисел $X + Y < 0$.

Например:

$$X = -0,011001 (-0,390625);$$

$$Y = 0,010011 (0,296875);$$

$$[X]_{\text{обр}} = 1,100110; [Y]_{\text{обр}} = 0,010011;$$

$$\begin{array}{r} 1,100110 \\ + 0,010011 \\ \hline 1,111001 \end{array} \qquad \begin{array}{r} -0,390625 \\ + 0,296875 \\ \hline -0,093750 \end{array}$$

Циклического переноса не происходит, а 1,111001 — обратный код отрицательной суммы $-0,000110 (-0,093750)$.

Случай 4. Пусть слагаемые, а следовательно, и их сумма являются числами отрицательными, то есть $X < 0$, $Y < 0$ и $X + Y < 0$.
Например:

$$X = -0,010101 (-0,328125);$$

$$Y = -0,001001 (-0,140625);$$

$$[X]_{\text{обр}} = 1,101010; [Y]_{\text{обр}} = 1,110110;$$

$$\begin{array}{r} 1,101010 \\ + 1,110110 \\ \hline 11,100000 \\ \hline 1,100001 \end{array} \qquad \begin{array}{r} -0,328125 \\ -0,140625 \\ \hline -0,468750 \end{array}$$

↑ — циклический перенос

1,100001 — обратный код отрицательной суммы $-0,011110 (-0,468750)$.

Обратный код разности чисел $X - Y$ в силу тождества $X - Y = X + (-Y)$ можно получить путем циклического сложения величин $[X]_{\text{обр}}$ и $[-Y]_{\text{обр}}$. Действительно,

$$[X]_{\text{обр}} + [(-Y)]_{\text{обр}} = [X + (-Y)]_{\text{обр}} = [X - Y]_{\text{обр}}.$$

Сложение обратных кодов чисел с циклическим переносом из знакового разряда в младший разряд осуществляется в сумматоре арифметического устройства машины.

В рассмотренных выше примерах сложения обратных кодов чисел суммы их являлись правильными дробями. Однако могут быть случаи, когда сумма двух правильных дробей по абсолютной величине может превысить единицу или быть ей равной. Так например, сумма двух чисел $X = 0,101010$ и $Y = 0,110001$ является числом положительным и равна 1,011011, то есть больше единицы. Сумма обратных кодов этих чисел

$$[X]_{\text{обр}} + [Y]_{\text{обр}} = [X + Y]_{\text{обр}} = 0,101010 + 0,110001 = 1,011011$$

представляет собой обратный код отрицательного числа $-0,100100$. Это несоответствие между суммой и ее изображением в обратном коде получилось в результате того, что целая часть суммы оказалась в знаковом разряде кода; это явление называют переполнением разрядной сетки (сумматора).

Переполнение разрядной сетки, ведущее к искажению результата операции, недопустимо при решении задач на машине. Для того, чтобы уловить момент переполнения разрядной сетки сумматора, в вычислительной машине «Урал» арифметические операции над числами выполняются в модифицированном обратном коде. В этом коде изображения правильных и неправильных дробей могут быть отличны друг от друга. Признак переполнения разрядной сетки используется для выработки специального сигнала, управляющего работой машины. По этому сигналу, в частности, может произойти остановка машины.

Модификация обратного кода для изображения чисел в машине «Урал» заключается в том, что под знак числа отводится не первый разряд перед запятой, а второй (более старший); первый же разряд отводится под целую часть числа (рис. 99).

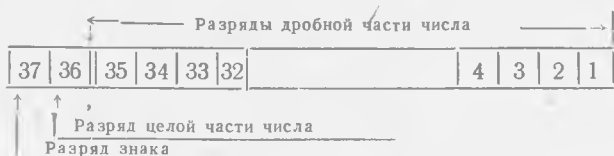


Рис. 99. Разрядная сетка машины «Урал-1».

Таким образом, двоичное число X , абсолютная величина которого $X = x_0, x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ (здесь x_0 — разряд целой части числа), в модифицированном обратном коде будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} [X]_{\text{обр}}^* &= 0 x_0, x_1 x_2 x_3 \dots x_n, \text{ если } X \geq 0, \\ \text{или} \\ [X]_{\text{обр}}^* &= \bar{1} x_0, \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \dots \bar{x}_n, \text{ если } X \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (8.17)$$

Из выражений (8.17) вытекает, что для случая, когда $1 \leq X < 2$ в двух старших разрядах кода, называемых *знаковыми*, будут стоять различные цифры: 01, если $X \geq +1$, или 10, если $X \leq -1$, а для правильных дробей соответственно 00 или 11.

В таблице 11 в качестве примера дано изображение некоторых чисел в модифицированном обратном коде с двумя знаковыми разрядами.

Таблица 11

Десятичная запись числа	Двоичная запись числа	Представление числа в машине		Набор цифр, представляющих число в машине
		знак	дробная часть	
+0,203125	+0,001101	00	001101000	000011010000
-0,203125	-0,001101	11	110010111	111100101111
+0	+0	00	000000000	000000000000
-0	-0	11	111111111	111111111111
+1,6875	+1,1011	01	101100000	011011000000
-1,6875	-1,1011	10	010011111	100100111111

Арифметические операции в модифицированном обратном коде аналогичны операциям, приведенным выше для простого обратного кода, и для наглядности иллюстрируются следующими примерами.

Пример 1. $X=0,1101110$; $Y=-0,001010$;

$$[X]_{\text{обр}}^M = 00,110110; \quad [Y]_{\text{обр}}^M = 11,110101;$$

$$\begin{array}{r} 00,110110 \\ + 11,110101 \\ \hline 100,101011 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{—циклический} \\ \text{перенос} \end{array}$$

$$[X + Y]_{\text{обр}}^M = 00,101100$$

Пример 2. $X = -0,101101$; $Y = -0,110001$;

$$[X]_{\text{обр}}^M = 11,010010; \quad [Y]_{\text{обр}}^M = 11,001110;$$

$$\begin{array}{r} 11,010010 \\ + 11,001110 \\ \hline 110,100000 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{—циклический} \\ \text{перенос} \end{array}$$

$$[X + Y]_{\text{обр}}^M = 10,100001.$$

В последнем примере различные цифры в целой части кода суммы свидетельствуют о переполнении разрядной сетки неправильной дробью.

Дополнительный код

Для того, чтобы получить дополнительный код отрицательного числа, необходимо в знаковом разряде поставить единицу, во всех разрядах мантиссы нули заменить единицами, а единицы — нулями и затем к младшему разряду прибавить единицу.

Таким образом, дополнительный код отрицательного числа

$$X = -0, x_1 x_2 x_3 \dots x_n, \text{ будет}$$

$$[x]_{\text{доп}} = 1, \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \dots \bar{x}_n + 0,000 \dots 1, \quad (8.18)$$

где \bar{x}_i есть инвертированное x_i .

Например,

$$X = -0,110111; \quad [X]_{\text{доп}} = 1,001000 + 0,000001 = 1,001001.$$

Нетрудно убедиться в том, что дополнительный код отрицательного двоичного числа есть дополнение этого числа до двух, т. е.

$$[X]_{\text{доп}} = 10 + X,$$

где 10 означает два в двоичной системе счисления.

В случае, если в машине нет разрядов левее знакового, дополнительный код нуля будет представлен нулем

$$[+0]_{\text{доп}} = [-0]_{\text{доп}} = 0. \quad (8.19)$$

При суммировании дополнительных кодов по соответствующим правилам в машине получают дополнительный код суммы.

Рассмотрим несколько случаев.

Случай 1. Одно из слагаемых положительно $X > 0$, другое отрицательно $Y < 0$ и меньше первого, следовательно, сумма их положительна $X + Y > 0$.

Например:

$$X = +0,101001; \quad [X]_{\text{доп}} = 0,101001;$$

$$Y = -0,001101; \quad [Y]_{\text{доп}} = 1,110011;$$

$$\begin{array}{r} 0,101001 \\ + 1,110011 \\ \hline 10,011100 \\ \leftarrow 1 \end{array}$$

Единица переноса, получившаяся в разряде целых чисел после сложения в дополнительном коде, отбрасывается, после чего получаем

$$[X]_{\text{доп}} + [Y]_{\text{доп}} = 0,011100 = X + (-Y).$$

Случай 2. Одно из слагаемых положительно $X > 0$, другое отрицательно $Y < 0$, но сумма отрицательна $X + Y < 0$.

Например:

$$X = +0,001101; \quad [X]_{\text{доп}} = 0,001101;$$

$$Y = -0,101001; \quad [Y]_{\text{доп}} = 1,010111;$$

$$\begin{array}{r} 0,001101 \\ + 1,010111 \\ \hline 1,100100 \end{array}$$

Как видно из примера, сумма, полученная от сложения дополнительных кодов, является и в этом случае изображением в дополнительном коде действительной суммы чисел $X + (-Y)$.

Наибольшее применение в машинах получили прямой и обратный коды. Дополнительный код иногда используется в машинах с плавающей запятой для выполнения арифметических операций над порядками чисел.

Умножение чисел как в машинах с плавающей запятой, так и в машинах с фиксированной запятой производится в прямом коде. Сначала складываются нулевые разряды (знаки чисел), при этом перенос, если он возникает, теряется. Затем осуществляется перемножение самих чисел путем последовательных сдвигов одного из сомножителей на количество разрядов, определяемое цифрами второго сомножителя, и сложения между собой получающихся результатов.

Деление чисел в машинах осуществляется путем вычитания из делимого делителя, сдвига влево полученного остатка, нового вычитания (из результата сдвига) делителя и т. д. Таким образом, деление в машине производится примерно так же, как и вручную.

Литература: [22], [25], [27].

§ 6. Элементы математической логики

Возможности вычислительных устройств и машин значительно расширились при использовании элементов и схем, выполняющих различные логические операции. Сейчас логические схемы являются основой при построении вычислительных машин, автоматов и др. Знание элементов математической логики является необходимым как при изучении машин, так и для работы в области программирования задач.

Логика в общем смысле — это наука о формах и законах мышления, а математическая логика — это наука о применении математических методов для решения различных логических задач. В цифровых вычислительных машинах используется, главным образом, начальный раздел математической логики — *исчисление высказываний*, или *алгебра логики*, основы которой были разработаны во второй половине прошлого столетия.

Под высказыванием понимается любое утверждение, о котором можно сказать, что оно является либо истинным, либо ложным, например: снег белый, камень мягкий, сегодня двадцатое число. При этом предполагается, что высказываний одновременно истинных и ложных не существует.

Вследствие того, что любое высказывание может иметь только одно из двух значений, истинное значение приравнивают единице, а ложное — нулю.

Это обстоятельство позволяет применять двоичную систему счисления для подсчета значений истинности различных высказываний и является весьма ценным для применения в вычислительной технике.

Аппарат математической логики в применении к теории электронных цифровых машин позволяет решать задачи анализа и синтеза схем.

В первом случае для имеющейся готовой схемы составляется соответствующее логическое выражение, анализ и преобразование которого позволяет выяснить, нельзя ли получить более рациональную схему, содержащую меньшее количество элементов.

Во втором случае по логическому выражению, описывающему некоторую заданную функцию, определяют, из каких элементарных схем и каким образом должна быть построена сложная схема, реализующая заданную функцию.

При рассмотрении наиболее часто встречающихся логических связей простые высказывания будем обозначать начальными буквами латинского алфавита (*A*, *B*, *C*, *D*), а сложные — конечными

(P, Q, R, S). При этом, например, запись $A = 1$ будет означать, что высказывание A истинно, а запись $B = 0$ будет означать, что высказывание B ложно.

1. **Отрицание** (логическая связь HE). Эта связь означает отрицание исходного высказывания и обозначается символом \bar{A} . Читается «не A ». Воспроизводит следующие соотношения:

$\bar{0} = 1;$	$\bar{1} = 0$
----------------	---------------

Из этой таблицы видно, что если $A=1$, то $\bar{A}=0$. Операция отрицания может быть интерпретирована работой нормально замкнутого реле (рис. 110). При отсутствии тока в катушке контакты реле замкнуты и в цепи есть сигнал. При подаче тока в катушку контакты реле размыкаются, сигнал в цепи исчезает.



Рис. 100. Условное представление логического отрицания.

2. **Логическое умножение** (логическая связь $И$). Эта операция называется также конъюнкцией и условно обозначается:

$$P = A \cdot B$$

или

$$P = A \wedge B.$$

Читается: « P есть A и B ». Правила логического умножения приведены в следующей таблице:

$0 \cdot 0 = 0$
$0 \cdot 1 = 0$
$1 \cdot 0 = 0$
$1 \cdot 1 = 1$

При выполнении логического умножения результирующее высказывание P равно единице только в том случае, когда A и B равны 1, то есть когда истины оба составляющие высказывания. Во всех остальных случаях P равно нулю.

Конъюнкции $АВ$ соответствует последовательное соединение двух нормально разомкнутых реле (рис. 101).

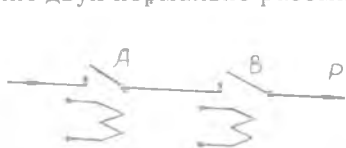


Рис. 101. Условное представление логического умножения.

В этом случае, если либо A , либо B равно нулю (ложно), цепь разомкнута. Если же и A и B истинны, цепь замкнута ($P=1$).

Логическое умножение в отличие от обыкновенного выполняется поразрядно и часто применяется для выделения части данного кода. При этом достаточно логически умножить двоичный код исходного числа на константу, содержащую единицы в тех разрядах, которые нужно выделить, то есть сохранить в коде результата.

Например:

$$\begin{array}{r} 100101101001 \text{ — исходный код} \\ \wedge 000011110000 \text{ — константа} \\ \hline 000001100000 \text{ — результат.} \end{array}$$

3. **Логическое сложение** (логическая связь ИЛИ). Эта операция называется дизъюнкцией и условно обозначается:

$$P = A + B,$$

или специальным символом:

$$P = A \vee B.$$

Читается: « P есть A или B ». Правила логического сложения приведены в следующей таблице:

0 + 0 = 0
0 + 1 = 1
1 + 0 = 1
1 + 1 = 1

Из таблицы видно, что P равно 1, когда A или B равно 1. При этом здесь не исключается возможность и того, что P — истинно, когда истинны оба высказывания, и A и B . Иначе говоря, связь ИЛИ употребляется в разрешающем смысле.

Дизъюнкции $A \vee B$ соответствует параллельное соединение двух нормально разомкнутых реле (рис. 102).

Здесь цепь тока замкнута ($P=1$), когда замкнут один контакт ($A=1$) или другой ($B=1$). Цепь тока замкнута и в случае одновременного замыкания обоих контактов.

Логическое сложение можно применить для формирования кодов чисел, в частности, для приформирования к кодам единицы в любом разряде.

Например:

$$\begin{array}{r} 110100001011 \text{ — исходный код} \\ \vee 000001100000 \\ \hline 110101101011 \text{ — сформированный код.} \end{array}$$

4. **Равнозначность двух высказываний.** Эта связь обозначается $A \sim B$. Читается: « A равнозначно B ». Равнозначность двух высказываний представляет собой сложное высказывание P , которое истинно только тогда, когда истинны составляющие высказывания A и B (см. следующую таблицу).

0 ~ 0 = 1
0 ~ 1 = 0
1 ~ 0 = 0
1 ~ 1 = 1

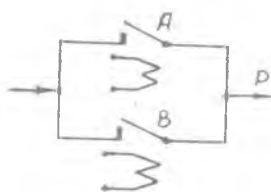


Рис. 102. Условное представление логического сложения.

5. Отрицание равнозначности двух высказываний. Эта логическая связь получается с помощью операций отрицания и равнозначности и может быть записана как $A \approx B$, однако для удобства вводится специальный знак для изображения отрицания равнозначности \approx . При этом $P = A \approx B$ читается: «*A* *неравнозначно* *B*».

Отрицание равнозначности, в противоположность предыдущему случаю, истинно только тогда, когда составляющие его простые высказывания имеют противоположные значения истинности (см. таблицу).

0	\approx	0	=	0
0	\approx	1	=	1
1	\approx	0	=	1
1	\approx	1	=	0

Операция отрицания равнозначности выполняется по существу как операция поразрядного сложения, то есть без переноса единицы в старший разряд и широко используется в электронных цифровых машинах для сравнения кодов чисел.

Например:

$$\begin{array}{r} 101101110 \\ 101101110 \\ \hline 000000000 \end{array} \quad \text{и} \quad \begin{array}{r} 101101110 \\ 101001010 \\ \hline 000100100 \end{array}$$

— числа равны — числа не равны

Нетрудно убедиться, что нулевой результат будет только в случае равенства во всех разрядах двух сравниваемых кодов чисел.

Основные законы алгебры логики. Логические операции так же, как и арифметические действия, подчиняются определенным законам, к числу которых относятся переместительный, сочетательный, распределительный и закон инверсии.

1. **Переместительный закон:**
 для сложения $A + B = B + A$ (8.20)
 для умножения $A \cdot B = B \cdot A$. (8.21)
2. **Сочетательный закон:**
 для сложения $(A + B) + C = A + (B + C)$; (8.22)
 для умножения $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$. (8.23)
3. **Распределительный закон:**
 для сложения $(A + B) \cdot C = A \cdot C + B \cdot C$; (8.24)
 для умножения $A \cdot (B + C) = (A \cdot B) + (A \cdot C)$ (8.25)
4. **Закон инверсии:**
 для сложения $\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$; (8.26)
 для умножения $\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$. (8.27)

Законы переместительный и сочетательный, а также распределительный для сложения встречаются в обычной алгебре.

Распределительный закон для умножения и закон инверсии специфичны для логической алгебры. Справедливость этих законов можно доказать с помощью приведенных выше таблиц основных операций.

Для операций равнозначности и отрицания равнозначности используются следующие соотношения.

$$A \sim B = (A + \bar{B}) \cdot (\bar{A} + B); \quad (8.28)$$

$$A \approx B = A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B. \quad (8.29)$$

При решении различных логических задач могут образовываться весьма сложные зависимости. Если строить схемы непосредственно по таким зависимостям, то они будут чрезвычайно громоздкими. Однако во многих случаях, используя основные законы алгебры логики и вытекающие из них следствия, можно существенно упростить сложные логические зависимости. Принципиально любое сложное высказывание может быть построено из трех основных логических связей: НЕ, И и ИЛИ.

Упрощение сложных логических зависимостей приводит к уменьшению числа логических элементов и, следовательно, к упрощению всей логической схемы.

В качестве примера рассмотрим работу автомата для продажи товара стоимостью 50 коп. Эту сумму нужно опустить в автомат, пользуясь монетами достоинством в 10 коп., 15 коп. или 20 коп. Это можно осуществить следующими способами: опустить 5 монет по 10 копеек, или 3 монеты по 10 коп. и 1 монету в 20 коп., или 2 монеты по 10 коп. и 2 — по 15 коп., или 1 монету в 10 коп. и 2 — по 20 коп., или 2 — по 15 коп. и 1 — в 20 коп.

Высказывания: «опущено 10 коп.» обозначим буквой А, «опущено 15 коп.» — буквой В, «опущено 20 коп.» — буквой С.

Повторное опускание монеты того же достоинства обозначим той же буквой с соответствующим индексом, например, если опущена в 3-й раз монета в 10 коп., то это событие обозначим через А₃.

Тогда для того, чтобы автомат сработал, должно быть истинным выражение: $(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5) + (A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot C_1) + (A_1 \cdot A_2 \cdot B_1 \cdot B_2) + (A_1 \cdot C_1 \cdot C_2) + (B_1 \cdot B_2 \cdot C_1) = P$.

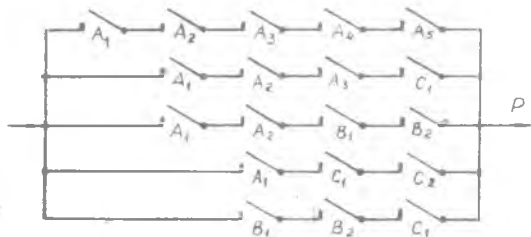


Рис. 103. Электрическая цепь логического автомата.

Приведенному выражению соответствует электрическая цепь (рис. 103). Для простоты катушки реле не изображены. Теперь упростим выражение, используя приведенные ранее формулы. Применяем для первой и второй скобок распределительный закон, а для третьей и четвертой скобок — переместительный закон. Получаем:

$$(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3) \cdot [(A_4 \cdot A_5) + C_1] + (A_1 \cdot C_1 \cdot C_2) + (A_1 \cdot A_2 \cdot B_1 \cdot B_2) + (B_1 \cdot B_2 \cdot C_1) = P.$$

Теперь для двух последних скобок можно опять применить распределительный закон, получим:

$$(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3) \cdot [(A_4 \cdot A_5) + C_1] + (A_1 \cdot C_1 \cdot C_2) + (B_1 \cdot B_2) \cdot [(A_1 \cdot A_2) + C_1] \sim \\ \sim A_1 \cdot \{A_2 \cdot A_3 \cdot [(A_4 \cdot A_5) + C_1] + (C_1 \cdot C_2)\} + (B_1 \cdot B_2) \cdot [(A_1 \cdot A_2) + C_1] = P.$$

Этому выражению соответствует цепь, изображенная на рис. 104. Если для первой схемы нужно было 19 реле, то для второй — 13.

Нужно отметить, что все реле, помеченные одной и той же буквой с одинаковым индексом, например C_1 , включаются одновременно.

Пусть опущены 2 монеты по 10 коп. и 2 — по 15 коп., тогда реле A_1, A_2, B_1, B_2 в соответствующих местах замкнут цепь и автомат работает.

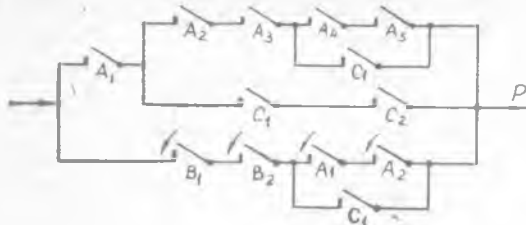


Рис. 104. Упрощенная цепь логического автомата.

Исследование сложных логических задач и вопросов осуществляется также путем составления системы соответствующих логических уравнений и решения этой системы на основе применения законов алгебры логики.

Литература: [6], [22], [25], [27].

Глава IX. ОСНОВНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭВМ

§ 1. Переключательные и логические элементы электронных схем

В цифровой вычислительной технике используется сравнительно небольшое число типовых элементов, из которых может быть построена любая цифровая машина.

Переключательные элементы

Одним из основных элементов при построении счетных схем электронных цифровых машин является электронное реле или триггер.

Простейший триггер (рис. 105) представляет собой спусковое устройство с двумя состояниями устойчивого равновесия. Если одно устойчивое состояние триггера считать соответствующим нулю (низкий уровень напряжения на выходе), а другое — единице

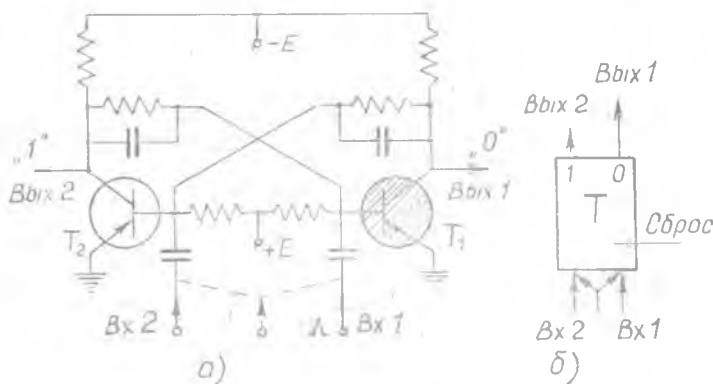


Рис. 105. Схема триггера на транзисторах.

(высокий уровень напряжения), то каждый разряд двоичного числа может быть представлен в машине соответствующим триггером. Для переключения триггера из одного устойчивого состояния в другое нужно на соответствующий вход схемы подать положительный запускающий импульс. Для периодической работы триггера можно подавать запускающие импульсы на объединенный вход схемы.

Быстродействие триггера оценивается разрешающим временем, под которым понимается минимальный временной интервал между двумя запускающими импульсами, вызывающими переключение триггера. Быстродействие современных триггерных схем достигает 100 мкс.

Статические триггерные схемы могут быть построены на двойных триодах, транзисторах и других элементах и выполняться в виде модульных или микромодульных конструкций.

Практически из триггерных схем собираются самые разнообразные счетные, регистрирующие, суммирующие и другие устройства цифровых вычислительных машин. Так, например, для изображения двоичного числа, представляемого в машине, надо иметь столько триггеров, сколько разрядов в числе, и установить каждый триггер в состояние «0» или «1» в зависимости от значения соответствующего разряда. Такая схема из нескольких триггеров, используемая для хранения (фиксации) двоичного числа, называется *триггерным регистром* (рис. 106).

Широко применяются и более сложные триггерные сдвигающие регистры, с помощью которых осуществляется сдвиг чисел при умножении, делении и нормализации, триггерные счетчики импульсов, триггерные накапливающие сумматоры, выполняющие в машинах основные арифметические операции и др.

В последнее время в электронных вычислительных машинах находят применение так называемые «динамические» триггеры, в которых состояния схемы (0 или 1) определяются отсутствием или наличием колебаний (импульсов) на выходе схемы. Достоинством таких триггеров является весьма высокое быстродействие, что позволяет существенно повысить скорость работы вычислительных машин.

Основные логические элементы

Логические элементы служат для преобразования поступающей в них двоичной информации по законам алгебры логики и

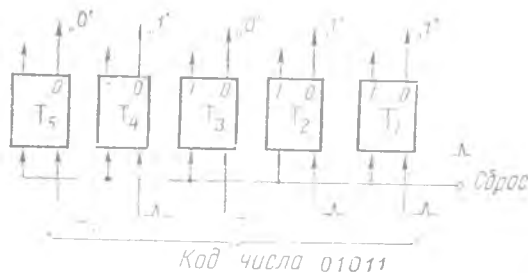


Рис. 106. Триггерный регистр.

представляют собой элементарные схемы, реализующие операции НЕ, И, ИЛИ и др.

Конструктивно такие схемы могут строиться на полупроводниковых приборах, электронных лампах, феррит-диодных и феррит-транзисторных элементах и т. п.

Сигналами на входе и выходе могут быть потенциалы или импульсы, что также определяет принцип построения той или иной схемы.

Рассмотрим, как работают некоторые логические схемы:

1. **Схема инвертора**, служащая для реализации логической операции НЕ, приведена на рис. 107, а. Схема построена на транзисторе. Принцип работы схемы поясняется рис. 107, б.

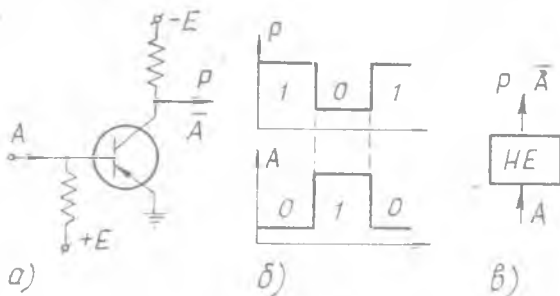


Рис. 107. Инвертор. а — схема; б — диаграмма работы; в — условное обозначение.

2. **Схема совпадения** реализует логическую операцию И (по правилам логического умножения). Она представляет собой многополюсник, в общем случае с n входами и одним выходом. Схема, приведенная на рис. 108, а собрана на диодах. Сигнал на вы-

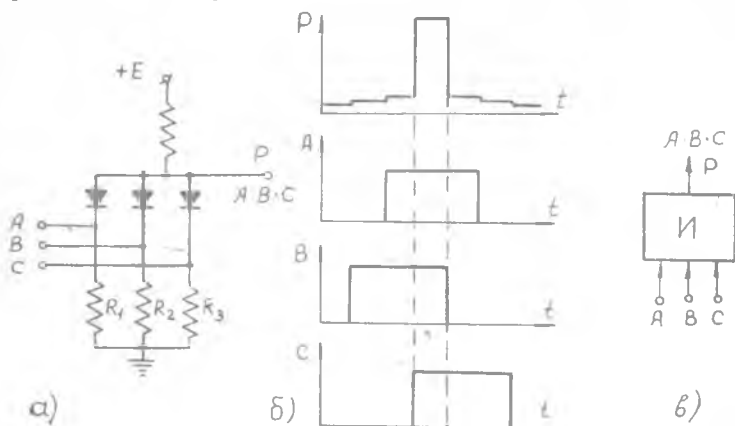


Рис. 108. Схема совпадения на диодах (а); диаграмма работы (б); условное обозначение (в).

ходе схемы P появляется только тогда, когда имеются сигналы высокого положительного уровня на всех входах одновременно. В этом случае все диоды заперты и на сопротивлении падения напряжения не происходит. Сигнал на выходе P будет равен $+E$ (при бесконечно большом сопротивлении нагрузки).

В тех случаях, когда один входной сигнал задается уровнем напряжения, а другой — импульсом или когда оба входных сигнала — импульсы, часто употребляется разновидность схемы совпадения, называемая клапаном или вентилем (рис. 109).

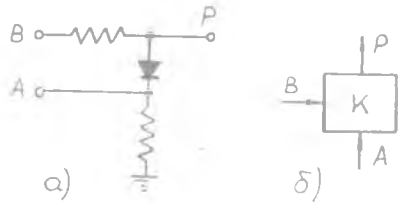


Рис. 109. Клапан. а — схема; б — условное обозначение.

Если на вход B подается высокий уровень напряжения, то сигнал высокого уровня на выходе P будет лишь в том случае, когда ко входу A будет приложен положительный импульс. Таким образом, клапан является разрешающей схемой по одному входу.

3. Собирательная схема, реализующая логическую операцию

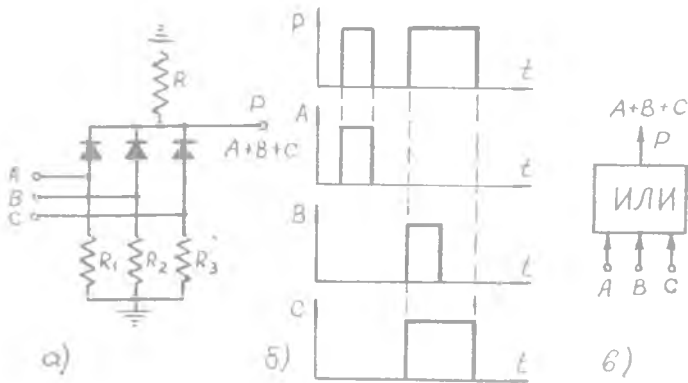


Рис. 110. Собирательная схема на диодах (а); диаграмма работы (б); условное обозначение (в).

ИЛИ (по правилам логического сложения), приведена на рис. 110. Эта схема, выполненная на диодах, имеет несколько входов и один выход. Сигнал высокого уровня на выходе P появляется в том случае, если имеется сигнал хотя бы на одном вхо-



Рис. 111. Усилитель.

де. Таким образом, схема как бы «собирает» несколько входных сигналов в один.

4. **Усилитель.** Схема усилителя представляет собой чаще всего двухкаскадный инвертор и реализует логическую операцию ДА. Схема имеет выходы от обоих каскадов, то есть P и \overline{P} (рис. 111).

Литература: [6], [9], [22], [25], [27].

Комбинированные логические схемы

Более сложные логические преобразования в вычислительных и управляющих устройствах выполняются схемами, составленными из рассмотренных выше основных логических элементов.

1. **Схема сравнения** (поразрядного сложения) применяется при сравнении двух величин A и B ; она дает на выходе P сигнал, равный нулю при равенстве $A=B$, т. е. при $A=B=0$ и $A=B=1$.

Здесь выполняется сложная логическая операция $A \cdot \overline{B} + \overline{A} \cdot B$.

Схема (рис. 112) имеет четыре входа, из которых на два поданы инверсные значения входных величин (\overline{A} и \overline{B}); состоит она из двух схем И для образования величин $A \cdot \overline{B}$ и $\overline{A} \cdot B$ и схемы ИЛИ для получения выходной величины.

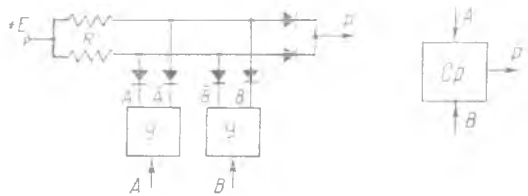


Рис. 112. Схема сравнения.

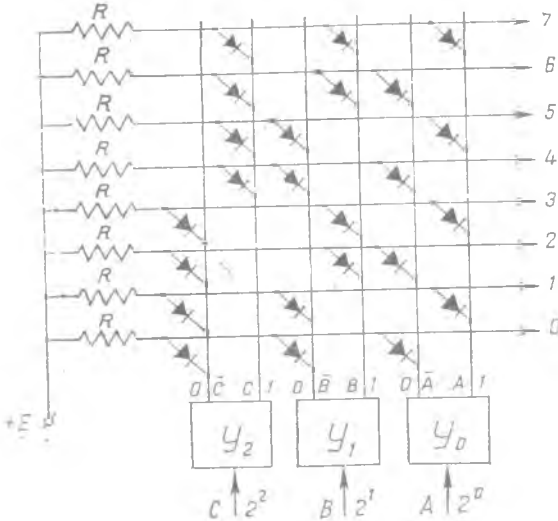


Рис. 113. Избирательная схема.

2. **Избирательная схема.** На рис. 113 приведена избирательная схема на три входа, которая работает таким образом, что каждой комбинации положительных сигналов, поданных на входы A , B и C , соответствует только одна комбинация сигналов на выходах $0, 1, 2, \dots, 7$.

Диодная сетка, представленная на рис. 113, может служить для преобразования чисел из двоич-

ной системы в восьмеричную. Схема состоит из восьми схем совпадения с тремя входами в каждой. Входы соответствуют трем разрядам двоичного числа. Таким образом, здесь можно преобразовать любое двоичное число от нуля до семи, например, $001 \rightarrow 1$, $010 \rightarrow 2$, $101 \rightarrow 5$ и т. д., учитывая, что высокий уровень напряжения будет на шине, номер которой соответствует двоичному числу, установленному на входах *A*, *B* и *C*.

Схема может быть построена на различное число входов и иногда называется дешифратором кодов.

Известны и другие комбинации логических схем, как, например, ИЛИ-НЕ, И-НЕ и т. п.

Конструктивно логические схемы могут быть выполнены в виде модулей или микромодулей. В последнее время все более широкое распространение получают так называемые *интегральные схемы*, представляющие собой различные комплексы логических элементов.

Литература: [6], [9], [22], [25], [27].

§ 2. Арифметические устройства ЭВМ

Арифметические устройства предназначаются для выполнения арифметических и логических операций над числами и командами.

Поскольку все арифметические операции могут быть сведены к сложению, то основным элементом арифметического узла является *сумматор* кодов чисел, а в машинах с плавающей запятой также и сумматор кодов порядков. В зависимости от типа используемых элементов сумматоры подразделяются на комбинационные и накапливающие. Комбинационные сумматоры выполняются, в основном, из логических элементов, а накапливающие — из триггерных схем.

Арифметические устройства большинства современных универсальных и специализированных электронных цифровых машин собирают преимущественно на триггерных схемах. В их состав входят накапливающие сумматоры, регистры, группы простых логических схем, а также сдвигатели и другие вспомогательные узлы.

Основу арифметического устройства (АУ) обычно составляет сумматор с параллельным вводом разрядов слагаемых. Кроме него в состав АУ входят два или три триггерных регистра, группы клапанов и блок местного управления (рис. 114). Регистры и иногда сумматор имеют цепи сдвигов кодов чисел.

Сумматор предназначен для сложения кодов чисел, а регистры — для приема, хранения и сдвигов кодов чисел, над которыми производятся те или иные операции, в сочетании с группами клапанов — для изменения прямого кода числа на обратный и наоборот. Результаты операций выдаются в другие устройства либо с сумматора, либо с одного из регистров в зависимости от вида выполненной операции.

Арифметические устройства рассчитываются на выполнение определенных операций, из которых составляется любое предусмотренное для проведения в машине арифметическое или логическое действие. Этими операциями могут быть:

- прием на блоки арифметического устройства кода числа из запоминающего устройства или другого узла машины;
- выдача кода числа в запоминающее устройство или другой блок АУ;
- изменение прямого кода числа на обратный или наоборот;
- сдвиг кода числа в сторону старших или младших разрядов;
- сложение кодов чисел;
- установка триггеров регистров у сумматора в состояние «0».

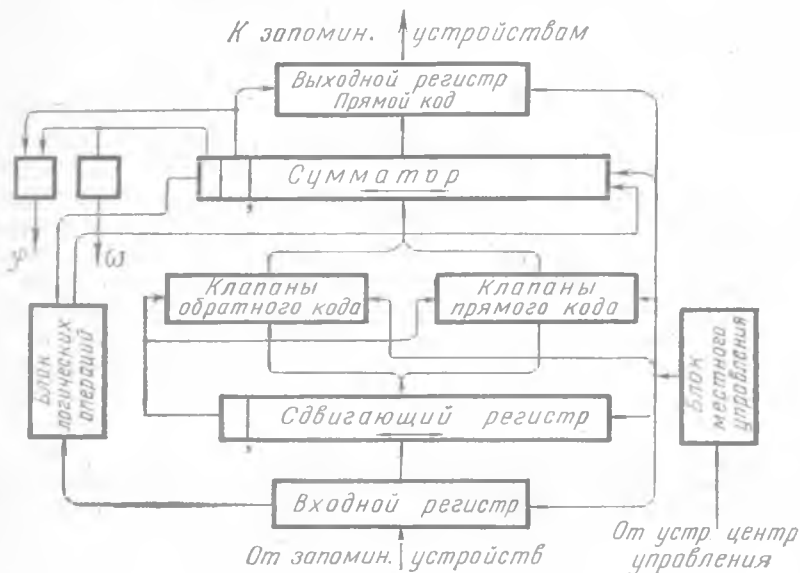


Рис. 114. Функциональная схема арифметического устройства.

Умножение и деление выполняется также с использованием сдвига кодов чисел в регистре и сумматоре.

Необходимые логические операции, как, например, сравнение, формирование, выделение части числа и т. п., выполняются в устройстве с помощью блока логических операций, связанного с соответствующими элементами АУ (рис. 114). В этом случае коды чисел с помощью цепей сдвига выдаются поразрядно на блок логических схем, где над ними и производится заданная операция.

Для управления работой арифметического устройства при проведении операций над числами служит блок местного управления.

Он вырабатывает определенные серии командных импульсов, которые подаются на регистры и системы клапанов АУ под действием основных сигналов, поступающих из центрального устройства управления УУ.

Литература: [9], [22], [25], [27], [45], [52].

§ 3. Запоминающие устройства ЭВМ

Запоминающие устройства цифровых машин предназначены для запоминания, хранения и выдачи команд программы, различных вспомогательных данных, промежуточных и конечных результатов. Различают два вида памяти: внутреннюю (оперативную) и внешнюю. Внутренняя память хранит ту часть программы, которая непосредственно участвует в вычислениях. Внешняя память хранит различные константы, таблицы и может также хранить программы вычислений.

По мере того, как заканчивается выполнение программы, хранящейся во внутренней памяти, ненужная ее часть либо стирается, либо переносится во внешнюю память, а на освободившееся место из внешней памяти переносится новая часть программы. Как правило, внешняя память записывает, считывает или стирает только группы чисел, а внутренняя память может оперировать как массивами чисел, так и отдельными числами.

Основными техническими характеристиками памяти являются скорость ее работы и емкость. Быстродействие машины в значительной мере зависит от того, какова скорость обмена информацией между внутренней памятью и арифметическим устройством, так как все исходные данные для арифметических действий берутся из внутренней памяти. Поэтому к внутренней памяти прежде всего предъявляется требование большой скорости работы при сравнительно малой емкости (1000—4000 чисел). Внешняя память связана только с внутренней и является по существу ее резервом, поэтому она должна обладать возможно большей емкостью. Малые скорости работы внешней памяти допустимы вследствие относительно редкого участия ее в процессе вычислений.

Запоминающие элементы, из которых строится память машины, по принципу действия можно разделить на два основных типа: динамические и статические.

Динамический элемент способен сохранять информацию только ограниченное, обычно очень небольшое время, и для сохранения информации требуется ее периодическое восстановление (регенерация). В статическом элементе информация при отсутствии внешних воздействий может сохраняться в течение весьма длительного времени.

По характеру хранения информации запоминающие устройства бывают периодическими и непериодическими.

В периодических запоминающих устройствах запоминаемые данные перемещаются циклически по отношению к считывающим или записывающим элементам. К таким устройствам относятся ЗУ на ультразвуковых и магнитоотрицательных линиях задержки, ЗУ на магнитных барабанах и лентах. Здесь время, необходимое для считывания или записи числа, зависит от того, где находится ячейка с нужным адресом в момент получения команды.

В непериодических запоминающих устройствах время считывания или записи числа не зависит от того, к какой ячейке ЗУ приходится обращаться. Примеры непериодических устройств: ЗУ на электронно-лучевых трубках, на магнитных сердечниках, на ферроэлектриках и т. п. Быстродействие таких устройств определяется главным образом скоростью работы схем считывания и записи информации.

Непериодические ЗУ — более быстродействующие, чем периодические. Время считывания числа здесь обычно составляет несколько микросекунд, тогда как в периодических ЗУ оно равно сотням и даже тысячам микросекунд.

Кроме того, запоминающие устройства характеризуются также надежностью, помехоустойчивостью и экономичностью.

Линии задержки

В 1946—1963 гг. в качестве запоминающих устройств получили применение так называемые ультразвуковые линии задержки. Информация в таком ЗУ хранится в виде последовательности импульсов, продвигающихся от начала линии задержки к концу.

В качестве возбудителей используются магнитоотрицательные и

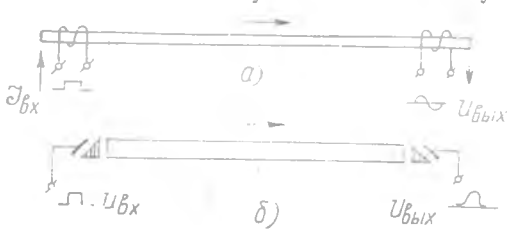


Рис. 115. Магнитоотрицательная (а) и пьезоэлектрическая (б) линии задержки.

пьезоэлектрические излучатели. Возбуждаемые электрическим импульсом (рис. 115), они создают в стержне местное механическое возмущение, которое движется со скоростью распространения звука к приемному концу, где помещен такой же приемный элемент, как и

передающий. Вследствие обратимости явлений пьезоэффекта и магнитоотрицательности на выходе этого элемента возникает импульс с задержкой по времени относительно входного сигнала. Поскольку в качестве материала стержня выбирается вещество с малым затуханием звуковых колебаний, например ртуть, никель, плавильный кварц, то ультразвуковая линия задержки может обеспечить запаздывание на сотни и даже тысячи микросекунд (гораздо большее время, чем у электромагнитных линий задержки). Наличие

схемы регенерации превращает такую линию задержки в регистр, способный хранить несколько сотен двоичных цифр.

Недостатком ультразвуковых линий задержки является их относительно небольшая емкость.

Магнитные барабаны и ленты

Широкое распространение получили запоминающие устройства, основанные на использовании магнитной записи. Принцип работы магнитных запоминающих устройств сводится к следующему. Поверхность специальным образом подготовленных барабанов и лент покрывается тонким слоем ферромагнитного материала, который и является носителем информации (рис. 116).

Размеры барабанов и лент и основные материалы, из которых они изготовлены, в различных машинах могут сильно различаться. 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. Длина лент может составлять несколько сот метров. Запись и считывание с магнитных лент и барабанов осуществляются при помощи специальных магнитных головок. Эти головки представляют собой подковообразной 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 одной полярности, для записи нуля — другой. Барабаны и ленты в процессе записи и считывания данных движутся так, что под головкой за время подачи импульса тока проходит определенный участок поверхности барабана или ленты. В результате на данном месте поверхности появляется намагниченный участок той или иной полярности — так называемая магнитная отметка.

Главный недостаток магнитных барабанов и лент — относительно невысокое быстродействие. Максимальное время выборки числа соответствует периоду вращения барабана, то есть при скорости вращения барабана 3000—6000 об/мин оно составляет 10—20 мсек. Среднее время выборки в два раза меньше периода вращения. Несмотря на этот недостаток, такое ЗУ при относительно малом количестве оборудования может обеспечить сравнительно

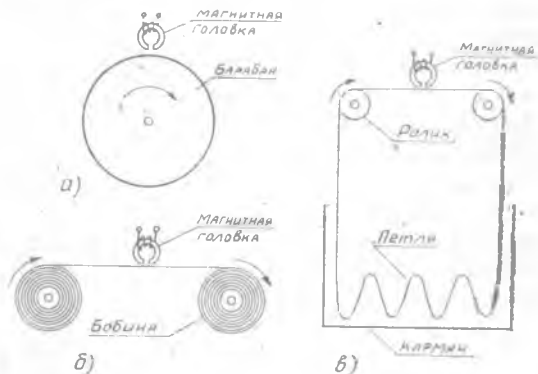


Рис. 116. Запоминающие устройства на магнитном барабане (а) и на магнитной ленте (б, в)

большой объем запоминания. При скорости вращения 3000—6000 *об/мин* и зазоре между головками и барабаном в несколько десятков микрон можно получать плотность записи до 3—5 цифр на 1 *мм*. Таким образом, на окружности барабана диаметром 200—300 *мм* можно разместить 2000—4000 двоичных цифр. Обычно емкость запоминающего устройства с магнитным барабаном составляет 1024—4096 чисел или команд.

Емкость запоминающих устройств с магнитными лентами составляет 80 000 и более чисел в одном блоке и зависит от длины используемой ленты. Подключая к машине несколько таких блоков, можно существенно увеличить общий объем запоминаемой информации.

Следует отметить, что наличие механических движущихся частей и необходимость точного соблюдения размеров зазоров между головками и поверхностью барабанов и лент усложняет изготовление устройств и их эксплуатацию.

Магнитные ленты обычно 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 («Урал-1»).

Дисковые запоминающие устройства

В дисковых запоминающих устройствах также, как и в предыдущем случае, используется принцип магнитной записи.

Запоминающее устройство этого типа выполняется в виде стойки с 50 дисками диаметром 500—600 *мм*, смонтированными на вертикальной оси и отстоящими друг от друга на 8 *мм*. Алюминиевые диски, покрытые с двух сторон ферромагнитным лаком, вращаются на общей оси со скоростью 1200 *об/мин*.

Каждая из ста дисковых поверхностей делится на 100 концентрических дорожек. Каждая дорожка может содержать 20 чисел, по 30 разрядов (знаков). Следовательно, общая емкость дискового набора составляет 6 млн. знаков.

Выборка (запись) чисел осуществляется магнитными головками, количество которых может достигать шести штук. Каждая пара головок монтируется на конце двойного рычага, имеющего радиальное перемещение относительно каждого диска. Рычаг, в свою очередь, монтируется на вертикально перемещающихся салазках.

Исходя из программы и адреса выбираемого числа салазки поднимаются или опускаются до высоты нужного диска, двойной рычаг опускается на диск и продвигается по нему до избранной дорожки; вращение дисков обеспечивает прохождение под головками ячейки считываемого или записываемого числа.

Запоминающие устройства на ферритах и ферроэлектриках

Применение ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса в качестве элементов запоминающих устройств позволило создать весьма надежные, емкие и быстродействующие блоки памяти, получившие в настоящее время широкое распространение. Наиболее часто используются ферритовые сердечники тороидальной формы. Внешний диаметр их может колебаться в пределах от 1,4 до 10 мм при внутреннем диаметре от 1 до 5 мм соответственно. Петля гистерезиса для таких ферритов приведена на рис. 117.

Как видно из графика, ферритовый сердечник характеризуется двумя устойчивыми магнитными состояниями $+B_c$ и $-B_c$, одно из которых будет обозначать $\bar{1}$, а другое 0. Используя n таких сердечников, можно создать n — разрядный регистр, пригодный для сколь угодно длительного хранения зафиксированного двоичного числа.

Наиболее простым ЗУ на ферритах является схема «плоской матрицы», образованной сеткой из вертикальных и горизонтальных проволочных шин (рис. 118). В точках пересечения шин расположены тороидальные сердечники, причем, через каждый сердечник проходит одна вертикальная и одна горизонтальная шина. Для считывания записанных сигналов служит общая обмотка, охватывающая все сердечники.

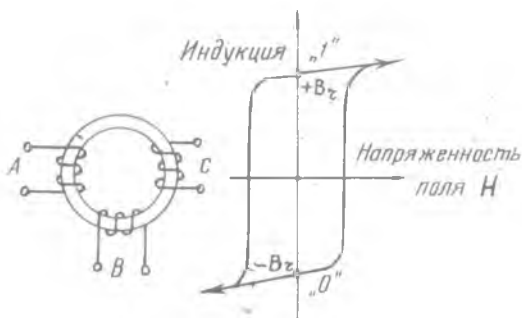


Рис. 117. Петля гистерезиса ферритовых сердечников.

Управление записью и чтением в рассматриваемом устройстве производится по способу совпадения сигналов. Например, необходимо записать сигнал 1 в сердечнике a (рис. 118, а). В этом случае на горизонтальную и вертикальную шины сердечника a подаются совпадающие во времени сигналы I_y и I_x равные каждый $\pm \frac{I_k}{2}$.

Эти сигналы в сердечнике a складываются, образуя суммарный сигнал I_k , достаточный для переброса сердечника из состояния 0 в состояние 1. Если сердечник a находится в состоянии 1, то после подачи сигналов его состояние не изменится.

Состояние всех других сердечников, расположенных на выбранных шинах, останется без изменений, так как сигнал $\frac{I_k}{2}$ недостаточен для перемангничивания сердечника. Запись сигнала 0

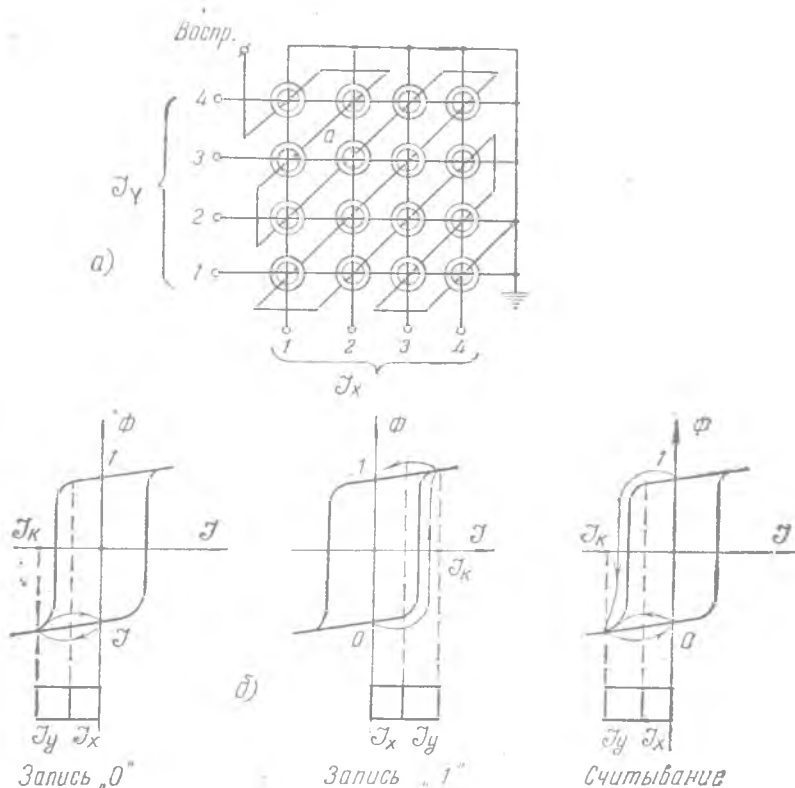


Рис. 118. Матричное запоминающее устройство на ферритах.

производится отрицательными импульсами $-I_y = -I_x = -\frac{I_k}{2}$.

Для считывания сигнала, записанного в сердечнике a , на те же шины подаются совпадающие по времени сигналы $-I_y = -I_x = -\frac{I_k}{2}$.

Если в сердечнике был записан сигнал 1, то сигналы чтения, суммируясь, перемагнитят сердечник, при этом в обмотке чтения возникает импульс. Если же в сердечнике был записан 0, сигналы чтения не меняют его состояния, и в обмотке чтения импульс отсутствует. Следует учесть, что при чтении 1 происходит опрокидывание сердечника в состояние 0. Чтобы помещенная в память информация после чтения автоматически восстанавливалась, употребляются специальные схемы регенерации.

Для одновременной (параллельной) записи или считывания цифр всех разрядов двоичного числа используется схема «объемной матричной памяти», состоящая из одинаковых плоских матриц, количество которых соответствует числу двоичных разрядов

«машинного слова». Число сердечников в каждой матрице равно количеству хранимых в памяти чисел. Подобные устройства широко применяются для построения оперативных магнитных запоминающих устройств (МОЗУ).

Запоминающие устройства на магнитных сердечниках обладают высоким быстродействием 2—8 мксек и позволяют производить запись и выборку чисел в любом порядке. Эти устройства небольших габаритов и не имеют движущихся механических частей. Например, запоминающее устройство на 1024 числа по 50 разрядов в каждом числе представляет собой куб размером 40×40×40 см.

В настоящее время начинают применяться ферритовые сердечники с двумя и более отверстиями, с помощью которых можно создать запоминающие элементы, допускающие многократное считывание без разрушения информации. Эти элементы получили название **трансфлюксов** в связи с тем, что принцип их действия основан на перераспределении магнитного потока в ветвях сложного магнитопровода, образуемого сердечником с несколькими отверстиями. Схема запоминающего устройства на трансфлюксах приведена на рис. 119.

Адресные шины записи X и Y пронизывают большие отверстия трансфлюксов, расположенных в узлах матрицы. Для записи 0 в соответствующую пару взаимно перпендикулярных «шин записи» подаются запоминающие импульсы тока такой величины, чтобы только сумма создаваемых ими м. д. с. в находящемся на их пересечении избранном сердечнике могла вызвать его полное перемагничивание. Для записи 1 в соответствующую пару шин подаются отпирающие импульсы тока противоположного знака и соответствующей величины, необходимой для отпира-
ния трансфлюксора.

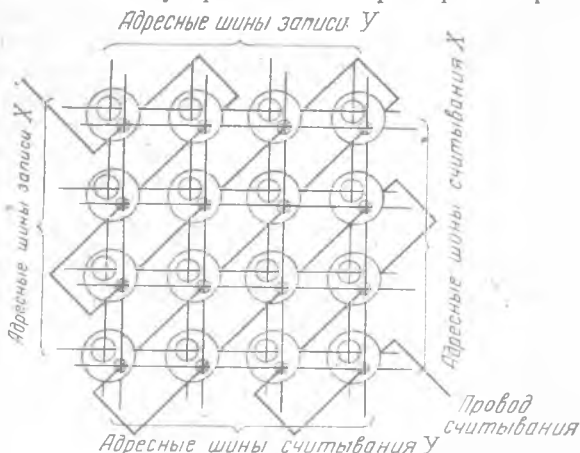


Рис. 119. Матричное запоминающее устройство на трансфлюксах.

Считывание информации осуществляется подачей запрашивающих импульсов в соответствующие адресные шины считывания X и Y , проходящие через малые отверстия трансфлюксов. При этом в избранном трансфлюксоре, находящемся на пересечении возбужденных адресных шин, если в нем была записана 1 (т. е. если он был открыт), происходит двухкратное перемагничивание зоны вокруг малого отверстия, в результате чего в проводе считыва-

ния, пронизывающем малые отверстия всех сердечников матрицы, индуцируется сигнал считывания. В описанной схеме имеется возможность одновременного независимого возбуждения двух различных пар адресных шин записи и считывания, так как они не связаны между собой общими магнитопроводами. Это позволяет осуществлять одновременно и независимо друг от друга запись и считывание информации по двум разным адресам, что является весьма существенным преимуществом описываемой схемы, дополняющим другое ее важное преимущество — сохранение информации при считывании.

Трансфлюксоры могут применяться также для построения различных логических схем.

К недостаткам ЗУ на ферромагнитных сердечниках относится: разброс характеристик отдельных элементов, что требует их специального отбора; плохие температурные свойства; необходимость перемagnetичивания сердечников для выборки информации.

Матричные устройства могут быть и конденсаторного типа (на ферроэлектрических элементах). Принцип действия ферроэлектриков такой же, как и в случае магнитных сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса, только вместо токов здесь используются напряжения. Однако, поскольку при использовании конденсаторов можно располагать только двумя выводами от каждого элемента (в отличие от магнитного сердечника, через который можно продевать большое количество обмоток), такие устройства получили гораздо меньшее распространение.

Перспективы развития запоминающих устройств

Описанными выше ЗУ не исчерпываются возможности построения устройств хранения дискретной информации. Ученые, инженеры, техники, конструкторы непрерывно работают над использованием разнообразнейших физических и химических явлений для создания все новых и новых элементов, пригодных для построения запоминающих устройств. При этом, с одной стороны, работа ведется в направлении создания наиболее экономичных, малогабаритных, технически совершенных быстродействующих ЗУ, которые можно было бы использовать в создаваемых и разрабатываемых в настоящее время электронных вычислительных машинах и других установках, включающих блоки памяти. Наиболее высокие требования, предъявляемые к таким устройствам, ограничиваются быстродействием ЗУ в несколько микросекунд или долями микросекунды, информационной емкостью в несколько десятков миллионов двоичных единиц. Допускаются размеры ЗУ, достигающие долей кубометра или несколько кубометров.

С другой стороны, для удовлетворения потребностей будущего (причем, весьма близкого будущего, учитывая стремительные темпы развития науки и техники) ведутся поисковые работы по созданию ЗУ с быстродействием, составляющим тысячные доли микросекунды, емкостью в сотни миллионов и миллиардов двоичных

единиц и размерами в несколько кубических дециметров с потребляемой мощностью несколько десятков и сотен ватт.

Перечислим некоторые из наиболее интересных предложений и принципиально новых разработок запоминающих устройств.

В 1955 г. на основе явления сверхпроводимости был создан прибор, получивший название криотрона, в котором используется возможность управления состоянием сверхпроводимости с помощью магнитного поля. Эти элементы просты, дешевы, имеют малые размеры, но для их работы необходимы охладители из жидкого гелия.

В 1957 г. в лабораториях Белл (США) разработано матричное магнитное ЗУ, получившее название твистор (от английского *twist* — скручивать). Запоминающими элементами его являются участки горизонтальных шин из магнитной проволоки. В узлах матрицы на эти шины навито по несколько витков, которые включены в вертикальные шины из обычной проволоки (рис. 120).

Принцип действия твисторов основан на том, что в ферромагнитном материале, подверженном механическому напряжению, по различным направлениям возникают неодинаковые магнитные свойства, выражающиеся, в частности, в появлении легкого намагничивания, совпадающего по действию с направлениями наибольшего сжатия или растяжения материала. Таким образом, в предварительно скрученной магнитной проволоке направление легкого намагничивания имеет вид спирали (геликоида), ось которой совмещена с осью проволоки (рис. 120). Устройство работает по принципу совпадения токов и характеризуется простотой, высокой экономичностью и быстродействием.

Одним из наиболее новых ферромагнитных элементов для вычислительных машин является разработанный в американской лаборатории фирмы «Форд мотор» элемент биакс, предназначенный для запоминающих устройств и логических цепей.

Биакс как запоминающий элемент (рис. 121) представляет собой ферритовый параллелепипед с двумя отверстиями квадратной формы, оси которых взаимно перпендикулярны (отсюда и название «биакс» — биаксиальный, двухосевой). Размеры биакса — $1,25 \times 1,25 \times 2,1$ мм, размеры отверстий — $0,5 \times 0,5$ мм, толщина внешних стенок и перемычки между отверстиями — $0,375$ мм.

Одно из отверстий, например, верхнее, используется для записи информации. Через него продеваются проводники записи 1 и считывания 2. Другое, нижнее отверстие предназначено для

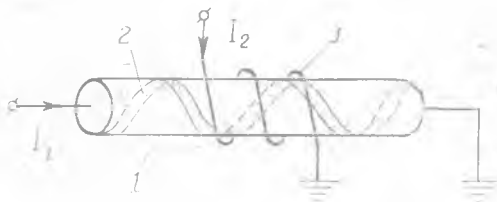


Рис. 120. Твистор с одной обмоткой на магнитной проволоке.

1 — проволока из магнитного материала; 2 — направление легкого намагничивания; 3 — обмотка

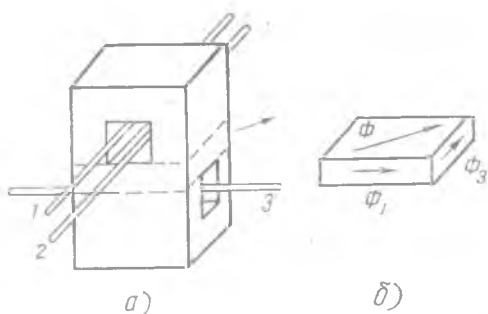


Рис. 121. Элемент типа «биакс».

а — устройство элемента; *б* — ориентация магнитного потока в перемычке между отверстиями.

между отверстиями поток насыщения Φ будет направлен по диагонали (рис. 121, б). Составляющие этого потока, связанные с верхним и нижним отверстиями, будут, очевидно, меньше потока насыщения и по абсолютной величине равны $\Phi/\sqrt{2}$.

В случае записи 1 вектор потока верхнего отверстия Φ_1 ориентирован направо, а в случае записи 0 — налево. При неизменной ориентации вектора потока нижнего отверстия Φ_3 результирующий поток Φ будет расположен по одной из двух диагоналей перемычки.

При пропускании по проводу 3 опросных импульсов в проводе считывания 2 будет наводиться э. д. с. того или иного знака, в зависимости от ориентации потока Φ . После окончания опросного импульса восстанавливается первоначальное распределение потоков в перемычке между отверстиями, то есть обеспечивается считывание информации без ее разрушения. Время считывания составляет 0,2 мксек, причем такой элемент может быть опрошен сотни миллиардов раз с высокой частотой.

Применение тонких магнитных пленок позволит, по-видимому, в будущем сконструировать сверхбыстродействующие ЗУ со временем срабатывания порядка десятков или даже единиц наносекунд (миллимикросекунд) и плотностью записи до миллиона двоичных единиц на 1 см^2 .

Экспериментальное запоминающее устройство этого типа представляет собой круглые пятна пленки пермаллоя толщиной 750°A и диаметром 1,6 мм, нанесенные методом испарения в вакууме на плоскую стеклянную подложку толщиной 0,1 мм (рис. 122). Расстояние между центрами со-

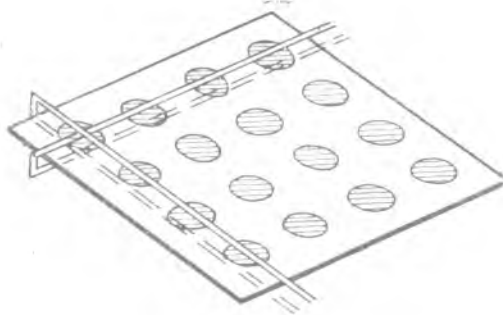


Рис. 122. Запоминающее устройство на магнитной пленке.

седних пятен составляет 2,5 мм. Время полного цикла обращения к запоминающему устройству, учитывая задержку сигналов в усилителях записи и считывания, составляет 0,8 мксек. Так, например, подобное запоминающее устройство емкостью 32 десятиразрядных числа находится в опытной эксплуатации в машине TX-2 Массачузетского технологического института (США).

Большой интерес представляют новые элементы — параметроны, в которых используются явления параметрического резонанса. На этих элементах уже создан ряд вычислительных машин.

Для создания достаточно компактных ЗУ предложены специальные запоминающие электролитические диоды с активным электродом из колумбия или тантала и пассивным электродом из золота или серебра.

Одной из зарубежных фирм (США) разработаны фотохимические бистабильные элементы с временем срабатывания, исчисляемым микросекундами. Они состоят из мельчайших капсул диаметром около 2,5 мк с оболочками из желатина, наполненных смесью масла, желатина, коллоидов и фотохромного вещества, изменяющего свою окраску под влиянием световых лучей с определенной длиной волны. Освоена технология изготовления таких капсул в виде тонкого слоя, в котором на 1 см² приходится до 15 млн. капсул. Подобное устройство может послужить основой для создания информационных машин с быстродействующей памятью, соизмеримой по объему с памятью человека.

Разработано емкостное «сотовое» ЗУ мозаичного типа на тонком листе стекла с крошечными углублениями, заполненными металлом. Это ЗУ имеет удельную емкость до 150 000 двоичных единиц на 1 см².

Имеются сведения о теоретических исследованиях по использованию явления ядерного резонанса для построения запоминающих устройств.

Выше перечислен ряд принципов, на которых могут быть созданы ЗУ. Такое далеко не полное перечисление различных принципов сделано для того, чтобы показать, какие возможности имеются для создания новых типов ЗУ.

Литература: [8], [9], [22], [25], [30], [31].

§ 4. Устройства управления ЭВМ

Устройства управления в силу различных требований к логической структуре отдельных машин, к системе команд и способу программирования являются наименее типизированной частью вычислительных машин. Следует отметить, что в отличие от арифметических и запоминающих устройств, имеющих определенную автономность, устройство управления машины органически связано со всей машиной и воплощает в себе особенности ее структуры. Отсюда следует, во-первых, что структурные схемы всей

машины и устройства управления должны рассматриваться совместно и, во-вторых, что практически невозможно рассматривать устройство управления безотносительно к какому-либо конкретному типу машин.

Назначение и состав устройств управления

Устройство управления предназначается для управления автоматической работой машины и, в частности, для осуществления следующих элементарных операций:

— чтение кода очередной команды из запоминающего устройства и передача его в соответствующие узлы машины;

— чтение кодов чисел из запоминающего устройства и передача их на регистры арифметического узла;

— выполнение операции, указанной в коде команды (арифметических операций, операций условного перехода и т. д.);

— передача полученного результата в запоминающее устройство и на выводное печатающее устройство (если это предусмотрено командой);

— обеспечение оператору возможности контроля и управления работой машины.

Управление работой блоков и устройств любой ЭВМ может быть централизованным, местным или смешанным.

При централизованном управлении все командные импульсы, необходимые для работы блоков и устройств машины, вырабатываются в центральном устройстве управления и передаются с него непосредственно на управляемые элементы по командным шинам.

При местном управлении командные импульсы, необходимые для работы какого-либо блока или устройства машины, вырабатываются в местном органе управления, обеспечивающем работу только одного блока или устройства.

При смешанном управлении в центральном устройстве вырабатываются только основные командные импульсы, необходимые для согласования работы всех блоков и устройств машины и поступающие в большинстве случаев в местные органы управления. Непосредственно работой каждого блока и устройства управляют импульсы, вырабатываемые в соответствующем местном органе управления под действием сигналов, приходящих из центрального устройства.

Большинство современных ЭВМ имеет смешанное управление, при котором не только упрощается схема машины, но и рациональнее используются ее устройства и блоки. Местные органы управления служат для разгрузки центрального устройства, а также для управления теми операциями, которые занимают больше времени, чем наиболее часто повторяемые операции.

В зависимости от распределения функций между местным и центральным устройствами управления различают машины с постоянным и переменным тактом.

Машина с постоянным тактом — это машина, в которой на любую операцию отводится заранее рассчитанное время. В такой машине часть времени тратится «вхолостую», так как для большинства операций обычно требуется значительно меньше времени, чем для наиболее длительной из них, по которой устанавливается такт. В подобных машинах всеми операциями может управлять центральное устройство управления.

Машина с переменным тактом — это машина, в которой очередная операция начинается сразу же после получения сигнала об окончании предыдущей, то есть расход времени на операцию зависит только от ее характера и различается для разных операций. Поэтому все операции распределяются между местным и центральным устройствами управления. Центральное устройство управляет операциями, которые занимают время, меньшее или равное принятому основному такту машины, а местное — операциями, на которые требуется время, большее основного такта.

Машины с постоянным тактом иногда называют синхронными, а машины с переменным тактом — асинхронными.

Наиболее сложные устройства управления имеют большие универсальные машины, которые рассчитаны на решение большого круга задач. Это в свою очередь требует от устройства управления гибкости, оперативности и наиболее рационального использования возможностей элементов.

Рассмотрим характерный пример построения структурной схемы устройства управления применительно к одноадресной машине (рис. 123). Изучение этой схемы позволит уяснить общие черты структуры и особенности построения устройств управления ЭВМ.

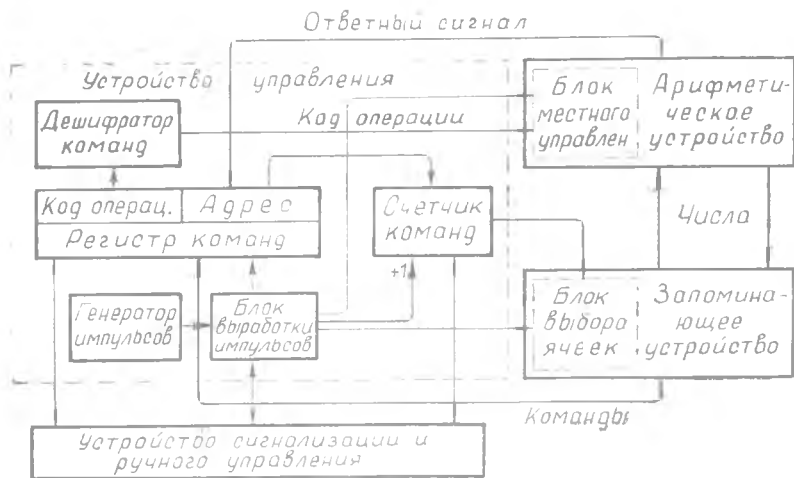


Рис. 123 Устройство управления одноадресной машины.

Функционально устройство управления образуется из нескольких взаимосвязанных узлов.

Регистр команд принимает из ЗУ и хранит код команды, которая будет выполняться в течение очередного такта работы машины. Регистр команд разделяется на две части: одна для хранения кода операции и другая — для хранения кода адресной части команды. Если предусматривается возможность изменения команд, то главный регистр команд выполняется по схеме сумматора.

Регистр команд связан с дешифратором команд, на который передается ход операции, и со счетчиком команд, в который посылается либо единичный импульс в каждом такте, либо адресная часть измененной команды. Кроме того, он связан с блоком выработки импульсов, от которого получает ряд управляющих импульсов, и с пультом управления. Связь с пультом управления обеспечивает занесение в главный регистр первой команды программы и управления работой устройств в различных режимах.

Дешифратор команд преобразует код операции в управляющий сигнал, получаемый на соответствующей выходной шине. Основные его части — регистр, на который код операции поступает из регистра команд, и дешифратор. Кроме того, некоторые выходы дешифратора связаны с блоком местного управления.

Счетчик команд задает последовательность исполнения команд и при необходимости изменяет ее в ходе решения задачи. Количество разрядов счетчика должно соответствовать количеству ячеек оперативного накопителя ЗУ. Так, если оперативный накопитель имеет 2048 ячеек, то счетчик должен быть 11-разрядным.

При выполнении естественной последовательности команд содержимое счетчика увеличивается в каждом такте на единицу. Так как число, фиксируемое счетчиком, служит адресом очередной команды, то при передаче его на блок выбора ячеек ЗУ из последнего будет выбрана необходимая команда и передана на регистр команд. В том случае, когда необходимо изменить естественный порядок следования команд, в счетчик команд, предварительно сброшенный на нуль, заносится число из адресной части главного регистра команд.

Блок выбора ячеек работает совместно со счетчиком и регистром команд и служит для формирования номера ячейки ЗУ, содержимое которой подлежит выбору либо в арифметическое устройство при выполнении заданной операции, либо на главный регистр команд, при переходе к следующему такту работы машины.

Блок местного управления вырабатывает ряд управляющих импульсов при выполнении арифметических операций, не укладывающихся в основной такт машины (например, операции деления).

Генератор импульсов вырабатывает определенную последовательность опорных импульсов и является основным син-

хронизирующим элементом центрального устройства управления.

Блок выработки импульсов вырабатывает серию импульсов, поступающих в определенной последовательности на различные узлы и устройства машины. Блок представляет собой распределитель импульсов, состоящий из клапанов, линий задержки и других элементов.

Пульт управления предназначен для ручного управления машиной. Кроме элементов, служащих для пуска, остановки машины и переключения режимов ее работы, пульт управления имеет систему сигнализации, рассчитанную на визуальный контроль за работой устройств машины.

При естественной последовательности выполнения команд устройство управления работает следующим образом. В каждом такте содержимое счетчика команд увеличивается на единицу, благодаря чему происходит выборка команд из ячеек ЗУ, имеющих последовательные номера. Команда, выбранная из ЗУ, принимается на регистр команд. Оттуда код операции через дешифратор поступает в арифметическое устройство, а адресная часть команды — в блок выбора ячеек ЗУ. При этом из ЗУ извлекается необходимое число и над ним производятся действия, определяемые кодом операции.

Устройства управления двух- и трехадресных машин несколько сложнее, однако общий принцип работы остается таким же.

Литература: [8], [9], [22], [25], [27].

§ 5. Устройства ввода информации и вывода результатов

Для ввода исходной информации в машину обычно используется промежуточный носитель информации в виде перфоленты, перфокарт или магнитной ленты. Программа вычислений и исходные данные переносятся, например, на перфоленту с помощью специальных внешних устройств: клавишного устройства и входного перфоратора.

Нажимая клавиши, оператор набирает очередное число или команду и стартовой кнопкой передает набор перфоратору.

На клавишном устройстве команды набираются в восьмеричной системе, а числа — в десятичной системе счисления. Особая схема преобразует восьмеричный код в двоичный, а десятичный код — в двоично-десятичный.

Перфоратор пробивает каждый набор на перфоленте и передвигает ее в новую позицию.

На рис. 124 в качестве примера показана система перфорации цифр и знаков на 35 мм киноленте, употребляемая в машине «Урал-1».

Каждое число или команда на перфоленте перфорируется на одиннадцати дорожках и четырех строках, составляющих одну ячейку. На одиннадцатой дорожке первой строки в каждой ячейке, независимо от числа, всегда располагается маркерная пробивка.

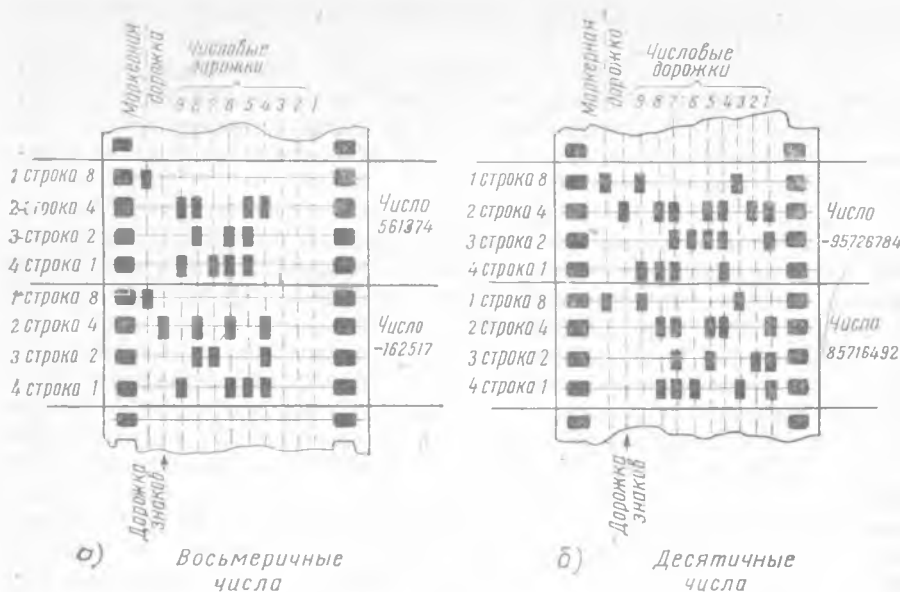


Рис. 124. Принцип перфорации кодов чисел на ракордной киноленте.

Она служит для разграничения ячеек. Запись команд и восьмеричных чисел на перфоленду производится следующим образом. Каждый восьмеричный разряд занимает одну дорожку. Наличие пробивки на четвертой строке любой дорожки соответствует единице, на третьей — двойке, на второй — четверке и первая строка всегда свободна. Знак числа записывается на десятой дорожке второй строки путем соответствующей перфорации для отрицательного числа (для положительного числа перфорация отсутствует). Запись десятичных чисел аналогична (рис. 124, б), причем восьмерки пробиваются на первой строке. Младший разряд записывается на первой дорожке, а старший — на девятой.

Пробитую и проверенную перфоленду переносят в устройство ввода машины. При протяжке ленты аппаратура ввода с помощью фотоэлементов прочитывает одну за другой строчки кодов и передает считываемую информацию в память машины. Скорость считывания — около 4500 чисел в минуту при движении ленты со скоростью 1,4 м сек.

В машинах используется также стандартная 17,5 мм телеграфная бумажная лента. Принцип перфорации аналогичен рассмотренному выше. На рис. 125 и 126 показана перфорация восьмеричного и десятичного чисел.

На ленте имеется шесть дорожек. Пробивка на первой дорожке, справа соответствует единице, на второй — двойке, на третьей — четверке. На четвертой дорожке располагаются синхронизирующие пробивки. И, наконец, пятая и шестая дорожки яв-

ляются дорожками признаков восьмеричных и десятичных чисел. Каждая цифра перфорируется на одной строке.

В машинах типа «БЭСМ», «Стрела» и др. в качестве носителя исходной информации используются 80-колодные перфокарты (рис. 127). На каждой перфокарте размещаются несколько команд или десятичных чисел. Таким образом, небольшая колода перфокарт включает в себя всю исходную информацию. Ввод данных в машину производится с помощью специального читающего устройства со скоростью от 200 до 700 перфокарт в минуту. Коды считываются электромеханическим способом.

Для ввода информации не только цифровой, но и буквенной разработаны и применяются *алфавитно-цифровые устройства ввода*, которые представляют собой модернизированное клавишное устройство и перфоратор и могут быть приспособлены к любой вычислительной машине.

В состав внешних устройств вычислительных машин входит также *контрольно-считывающее устройство*, которое

— производит автоматическую сверку двух готовых одинаковых комплектов перфокарт (перфолент);

— производит дублирование (реперфорацию) нового комплекта перфокарт (перфолент) по имеющемуся образцу;

— при совместной работе с клавишным устройством дает возможность производить сверку рукописной программы с готовым комплектом перфокарт (перфолент).

Для вывода из машины результатов вычислений или заложенной в нее исходной информации применяются печатающие устройства электромеханического типа, которые печатают на бумажной ленте результат в восьмеричном или десятичном коде (рис. 128).

В последнем случае двоичный машинный код сначала с помощью специальной подпрограммы переводится в двоично-десятичный, а затем уже выводится на печать.

Вывод информации производится со скоростью 15—20 чисел в секунду.

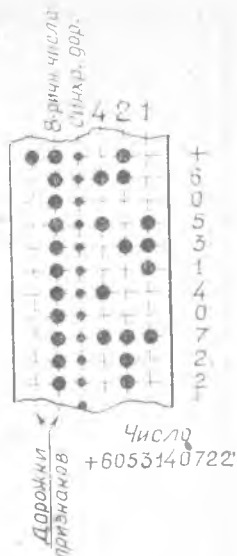


Рис. 125. Принцип перфорации кодов восьмеричных чисел на телеграфной ленте.

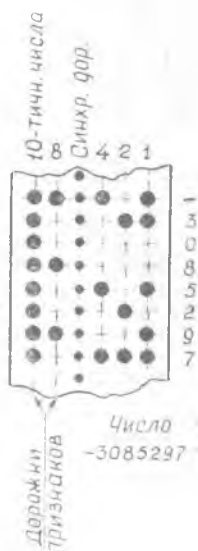


Рис. 126. Принцип перфорации кодов десятичных чисел на телеграфной ленте.

В настоящее время применяются также устройства алфавитно-цифрового вывода информации на широкую бумажную ленту (например, АЦПУ-128). Такие устройства позволяют выводить на печать информацию не только в числовом виде, но и с использованием букв русского и латинского алфавитом, а также ряда специальных знаковых символов. Благодаря этому оказывается возможным получать результаты непосредственно в виде графиков, таблиц, технологических карт с соответствующим текстовым сопровождением, что устраняет необходимость расшифровки, которую приходится производить при цифровом выводе (рис. 129).

При необходимости информация из машины может быть выведена также на выходной перфоратор, который пробивает

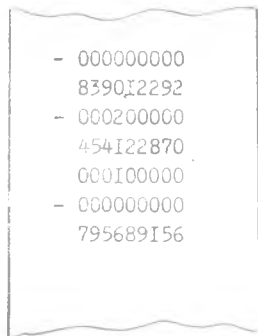


Рис. 128. Образец печати результата.

ТРУДОВЫЕ И СТОИМОСТНЫЕ ЗАТРАТЫ ПО ОБРАБОТКЕ ПЕРФОКАРТ			
НАИМЕНОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ	ТРУДОЕМ- КОСТЬ В НОРМОЧАС	РАЗРЯД РАБОТ	ФОНД ЗА- РАБОТНОЙ ПЛАТЫ (Р)
ПОДГОТОВКА ПЕРФОКАРТ	32500	5	13800
СОРТИРОВКА	3125	5	1300
ТАБУЛЯЦИЯ	3300	6	1600
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ОБРА- БОТКА НА ЭВМ	4000	6	1970
ОБРАБОТКА ДОКУМЕНТОВ И ТАБУЛЯГРАММ НА КЛАВИШНЫХ МАШИНАХ	1900	5	800
ПРОЧИЕ РАБОТЫ И ТЕХ- ОБСЛУЖИВАНИЕ	6000	5	2560
ИТОГО	50825	-	22030
ОТЧИСЛЕНИЯ В СОЦСТРАХ	-	-	2300
ВСЕГО	-	-	24330

Рис. 129. Вывод информации на АЦПУ.

результаты на перфоленге (перфокартах) аналогично тому, как это делается во входном перфораторе.

Серьезным недостатком существующего способа ввода информации в машину является необходимость дополнительного оборудования (перфораторов, клавишных устройств и т. п.), на которое затрачивается до 15—20% стоимости электронных вычислительных машин. Кроме того, низкая скорость работы электромеханических устройств ввода находится в резком несоответствии с

быстродействием машин, что сильно снижает общую среднюю скорость работы.

В настоящее время ведутся исследования по разработке систем машинного распознавания цифр и букв алфавита с целью создания «читающих автоматов», которые могли бы обеспечить непосредственное «общение» между человеком и вычислительным устройством.

Несмотря на большое количество предложенных систем «читающих автоматов» в настоящее время их можно разделить на три группы. К ним относятся «читающие устройства» для считывания стандартных начертаний символов (цифр, букв, знаков арифметических действий и т. д.); «читающие устройства» для считывания символов, независимо от их начертания (рукописный текст, различные типографские и машинописные шрифты) и, наконец, «обучаемые» системы «читающих устройств».

Большинство предложенных систем могут быть отнесены к первой группе приведенной классификации. Например, в основу одной из систем положен так называемый метод зондов. С помощью оптикоэлектронного устройства исследуются некоторые точки поля раstra, на которое проецируется опознаваемый символ (рис. 130). Количество исследуемых точек (зондов) и их положение выбирается таким образом, чтобы комбинация затемненных и освещенных зондов соответствовала только одному из знаков рассматриваемой группы символов. Так, на рис. 130 показан пример опознавания цифр 3 и 9. При этом видно, что опознавание этих цифр может быть произведено по зондам 4, 5, 6 и 8, в то время как зонды 1, 2, 3 и 7 являются общими для цифр 3 и 9.

РАСПОЗНАВАЕМЫЕ
СИМВОЛЫ

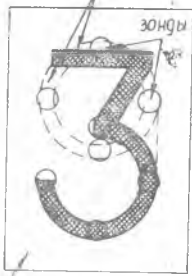


Рис. 130. Принцип «распознавания цифр» по методу зондов.

Текст, подлежащий считыванию, может быть написан от руки или напечатан на пишущей машинке. Предназначенные для считывания рукописные цифровые знаки несколько ограничены в своем начертании. Машинописные знаки также имеют определенную стилизацию. Автомат укомплектован пишущей машинкой, оснащенной таким стилизованным шрифтом. Текст наносится на специальный бланк в виде двух массивов по 49 цифр на отведенные для этого участки. Считывание текста производится автоматически.

В последние годы большое внимание уделяется конструированию универсальных «читающих устройств», способных опознавать один и тот же символ различной формы. При разработке алго-

ритма опознавания определяются качественные признаки рисунка символа, неизменные при различных его начертаниях. Количество выбранных различительных признаков должно быть минимальным, но достаточным для уверенного опознавания данного символа. Наличие того или иного признака в символе обычно кодируется как «1» или «0» на основе двоичной системы счисления.

Универсальные «читающие автоматы» осуществляют поиск знака на носителе, затем отделяют полезный сигнал от возможных помех и автоматически подстраивают сканирующий растр под размеры знака. Затем «рафинированная» информация о знаке исследуется в соответствии с принятым алгоритмом опознавания. Здесь набор признаков опознаваемого символа сравнивается с одним из эталонных наборов, хранящихся в памяти устройства. При совпадении признаков считанный знак считается равнозначным эталонному.

Чтение информации может производиться не только оптическим, но и магнитным способом. Один из принципов состоит в том, что информация записывается на бумаге специальными чернилами, представляющими смесь красителя и тонко размолотого ферромагнитного порошка. Написанная такими чернилами рукопись протягивается с большой скоростью под магнитными головками. Каждая цифра (или буква) вызывает на выходе головки импульс напряжения вполне определенной формы, соответствующей только данному символу. Специальная схема распознает по форме импульса «прочитанный» символ, зашифровывает его в машинном коде и передает в запоминающее устройство.

Но наиболее перспективным и качественно новым подходом к решению проблемы опознавания образов (в частности, цифр, букв и других символов) с помощью кибернетических устройств является создание «обучаемых» систем, которые, очевидно, станут действительно универсальными «читающими устройствами».

К проблеме создания алфавитно-цифровых «читающих устройств» тесно примыкает задача разработки устройств непрерывного ввода информации, представленной в виде графиков, кривых и т. п.

Существовавшая длительное время проблема несоответствия между скоростью электронных блоков машины и электромеханической скоростью устройств ввода и вывода решается, с одной стороны, значительным увеличением производительности последних (до 2000 перфокарт в минуту и 1800 знаков с перфоленг в секунду у читающих устройств, и до 300 карт в минуту у выходных перфораторов) и с другой, за счет применения специальных буферных устройств, а также использования принципа совмещения во времени работы нескольких устройств ввода и вывода.

Имеются также сведения о создании сверхбыстродействующих устройств ввода и вывода. Например, в машине «Унивак-Ларк» (США) применено печатающее (постранично) устройство, кото-

рое позволяет выводить результаты вычислений как в виде таблиц, так и в виде графиков, для чего используется экран электронно-лучевой трубки, с которого скоростным фотоаппаратом постранично фотографируется результат вычислений. Постраничная печать работает со средней скоростью 15 тыс. знаков в секунду (на кадр пленки), а при построении графиков — около 2 тыс. точек в секунду. Машина снабжена двумя постранично печатающими устройствами (с автоматическим проявлением фотопленки) для непрерывного вывода информации (фотоаппарат может выдавать стандартные отпечатки на бумаге или прозрачные позитивные пленки).

К числу универсальных систем ввода — вывода относятся и такие приставки, как электронно-печатающее устройство, работающее по принципу ксерографии, прибор для вычерчивания графиков, устройства для визуального представления и т. п.

Литература: [8], [9], [22], [25], [27].

Глава X ПОДГОТОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА ЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ МАШИНАХ

В общем плане процесса подготовки задач для решения на электронных цифровых вычислительных машинах надо прежде всего обратить внимание на такие основные вопросы:

1. постановка задачи и определение целей;
2. математизация задачи;
3. разработка численных методов решения.

Для успешного решения нужна безусловно корректная постановка задачи, то есть, определение всех исходных величин, области изменения входящих переменных, начальных и граничных условий, влияния внешней среды и т. п., а также конечных целей, свойств искомого результата и допустимых средств решения. Естественно, что эта часть в зависимости от типа и характера задачи может быть как очень простой, так и достаточно сложной и длительной. Почти одновременно производится и математизация задачи, то есть составление математической модели исследуемого процесса на основе использования наиболее подходящего для данного случая формального языка, систем исчисления и т. д. Наконец, весьма важным моментом является разработка численного метода решения, с помощью которого, по существу, производится арифметизация задачи. В отдельных, наиболее благоприятных случаях, могут быть использованы уже разработанные методы, в других потребуются значительное время, знание численных мето-

дов анализа и зачастую появляется необходимость привлечения к этой работе квалифицированных специалистов в области вычислительной и прикладной математики.

Конечно, не всегда эти вопросы четко разграничены и некоторые вообще могут отсутствовать, но эта подготовительная работа в большинстве случаев является наиболее трудоемкой.

Дальнейший процесс подготовки задачи состоит в ее обработке применительно к специфике решения на цифровых вычислительных машинах и может быть разделен на следующие этапы:

- разработка решающего алгоритма;
- составление блок-схемы программы (или логической схемы программы);
- масштабирование;
- программирование;
- отладка программы на машине;
- решение задачи на машине.

Поскольку машина может выполнять ограниченное количество элементарных операций (арифметические, логические, вспомогательные), первый этап подготовки будет состоять в приспособлении задачи к решению на машине. Иначе говоря, должен быть разработан такой метод решения, который бы четко и однозначно определял последовательность выполнения необходимых операций. Разработка такого решающего алгоритма в ряде случаев требует высокой квалификации и связана с большими трудностями. Формальных правил для выполнения этой работы не существует. Основой для построения решающего алгоритма могут служить методы численного анализа.

После того, как определен метод обработки информации, должен быть составлен детальный план и хронологический порядок работы машины, т. е. должна быть составлена блок-схема или логическая схема программы.

Необходимость в масштабировании исходных величин возникает, как правило, при работе на машинах с фиксированной запятой. Этот этап состоит в приведении исходных величин в соответствие с разрядной сеткой и формой представления чисел в данной машине.

После того, как составлена логическая схема программы, остается перевести ее на язык конкретной вычислительной машины. Используя кодовую характеристику операций, составляют логическую последовательность команд, которые подетально описывают каждый шаг машины. Эта совокупность команд и называется программой.

После составления программы ее тщательно проверяют, однако, как показывает практика, полного устранения ошибок добиться при этом очень трудно. Окончательно устраняются ошибки при отладке программы на машине. В простейшем случае отладка заключается в решении специально подобранных упрощенных примеров и сличении получаемых результатов с заранее заготовленными.

Только после отладки программы на машине задача может быть введена для автоматического решения. Однако из-за случайных сбоев могут получаться неправильные результаты. Для исключения такой возможности необходимо предусматривать либо приборный, либо программный контроль правильности работы машины.

§ 1. Разработка решающего алгоритма

Понятие *алгоритма* принадлежит к числу основных понятий математики, а сам термин происходит от имени средневекового узбекского математика Аль-Хорезми, который еще в IX веке разработал некоторые правила.

В настоящее время под *алгоритмом* принято понимать некоторую совокупность элементарных правил, предписывающих при тех или иных условиях выполнение определенных операций для решения задач некоторого данного типа. Тем самым исходная информация должна однозначно определять результат работы алгоритма.

По А. А. Маркову «...в математике под *алгоритмом* понимается точное предписание, определяющее вычислительный процесс, ведущий от варьируемых исходных данных к искомому результату».

Нужно отметить, что приведенные формулировки не являются точным математическим определением понятия *алгоритм*, они скорее толкуют значение этого слова, поясняя его смысл. И в то же время отражают то понятие алгоритма, которое стихийно складывалось и применялось в математике с древнейших времен.

Подчеркнем, что понятие алгоритма сводится к трем основным положениям: понятию текста, то есть того, над чем производятся преобразования; понятию правил преобразований текста, то есть описания того, как выполняются эти преобразования, и понятию схемы алгоритма, то есть способа задания порядка выполнения этих правил.

Для иллюстрации рассмотренных положений приведем простейший *алгоритм Евклида*, решающий задачи следующего типа:

Для данных двух натуральных чисел a , b найти их общий наибольший делитель.

Очевидно, различных задач такого типа существует столько, сколько различных пар чисел a , b .

Алгоритм имеет следующий вид.

У к а з а н и е 1. Обозревай два числа: a , b . Переходи к следующему указанию.

У к а з а н и е 2. Сравни обозреваемые числа ($a=b$, или $a < b$, или $a > b$); переходи к следующему указанию.

У к а з а н и е 3. Если обозреваемые числа равны, то каждое из них дает искомый результат. Процесс вычисления остановить. Если нет, переходи к следующему указанию.

Указание 4. Если первое обозреваемое число меньше второго, переставь их местами и продолжай обозревать их. Переходи к следующему указанию.

Указание 5. Вычитай второе из обозреваемых чисел из первого и обозревай два числа: вычитаемое и остаток. Переходи к указанию 2.

Итак, после того, как все пять указаний выполнены, надо опять возвратиться ко второму, потом дальше к третьему, четвертому, пятому и опять ко второму и т. д., пока не получатся равные числа, то есть пока не окажется выполненным условие, содержащееся в третьем указании; тогда процесс прекращается.

Таким образом, процесс применения алгоритма рассматривается как *потенциально осуществимый процесс*, ведущий после конечного (хотя бы и очень большого) числа шагов к искомому результату.

В приведенном описании алгоритма Евклида в качестве элементарных операций, на которые расчленяется процесс решения задачи, фигурирует вычитание двух чисел, сравнение двух чисел и перестановка двух чисел местами, но легко понять, что это расчленение может быть продвинуто и глубже. Так, например, указание 5 о вычитании двух обозреваемых чисел может быть само развернуто в систему указаний, описывающих алгоритм вычитания двух чисел. Однако в силу простоты правил арифметических действий в подобных случаях дальнейшая детализация алгоритма не проводится.

Большое значение имеет язык, с помощью которого описывается алгоритм; используемые понятия и терминология должны быть такими, чтобы исполнитель алгоритма, во-первых, его понял, а, во-вторых, имел бы технические возможности выполнить указания, содержащиеся в алгоритме.

Рассмотрим для примера задачу вычисления значений функции:

$$y = f(x) = \sin\left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{x^2}{1+x^2}\right) \quad (10.1)$$

для $x = x_0, x_0 + h, x_0 + 2h, \dots, x_0 + nh$, где x_0, h, x_1 — произвольные числа, удовлетворяющие неравенствам $h > 0; x_1 - x_0 > 0$;

$$n = E\left(\frac{x_1 - x_0}{h}\right)^*.$$

Если обозначить $f(x_0 + ih)$ через $y_i (i = 0, 1, 2, \dots)$, то алгоритм для решения этой задачи можно записать следующим образом.

1. Принять x равным x_0 (для краткости можно записывать: $x := x_0$).
2. Принять i равным 0 ($i := 0$).

* $E(A)$ — означает: целая часть A .

3. Вычислить $Y_i = \sin\left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{x^2}{1+x^2}\right)$.

4. Дать x новое значение, полученное из старого прибавлением h ($x := x+h$).

5. Если после этого стало $x > x_1$, то перейти к п. 8, в противном случае выполнить п. 6.

6. Дать i новое значение, полученное из старого прибавлением единицы ($i := i+1$).

7. Перейти к выполнению п. 3.

8. Остановиться.

Предписание, содержащееся в п. 3, фактически рассчитано на исполнителя, знакомого с термином \sin и числом π ; располагающего тригонометрическими таблицами или иными известными ему способами нахождения синусов. Несоблюдение по крайней мере одного из условий сделает алгоритм невыполнимым.

Однако при помощи небольшого изменения алгоритма мы можем ориентировать его и на менее квалифицированного исполнителя, если зададим значение числа $\pi = 3,1416$, а синус представим разложением в ряд Тейлора с точностью, допустим, до трех членов ряда.

$$\sin z = z - \frac{z^3}{6} + \frac{z^5}{120}$$

Новый вариант алгоритма запишется так:

1. $x := x_0$.

2. $i := 0$.

3. $z := \frac{3,1416}{4} \cdot \frac{x^2}{1+x^2}$.

4. $y_i := z - \frac{z^3}{6} + \frac{z^5}{120}$.

5. $x := x+h$.

6. Если после этого стало $x > x_1$, то перейти к п. 9, в противном случае выполнить п. 7.

7. $i := i+1$.

8. Перейти к выполнению п. 3.

9. Остановиться.

Не следует однако увлекаться особенной детализацией алгоритма: это можно осуществлять и на более поздних стадиях подготовки задачи к счету. В алгоритме иногда достаточно сослаться на название метода, который предлагается использовать в конкретной реализации.

Алгоритм, не перегруженный излишними подробностями, помогает составителю обзреть и осознать свой собственный замысел, увидеть места, подлежащие корректировке, дает возможность обсудить его со специалистами. Здесь очень важно найти разумный компромисс между желанием сделать алгоритм весьма об-

щим, и, с другой стороны, — выполнить его простым и быстро исполняемым на вычислительной машине.

Таким образом, довольно отчетливо выступают следующие черты решающих алгоритмов:*

Детерминированность алгоритма. Требуется, чтобы метод вычисления можно было сообщить другому лицу в виде конечного числа указаний о действиях на отдельных стадиях вычисления. Причем, вычисления согласно этим указаниям, не зависят от произвола вычисляющего лица и представляют собою детерминированный процесс, который может быть в любое время повторен и выполнен с тем же успехом и другим лицом.

Массовость алгоритма. Алгоритм — это единое предписание, определяющее вычислительный процесс, который может начинаться от различных исходных данных и ведет во всех случаях к соответствующему результату. Иными словами, алгоритм решает не одну лишь индивидуальную задачу, а некоторую серию однотипных задач.

Наконец, при разработке решающего алгоритма следует учитывать некоторые особенности, связанные с требуемой точностью вычислений, стоимостью всех работ и общим расходом времени на решение задачи.

Условия задачи, предназначенной для решения на ЭВМ, всегда содержат указания о требуемой точности решения. Только тот решающий алгоритм пригоден, который позволяет получить решение задачи с погрешностью, не превышающей допустимую. Кроме того, большое быстроедействие машин иногда позволяет повысить точность результатов за счет увеличения количества машинных операций. При этом, однако, увеличивается количество ячеек, необходимых для хранения исходных данных и промежуточных результатов, и значительно возрастает время, потребное для решения задачи.

Если задача должна быть решена в кратчайший срок, то ради сокращения общего расхода времени идут даже на увеличение так называемого машинного времени. В этом случае стараются использовать один из уже известных решающих алгоритмов, по возможности простой, не требующий большого времени на программирование.

Например, если нужно вычислить интеграл

$$J = \int_{x_1}^2 f(x) dx, \quad (10.2)$$

где J изображает величину заштрихованной площади (рис. 131), то можно воспользоваться одним из существующих методов приближенных вычислений, использующих конечную величину приращений переменной x в заданном интервале: метод прямоугольников,

* Б. А. Трахтенброт. «Алгоритмы и машинное решение задач». Физматгиз, М., 1960.

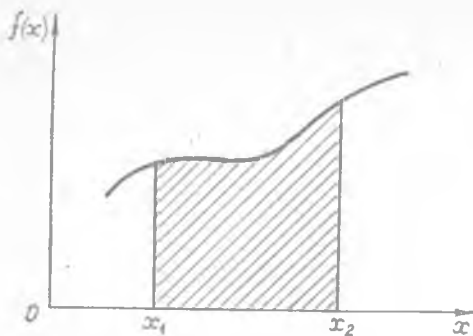


Рис. 131. К определению интеграла J

метод трапеций, метод Симпсона, метод Гаусса, метод Чебышева и т. д. При этом стараются выбрать метод, дающий наиболее короткую программу.

Если решение задачи не является срочным, то на первый план выступают соображения экономии материальных затрат. Например, для решения многовариантных задач целесообразно особенно тщательно разработать решающий алгоритм и программу, не жалея для

этого времени с тем, чтобы по возможности сократить расход дорогостоящего машинного времени. Особое внимание следует уделить тщательному анализу задачи и методов ее решения.

Рассмотрим следующий пример.

Пусть требуется вычислить величину натурального логарифма: $\ln(1+x)$ для значений x в интервале от 0 до 1.

Мы должны сделать выбор между следующими методами:

- записать в память машины таблицу значений $\ln(1+x)$, где x изменяется от 0 до 1 через 0,001 и пользоваться интерполяцией;
- использовать разложение в ряд

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots;$$

использовать разложение по непрерывным дробям

$$\ln(1+x) = \frac{x}{1 + \frac{1^2 x}{2 + \frac{1^2 x}{3 + \frac{2^2 x}{4 + \frac{2^2 x}{5 + \frac{3^2 x}{\dots}}}}}}$$

использовать приближение полиномами

$$\ln(1+x) = a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_6 x^6,$$

где $a_1 = 0,99990167$, $a_4 = 0,193761149$,
 $a_2 = 0,49787544$, $a_5 = 0,08556927$,
 $a_3 = 0,31765005$, $a_6 = 0,01833831$.

Этот полином с шестью коэффициентами позволяет определить величину $\ln(1+x)$ с абсолютной ошибкой, не превышающей 0,0000015.

Если взять полином с восемью коэффициентами, абсолютная ошибка будет еще меньше.

Метод с интерполяцией надо отбросить, так как, с одной стороны, он не очень точен, а, с другой стороны, таблица величин $\ln(1+x)$ займет в машине значительное место. Кроме всего прочего, может оказаться, что отыскивать значение в таблице гораздо дольше, чем каждый раз начинать работу сначала.

Если мы хотим вычислить $\ln(1+x)$ с девятью точными цифрами, выбранное полиномиальное приближение не позволяет получить желаемую точность. Напротив, два других метода дадут желаемый результат при условии, что мы вычислим достаточное число членов.

Тогда можно составить следующую таблицу:

x	Число членов, участвующих в вычислении $\ln(1+x)$ методом	
	непрерывных дробей	разложения в ряд
0,1	7	8
0,5	11	16
0,7	16	25
0,9	34	43

Эта таблица показывает, что разложение на непрерывные дроби — более быстрый метод, который из соображений точности и скорости счета следует выбрать для решения данной задачи.

Для некоторых задач, связанных с вводом очень больших количеств исходной информации, выдачей больших количеств результатов и выполнением малого количества операций, время решения определяется уже не быстродействием машины при выполнении операций, а временем, необходимым на ввод и вывод.

В последнее время в связи с трудностями, возникающими при разработке обобщенных алгоритмов, а также предположением, что далеко не для всякого класса задач возможно построение решающего алгоритма, вводится понятие диспозиции.

Диспозицией называют такие схемы описания задач, которые отличаются от алгоритмов тем, что в них, кроме предписаний выполнять данное преобразование текста по некоторому правилу, используются также и *разрешения* на некоторые преобразования.

Это понятие наиболее часто бывает необходимо при решении информационно-логических задач.

При диспозиции на каждом шаге процесса будет задаваться, что разрешается делать дальше. Это означает, что процесс реализации диспозиции не может быть оборван там, где есть возможность выполнять какие-либо преобразования текста. При таком соглашении предписание является вырожденным случаем разрешения, когда разрешается только одно преобразование.

Сама диспозиция не является, вообще говоря, алгоритмом. Но она должна быть задана таким образом, чтобы можно было построить алгоритм, перерабатывающий диспозицию в алгоритм, решающий ту же задачу. При этом можно ставить вопрос о получении всех возможных алгоритмов по данной диспозиции или хотя бы одного из них.

Таким образом, диспозиция в некотором отношении имеет сходство с какой-либо системой исчисления; определен входной язык,

основные правила и законы, но разрешены различные способы преобразования исходной информации, ведущие к одному и тому же результату.

Литература: [2], [4], [5], [27], [43].

§ 2. Составление блок-схемы программы

Составление программы обычно представляет собой довольно сложную и трудоемкую работу. Поэтому для облегчения программирования на основании выбранного решающего алгоритма задачу расчлняют на более простые этапы и для каждого этапа составляют отдельную программу. Иначе говоря, составляется подетальный хронологический план решения задачи.

В тех случаях, когда необходимо дать общее и, по возможности, более наглядное представление о программе решения задачи, разрабатывают так называемую блок-схему программы. Для этого весь процесс решения задачи представляют в виде отдельных этапов, каждый из которых изображают прямоугольником (блоком) с записью содержания этапа внутри него. Блоки соединяют стрелками, указывающими, от какого блока и куда передается управление в ходе вычислений. Далее составляют программу для каждого блока.

Рассмотрим несколько примеров составления блок-схем программ.

Пример 1. Составить блок-схему программы вычисления многочлена

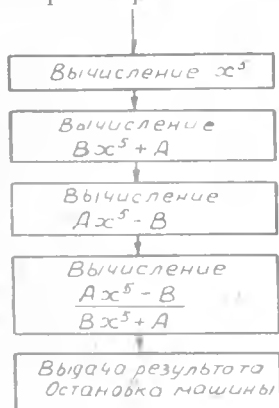


Рис. 132. Блок-схема программы вычисления

$$y = \frac{Ax^5 - B}{Bx^5 + A}.$$

$$y = \frac{Ax^5 - B}{Bx^5 + A}.$$

Блок-схема программы представлена на рис. 132.

Пример 2. Вычислить величины $y_i = Ax_i + B$ для значений $i = 1, 2, 3, \dots, 10$.

Блок-схема программы представлена на рис. 133 и дополнительных разъяснений не требует.

Пример 3. Вычислить корень квадратный $x = \sqrt{A}$ методом последовательных приближений по формуле

$$x_{n+1} = \frac{1}{2} \left[x_n + \frac{A}{x_n} \right],$$

где x_{n+1} — очередное приближение.

Исходя из произвольного начального значения $x_0 > \sqrt{A}$ (например, $\frac{A}{2}$) машина должна последовательно вычислять значения

x_1, x_2, x_3, \dots и т. д. до тех пор, пока разность между двумя последовательными результатами не станет меньше заданной точности (ϵ).

Блок-схема, соответствующая этому алгоритму, имеет следующий вид (рис. 134).

Необходимо отметить, что для больших и сложных задач блок-

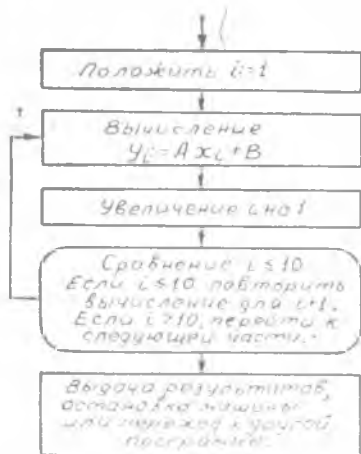


Рис. 133* Блок-схема программы вычисления

$$y_i = Ax_i + B.$$

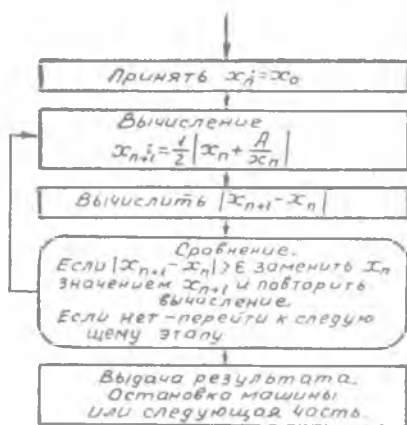


Рис. 134. Блок-схема вычисления корня квадратного

$$x = \sqrt{A}.$$

схемы получаются очень громоздкими и работать с ними неудобно. Поэтому во многих случаях, используя операторный метод программирования, составляют логическую схему программы (см. § 5), являющуюся основным рабочим пособием при программировании.

Литература: [2], [4], [5], [27], [42].

§ 3. Выбор масштабов

Выше уже говорилось о том, что машины, работающие с фиксированной запятой («Урал-1», «Минск-1» и др.), могут оперировать только с числами, которые по абсолютной величине меньше единицы. Но на практике чаще приходится иметь дело с задачами, числовые данные которых выходят из диапазона чисел, представляемых в машине. В этих случаях прибегают к специальным методам масштабирования, с помощью которых преобразовываются соответствующим образом исходные данные задачи и исходные выражения и формулы.

Метод постоянных масштабов состоит в том, что для исходных данных задачи, а также для промежуточных и окончательных результатов вычислений подбираются масштабы, в которых эти величины вводятся в машину и фигурируют в процессе решения

задачи. При этом под масштабом величины x_i понимаются делитель M_x такой, что величина x_i , определяемая по формуле

$$\bar{x}_i = \frac{x_i}{M_x},$$

удовлетворяет неравенству $|\bar{x}_i| < 1$.
Отсюда

$$M_x = \frac{x_i}{x_i}, \quad (10.3)$$

где x_i — представление числа x_i в машине.

Чаще всего масштабы выбираются равными целым степеням десяти. В этом случае удобен переход от x к \bar{x} , который будет заключаться в переносе запятой десятичного числа на определенное количество порядков влево или вправо.

Пример 1. Пусть некоторая величина x в процессе решения задачи изменяется в интервале $17,5 < x \leq 130$. Требуется подобрать масштаб для величины x в виде степени числа 10.

Нетрудно видеть, что неравенство $|\bar{x}| < 1$ выполняется, если принять $M_x = 10^3$. Масштабированная величина \bar{x} будет изменяться в интервале $0,0175 \leq \bar{x} \leq 0,130$.

Подбору масштабов в большинстве случаев должен предшествовать анализ исходных уравнений и формул для определения границ изменения переменных, входящих в задачу. Даже в простых задачах определение границ изменения переменных может представить значительные трудности, которые возрастают с увеличением числа независимых переменных. В связи с этим иногда прибегают к проведению приближенных расчетов при некоторых допущениях в постановке задачи.

Пример 2. Требуется вычислить значения функции

$$y = \frac{3\sqrt{1+x^2}}{10x}$$

при значениях аргумента x , заключенных в интервале $0,1 < x \leq 9$.

Найдем границы изменения y . Для этого можно воспользоваться первой производной от функции y по x :

$$y' = \frac{3x^2 - (1+x^2)}{10x^2\sqrt{1+x^2}} = -\frac{1}{10x^2\sqrt{1+x^2}}.$$

Из полученной формулы следует, что при любом значении x будет неравенство $y' < 0$. Отсюда можно заключить, что функция y монотонно убывает и, следовательно, достигает своих экстремальных значений на концах интервала, то есть при $x_1 = 0,1$ и $x_2 = 9$. Подсчет показывает, что эти значения равны $y_1 \approx 3$; $y_2 \approx 0,31$. Итак, при $0,1 \leq x \leq 9$ функция y изменяется в промежутке $0,31 \leq y \leq 3$, поэтому можно принять $M_x = 10^1$ и $M_y = 10^1$.

Введем масштабы в исходное выражение функции y . Полагая $x = 10^1 \bar{x}$ и $y = 10^1 \bar{y}$, имеем

$$(10\bar{y}) = \frac{3\sqrt{1+(10\bar{x})^2}}{10 \cdot (10\bar{x})}$$

После преобразования окончательно получим

$$\bar{y} = \frac{0.03 \sqrt{0.01 + \bar{x}^2}}{\bar{x}}.$$

Результат вычисления функции y будет в масштабе $M_y = 10^1$, который используется для определения истинного значения y .

Следует заметить, что при составлении программы для машины с фиксированной запятой нужно соблюдать такую последовательность операций, при которой ни один из промежуточных результатов не мог бы получиться больше единицы. В противном случае наступит переполнение разрядной сетки сумматора.

При выборе масштабов необходимо также всегда иметь в виду, что с увеличением масштаба M_x прямо пропорционально увеличивается и абсолютная погрешность представления чисел в машине. Это объясняется, во-первых, тем, что в ячейках памяти машины имеется ограниченное количество разрядов для представления чисел и, во-вторых, тем, что при переводе чисел в двоичную систему в большинстве получают бесконечные дроби, которые мы обрываем на определенном разряде после запятой.

Метод переменных масштабов позволяет повысить точность представления величин в машине. В этом случае масштабы, выбранные оптимальными в начале решения задачи, не остаются постоянными в процессе вычислений. Для каждой части решающего алгоритма задается свой набор масштабных коэффициентов, а для соединения частей алгоритма в одно целое добавляют к нему участки, обеспечивающие переход от одних наборов масштабных коэффициентов к другим.

Однако при этом усложняется программа и возникает трудность заблаговременного определения поведения некоторых величин.

Метод плавающих масштабов обеспечивает автоматическое изменение масштабов для каждого этапа вычислений в зависимости от текущих значений переменных величин.

В этом случае часть величин, участвующих в решении, представляют в виде

$$x_i = \bar{x}_i \cdot 2^{p_i}. \quad (10.4)$$

где p_i — целые числа, а \bar{x}_i удовлетворяет неравенству

$$|\bar{x}_i| < 1.$$

Масштабными множителями являются величины 2^{p_i} . Величины \bar{x}_i хранятся в двух ячейках каждая; одна ячейка отводится для \bar{x}_i , а другая для p_i . Решение задачи разбивается на этапы, в каждом из которых масштабы остаются постоянными, а при переходе от одного из них к другому определенная часть программы исследует величины x_i и при необходимости изменяет некоторые из чисел p_i .

Если предусмотреть в программе возможность изменения масштабов при выполнении каждой операции, то этот метод сведется к *программному введению плавающей запятой*.

При методе плавающих масштабов масштабированию могут подвергаться не все участвующие в вычислениях величины, а лишь те, для которых это необходимо.

Возможности некоторых машин позволяют переходить к пересчету масштабов автоматически, например, по сигналу переполнения разрядной сетки.

Использование этого метода связано также с увеличением времени и труда на подготовку и решение задачи. Поэтому его применяют в тех случаях, когда требуется очень высокая точность вычислений или в случае, когда задача вообще не может быть решена другими методами.

Литература: [3], [39], [41], [45].

§ 4. Принципы программирования

Для того, чтобы составить рабочую программу заданного вычислительного процесса нужно хорошо знать машинный язык, специфичный для той конкретной машины, на которой будет решаться задача.

Машина выполняет заданную операцию (или группу операций) под воздействием управляющей *команды*, которая представляет собой элементарное предписание для машины, заданное цифровым кодом. Каждой вычислительной машине соответствует определенный набор различных команд или *система команд*.

Программа, таким образом, должна представлять собой совокупность машинных команд, определенная последовательность выполнения которых обеспечит решение задачи.

Все команды можно подразделить на группы, в зависимости от характера выполняемых операций.

Арифметические команды. К этой группе относятся команды, задающие простые арифметические операции: сложение, вычитание, умножение, деление; комбинированные и некоторые другие.

Логические команды. Сюда относятся команды сравнения, формирования, выделения части числа и т. п.

Команды переноса обеспечивают перенос информации из оперативного накопителя в устройство счета, перенос из одного ЗУ в другое, чтение данных, вывод результатов.

Команды перехода или, как их называют, передачи управления характеризуются тем, что с их помощью можно изменить нормальную последовательность выполнения команд машиной и передать управление любой, заранее заданной команде.

К ним относятся команды условного перехода, безусловного перехода, команды организации циклических вычислительных процессов.

Изменение команд

Во многих случаях очень удобным методом при программировании является введение команд, автоматически изменяющихся в процессе вычислений. При этом может изменяться команда целиком, код операции или только адресная часть команды.

Рассмотрим несколько возможных случаев.

Вычисление адресов в чистом виде. В арифметическое устройство вызывают команду как обычное число. К части команды, соответствующей адресу, прибавляют посредством команды обычного сложения единицу (или другое фиксированное число) и полученную таким образом команду с увеличенным адресом отсылают на ее исходное место в программе. Таким путем с помощью одной команды можно обеспечить, например, выборку чисел из группы последовательных ячеек памяти.

Изменение команд в устройстве управления. В некоторых машинах (например, «Урал-1», «Урал-2») регистр команд (РК) устройства управления представляет собой сумматор. В этом случае изменение команды происходит путем ее суммирования на регистре команд с содержимым заданной ячейки памяти.

Применение индексного регистра. В машинах, оборудованных специальными индексными регистрами, предусматривают операцию, называемую изменением команды на содержимое индексного регистра.

Эта операция заключается в том, что содержимое регистра команд складывается (или вычитается) с содержимым индексного регистра, причем результат остается в регистре команд. Получаемые при этом адреса команды называются *исполнительными* адресами.

Операции с адресами второго ранга. У этого вида команд в коде адреса указывается только номер ячейки накопителя, в которой хранится адрес числа, участвующего в выполняемой операции. Такой способ называют подстановкой по адресу. Команда с подстановкой по адресу (II ранга) аналогична тому, что в первый адрес вложен второй. Это позволяет при неизменном виде основной команды фактически производить изменение адресов.

Могут быть использованы и другие приемы.

Вспомогательные команды

К вспомогательным командам относятся команды сдвига числа в арифметическом устройстве на заданное число разрядов влево или вправо, нормализации, остановки машины и т. д.

Как уже отмечалось ранее (гл. VIII, § 1), каждая команда должна состоять из кода операции и одного или нескольких адресов. В последующем изложении мы будем, в основном, рассматривать принципы программирования применительно к одноадресным машинам с командами вида:

учитывая, что сумматор таких машин является накапливающим. Введем следующие обозначения:

- S — сумматор машины;
- $(S)_0$ — содержимое сумматора до выполнения операции;
- (S) — содержимое сумматора после выполнения операции;
- a — номер ячейки накопителя;
- (a) — содержимое ячейки a накопителя;
- $\langle x \rangle$ — ячейка, в которой содержится величина x .

Система команд вычислительной машины обычно задается в виде таблицы, содержащей общие виды команд, описания действий машины, определяемых командами, и т. д.

Рассмотрим несколько самых употребительных команд некоторой условной машины (таблица 13).

Составление программы для машинного решения задачи если и не сопряжено с большим умственным напряжением, то является достаточно трудоемким процессом и требует от программиста извстных знаний и навыков, большого внимания и аккуратности.

Процесс программирования включает в себя следующие части:
— составление собственно программы (выбор необходимых операций, составление команд, установление вспомогательных чисел и т. п.);

— распределение памяти между материалом, относящимся к решению задачи (командами, исходными данными, промежуточными и окончательными результатами).

Составление программы и распределение памяти взаимно связаны. Нельзя составить программу, не зная адресов исходных и вспомогательных чисел и адресов промежуточных и окончательных результатов. С другой стороны, не зная заранее количества команд программы, особенно при составлении длинных программ, весьма трудно заранее произвести распределение поля оперативного накопителя. Более того, могут быть случаи, когда материал вообще не размещается в оперативной памяти машины и приходится прибегать к помощи внешних накопителей.

Чтобы решить эти вопросы и не связывать весь исходный материал с действительным полем оперативного накопителя, при программировании можно использовать так называемую *систему условных (символических) адресов или буквенно-числовых обозначений ячеек*. С этой целью поле оперативного накопителя условно разделяют на несколько участков, полагая при этом, что каждый из участков может содержать любое количество ячеек и независим от других. Ячейки участка, на котором предполагается запись программы, нумеруют, например, условными числами $k+0000$, $k+0001$, $k+0002$ и т. д. Аналогичным образом поступают

Таблица 13

Код опер.	Условное обозначение	Наименование операции	Операция
01	Сл. a	Сложение	$(S)_0 + (a) = (S)$
	Число в сумматоре алгебраически складывается с числом в ячейке a		
02	Чт. a	Посылка числа в сумматор	$\bullet 0 + (a) = (S)$
	Число из ячейки a заносится в сумматор		
03	Выч. a	Вычитание	$(S)_0 - (a) = (S)$
	Из числа в сумматоре вычитается число в ячейке a		
06	Умн. a	Умножение	$(S)_0 \cdot (a) = (S)$
	Число в сумматоре умножается на число в ячейке a		
07	Дел. a	Деление	$(S)_0 : (a) = (S)$
	Число в сумматоре делится на число в ячейке a		
16	Зп. a	Запись в ячейку	$(S)_0 \rightarrow (a)$
	Число, находящееся в сумматоре, записывается в ячейку a		
32	Пч.	Печать	$(S)_0 \rightarrow \text{Печать}$
	Содержимое сумматора выводится на печать		
37	Ост.	Остановка машины	

и с ячейками других участков. Например, ячейкам участка для размещения исходных данных присваивают условные номера $a+0000$, $a+0001$, $a+0002$ и т. д., а рабочим ячейкам — $b+0000$, $b+0001$ и т. д. (рис. 135).

После того, как программа будет полностью составлена,

буквам k , a и v придадут конкретные числовые значения, т. е. переходят к действительным адресам.

Рабочая программа и весь исходный материал переписываются на специальные бланки, причем нумерация ячеек производится по восьмеричной системе.

Предположим, что оперативный накопитель содержит 2048 ячеек, пронумерованных восьмеричными числами начиная с 0000 и кончая 3777.

Пусть ячейки, в которых размещаются команды программы, пронумерованы условными номерами от $k+0000$ до $k+0100$, рабочие ячейки — номерами от $v+0000$ до $v+0021$, а исходные и вспомогательные числа размещаются в условных ячейках, начиная от $a+0000$ до $a+0015$.

Если принять, что в нашем случае для размещения команд программы выделяется участок оперативного накопителя, начиная с ячейки № 0021, то, очевидно, вся программа может быть записана в ячейках № 0021—0121. Адреса этих ячеек легко получить из условных, положив $k = 0021$. Далее поступают следующим образом: принимая $a = 0122$ (адрес первой свободной

ячейки после той, в которой размещена последняя команда), определяют адреса ячеек для записи исходных и вспомогательных чисел. Очевидно, такими будут являться № 0122—0137. Приняв № 0140 за значение буквы v , определяют адреса рабочих ячеек № 0140—0161.

При размещении в оперативной памяти машины программы, числового материала и рабочих ячеек рекомендуется оставлять между ними резерв до десятка и более свободных ячеек, который бывает необходим при внесении изменений в программу.

Применение условных адресов дает следующие преимущества.

1. Составление команд и распределение памяти выполняется раздельно, что значительно облегчает труд программиста.

2. Возможно разделение труда между квалифицированным программистом (составляющим программу и выполняющим распределение памяти) и группой менее квалифицированных работников, на которых возлагается присвоение действительных адресов.

3. Процесс присвоения действительных адресов может быть автоматизирован, т. е. может выполняться самой машиной по спе-

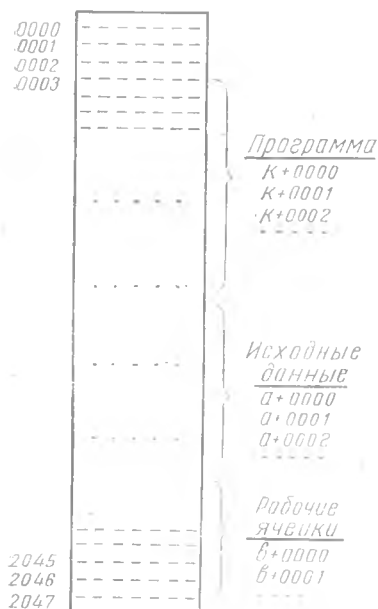


Рис. 135. Рабочее поле оперативного накопителя.

циальной программе. Примером может служить «Программа Автоматического Присвоения Адресов» (ПАПА).

Если программа и числовой материал не могут быть полностью размещены в оперативном накопителе, следует некоторую часть их хранить во внешних запоминающих устройствах. При распределении материала между оперативным и внешним накопителем надо в любом случае с максимально возможной эффективностью использовать оперативную память машины, так как частые обращения к внешним накопителям резко снижают скорость вычислительного процесса в целом.

С точки зрения организации вычислительного процесса программы подразделяются на прямые, циклические и разветвляющиеся.

Рассмотрим теперь общие принципы программирования на примере составления прямой программы вычисления некоторой функции $y=f(x)$.

Пусть требуется вычислить функцию

$$y = f(x) = \frac{C_0 x^2 - x}{C_1 x^2 + C_2} \cdot x \quad (10.5)$$

для значения независимой переменной $x=x_1$, где C_0, C_1, C_2 — численно заданные постоянные коэффициенты.

Прежде всего, разместим исходные величины в ячейках оперативного накопителя со следующими условными адресами:

$a + 0000$	$a + 0001$	$a + 0002$	$a + 0003$
C_0	C_1	C_2	x_1

Размещение команд в оперативном накопителе начнем с условной ячейки $k+0000$, а рабочими ячейками будем считать ячейки с номерами от $v+0000$ и далее.

Установим следующий порядок вычислений. Для уменьшения количества команд вначале вычислим знаменатель функции, а затем ее числитель. Далее, поскольку величина x_1^2 встречается в выражении (10.5) несколько раз, целесообразно ее вычислить один раз и поместить в рабочую ячейку накопителя для дальнейшего использования.

Теперь последовательность команд будет следующей.

Первая команда. Послать в сумматор содержимое ячейки $a+0003$, то есть число x_1 . Для этого воспользуемся командой 02, так как при этом одновременно осуществляется предварительная очистка сумматора.

$k+0000) \quad 02 \quad a+0003.$

Вторая команда. Умножить содержимое сумматора на число, находящееся в ячейке $a+0003$.

$k+0001) \quad 06 \quad a+0003.$

После выполнения этой команды в сумматоре, очевидно, будет образована величина x_1^2 , которую необходимо «записать» в рабочую ячейку.

Третья команда. Записать содержимое сумматора в ячейку $v+0000$.

$k+0002) \quad 16 \quad v+0000.$

После выполнения машиной команды записи (16) содержимое сумматора не изменяется, что позволяет продолжать вычисления.

Четвертая команда. Умножить содержимое сумматора на число в ячейке $a+0001$.

$k+0003) \quad 06 \quad a+0001.$

Результатом этой операции будет число $C_1x_1^2$.

Пятая команда. Прибавить к числу в сумматоре число из ячейки $a+0002$, то есть C_2 .

$k+0004) \quad 01 \quad a+0002.$

Выполнив эти команды, машина определит знаменатель выражения (10. 5). Содержимое сумматора теперь не может быть использовано до тех пор, пока не будет определен числитель. Поэтому значение знаменателя следует записать, как промежуточный результат вычислений, в рабочую ячейку.

Шестая команда. Содержимое сумматора записать в рабочую ячейку $v+0001$.

$k+0005) \quad 16 \quad v+0001.$

Составим команды для определения числителя.

Седьмая команда. Послать в сумматор число из ячейки $v+0000$, то есть x_1^2 .

$k+0006) \quad 02^* \quad v+0000.$

Восьмая команда. Умножить число в сумматоре на число C_0 .

$k+0007) \quad 06 \quad a+0000.$

После выполнения этих двух команд в сумматоре будет произведение $C_0x_1^2$.

Девятая команда. Из содержимого сумматора вычесть число, записанное в ячейке $a+0003$.

$k+0010) \quad 03 \quad a+0003.$

Полученное значение числителя $C_0x_1^2 - x_1$ можно сразу разделить на вычисленный ранее знаменатель.

Десятая команда. Число в сумматоре разделить на число, записанное в ячейке $v+0001$.

$k+0011) \quad 07 \quad v+0001.$

Теперь остается умножить полученное значение на x_1 .

Одиннадцатая команда. Число в сумматоре умножить на число, находящееся в ячейке $a+0003$.

$k+0012) \quad 06 \quad a+0003.$

Полученное значение функции $y_1 = f(x_1)$ можно вывести на печать:

$k+0013)$ 32 0000

и затем остановить машину.

$k+0014)$ 37 0000.

Итак, составление программы в условных адресах закончено. Программа обычно записывается на специальных бланках и будет иметь следующий вид (см. таблицу 14).

Таблица 14

Номера ячеек	Команды	Результаты операций в сумматоре	Содержимое раб. яч.	
			$v + 0000$	$v + 0001$
$k+0000$	02 $a+0003$	x_1		
$k+0001$	06 $a+0003$	x_1^2		
$k+0002$	16 $b+0000$	x_1^2		
$k+0003$	06 $a+0001$	$C_1 x_1^2$		
$k+0004$	01 $a+0002$	$C_1 x_1^2 + C_2$		
$k+0005$	16 $b+0001$	$C_1 x_1^2 + C_2$		
$k+0006$	02 $b+0000$	x_1^2	x_1^2	$C_1 x_1^2 + C_2$
$k+0007$	06 $a+0000$	$C_0 x_1^2$		
$k+0010$	03 $a+0003$	$C_0 x_1^2 - x_1$		
$k+0011$	07 $b+0001$	$(C_0 x_1^2 - x_1) / (C_1 x_1^2 + C_2)$		
$k+0012$	06 $a+0003$	$y_1 = f(x_1)$		
$k+0013$	32 0000	Печать		
$k+0014$	37 0000	Останов		

Теперь нужно полученную программу переписать уже в действительных адресах. Для этого предположим, что запись команд программы в оперативный накопитель машины будет производиться, начиная с ячейки № 0020. Очевидно, в этом случае $k=0020$ и вся программа разместится в ячейках: № 0020—№ 0034. Далее, приняв $a=0035$, выделим ячейки для размещения исходных чисел: № 0035 — № 0040. Наконец, полагая $v=0041$, определим рабочие ячейки: № 0041 и № 0042.

Имея значения: $k=0020$, $a=0035$ и $v=0041$, нетрудно переписать программу в действительных адресах. Окончательный вид программы решения задачи приведен в таблице 15.

Для решения задачи программу и исходные величины необходимо поместить в заданные ячейки накопителя. Это можно сделать путем последовательного ввода команд с пульта управления. Однако во многих случаях ввод в машину программы и числового материала осуществляется с перфоленты или перфокарт, на ко-

Номера ячеек	Содержимое ячеек	Номера ячеек	Содержимое ячеек
0020	02 0040	0032	06 0040
0021	06 0040	0033	32 0000
0022	16 0041	0034	37 0000
0023	06 0036	0035	C_0
0024	01 0037	0036	C_1
0025	16 0042	0037	C_2
0026	02 0041	0040	x_1
0027	06 0035	0041	} Рабочие ячейки
0030	03 0040	0042	
0031	07 0042		

торых вся исходная информация фиксируется в виде соответствующих пробивок.

Следует отметить, что при программировании сложных задач общее число команд может доходить до нескольких сотен. Во многих случаях используются специальные приемы построения так называемых циклических и разветвляющихся вычислительных процессов. Все это делает программирование достаточно длительным и трудоемким процессом, требующим определенных навыков и предельного внимания.

Более подробные сведения о программировании задач для решения на ЭВМ «Проминь» изложены в ч. II настоящего пособия.

Литература: [27], [37], [39], [42].

§ 5. Операторное программирование

Непосредственное составление программ встречает значительные трудности, которые возрастают по мере усложнения задач, увеличения количества операций, необходимых для их решения. Естественно, что перед программистами возник вопрос, нельзя ли вычислительный процесс расчленить на простые части и затем для каждой такой части составить свою программу, а программу для решения задачи получить соединением частных программ.

Действительно, всякий вычислительный процесс состоит из ряда более или менее самостоятельных этапов, чередующихся в определенной последовательности, зависящей от содержания и характера решаемой задачи.

Например, вычислительный процесс решения квадратного уравнения

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (10.6)$$

по общеизвестной формуле

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

состоит из следующих этапов:

1 — арифметический этап: подсчет величины $d = b^2 - 4ac$;
 2 — логический этап: проверка знака полученной величины d и определение дальнейшего направления вычислений. В случае $d \geq 0$ — переход к третьему этапу, а в случае $d < 0$ — переход к четвертому этапу;

3 — арифметический этап: нахождение действительных чисел

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{d}}{2a}; \quad x_2 = \frac{-b - \sqrt{d}}{2a};$$

4 — арифметический этап: нахождение комплексных чисел

$$x_1 = -\frac{b}{2a} + i \frac{\sqrt{|d|}}{2a}; \quad x_2 = -\frac{b}{2a} - i \frac{\sqrt{|d|}}{2a}.$$

Описанные этапы принято называть *операторами*, а последовательность арифметических и логических операторов, описывающих вычислительный процесс, с указанием порядка их выполнения, называют *схемой счета*. При этом возможные переходы от одного оператора к другому в схемах счета обозначаются стрелками.

Обозначив операторы буквами (арифметические — A_1, A_2, \dots, A_n , логические — P_1, P_2, \dots, P_n), запишем схему счета для только что рассмотренной задачи в виде

$$A_1 \rightarrow P_2 \begin{cases} \nearrow A_3 \\ \searrow A_4 \end{cases}, \quad (10.7)$$

где оператор A_1 соответствует первому этапу, оператор P_2 — второму этапу, оператор A_3 — третьему, оператор A_4 — четвертому. Схема счета описывает общий ход решения задачи независимо от вычислительного аппарата, с помощью которого предполагается ее решение, и является формальной записью последовательности арифметических и логических операторов.

Однако действий, представленных арифметическими и логическими операторами, недостаточно для того, чтобы решить задачу на электронной автоматической вычислительной машине. Вычислительному процессу, осуществляемому на такой машине, присущи еще некоторые этапы. К их числу относится, прежде всего, этап (соответственно, оператор) переноса Π с перфоленты в память машины всего материала, относящегося к решению задачи; затем этап (оператор) перевода десятичных чисел в двоичную систему счисления (его можно считать арифметическим оператором A). Наконец, когда задача решена, полученные результаты должны быть преобразованы в десятичную систему счисления (еще один арифметический оператор A) и выданы на печать (еще один оператор переноса Π), после чего машина должна быть остановлена (оператор останова \mathcal{A}).

Совокупность возможных операторов определяется особенностями машины, на которой решается задача, но основные положения операторного программирования справедливы для всех элек-

ронных машин. Следует отметить, что этапы вычислительного процесса, связанные со спецификой машины, не находят отражения в схеме счета. Последняя не дает также указаний о порядке управления автоматическим процессом при решении задачи на машине. Поэтому возникает необходимость перехода от схемы счета к *логической схеме программы*, описывающей автоматический процесс вычислений. Логическая схема программы получается путем дополнения схемы счета операторами, учитывающими специфику машинного счета.

Так, для нашего примера (10.6) после дополнения полученной схемы счета (10.7) специальными операторами получим:

$$P_0 \rightarrow A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow P_3 \begin{array}{c} \swarrow A_4 \\ \searrow A_5 \end{array} \rightarrow A_6 \rightarrow P_7 \rightarrow Y_8. \quad (10.8)$$

Таким образом, в общем случае операторное программирование состоит в следующем:

вычислительный процесс, необходимый для решения задачи, расчленяется на арифметические и логические операторы;

каждый оператор обозначают буквой и составляют схему счета;

схема счета дополняется операторами, специфичными для машинного счета, то есть составляется логическая схема программы;

каждый оператор в программе представляется группой команд; объединяя эти группы в порядке, указанном логической схемой программы, получают искомую программу решения задачи. Обычно программы составляются вначале в условных адресах;

полученную программу и исходные данные размещают в накопителях;

переходят от условных к действительным адресам, в результате чего получают рабочую программу.

При составлении логических схем программ чаще всего встречаются с операторами, для которых введены стандартные обозначения.

Для удобства записи операторы, образующие логическую схему, располагают в одну строку. При этом приняты следующие правила.

1. Порядковый номер оператора в данной схеме изображается нижним индексом оператора. Нумерация операторов — сквозная.

2. Если оператор зависит от параметра, то этот параметр изображается верхним индексом оператора (например, A_2^i , P_{10}^i и т. п.).

3. Если знаки двух операторов стоят в схеме рядом, то оператору, записанный слева, передает управление оператору, записанному справа.

4. Если между двумя записанными рядом знаками операторов стоит точка с запятой, то от оператора, записанного слева, нет передачи управления оператору, записанному справа.

5. Передача управления оператору, записанному не рядом справа, обозначается стрелкой. Например, полученная ранее схема (10. 8) будет выглядеть так:

$$P_0 A_1 A_2 P_3 A_4; \overbrace{A_5 A_6 P_7 Y_8} \quad (10.9)$$

Во многих случаях для упрощения логической схемы программы удобно объединить элементарные операторы в группу и обозначать ее одной буквой. Такую группу элементарных операторов называют обобщенным оператором и обозначают буквой Q .

В состав обобщенного оператора могут входить элементарные операторы различных видов.

Проиллюстрируем операторное программирование на примере.

Требуется составить логическую схему программы для вычисления действительного значения функции

$$y = \sqrt{x^2 + x - 10} + \ln(15 - x^2 - x) \quad (10.10)$$

по заданному значению независимой переменной x . Вводим обозначение

$$z = x^2 + x, \quad (10.11)$$

после чего формула (10. 10) принимает следующий вид:

$$x = \sqrt{z - 10} + \ln(15 - z). \quad (10.12)$$

Оператор P_0 вводит программу и исходные данные в память машины; A_1 переводит исходные данные в двоичную систему счисления. Оператор A_2 вычисляет величину z по формуле (10. 11). Оператор P_3 проверяет выполнение логического условия:

$$z - 10 < 0. \quad (10.13)$$

Если это условие не выполнено, то $z - 10 > 0$ и $\sqrt{z - 10}$ имеет действительное значение. Оператор P_4 проверяет выполнение условия:

$$z - 15 < 0. \quad (10.14)$$

Если это условие выполнено, то $\ln(15 - z)$ имеет действительное значение. Если корень и логарифм действительны, то оператор A_6 вычисляет значение функции y . В противном случае оператор P_5 выдает на печать некоторый набор цифр, являющийся признаком того, что функция y действительного значения не имеет. Оператор A_7 переводит результат (если y — действительное число) в десятичную систему счисления; P_8 выдает его на печать; оператор Y_9 останавливает машину.

Логическая схема программы имеет такой вид:

$$P_0 A_1 A_2 P_3 P_4 P_5; \overbrace{A_6 A_7 P_8 Y_9} \quad (10.15)$$

В заключение можно сказать, что операторное программирование имеет большие преимущества перед непосредственным программированием: облегчается работа по составлению программы; значительно уменьшается количество ошибок при программировании; наличие логической схемы программы и описания входящих в нее операторов облегчает проверку готовых программ; появляется возможность возобновлять работу по составлению программы после длительного перерыва или поручать продолжение начатой работы другому программисту без необходимости для последнего читать ранее составленную часть программы.

Литература: [27], [39], [40], [41], [42].

§ 6. Библиотека стандартных подпрограмм

При численных решениях самых разнообразных задач часто приходится вычислять значения элементарных функций, таких, например, как $\sin x$, $\ln x$, \sqrt{x} и т. д. Некоторые вычислительные машины («Проминь», БЭСМ и др.) имеют специальные устройства для вычисления значений часто встречающихся функций. Значение любой из этих функций вычисляется машинами автоматически под воздействием одной, соответствующей данной функции команды.

Однако ряд машин (в том числе, «Урал», «Минск» и др.) не имеет такого устройства, что вызывает известные неудобства при программировании. При подготовке программы решения новой задачи программисту необходимо каждый раз заново составлять команды для вычисления указанных функций. Чтобы этого не делать, для вычислений часто встречающихся функций составляют раз и навсегда отдельные программы, которые получили название стандартных подпрограмм. Коллекцию (или собрание) стандартных подпрограмм называют библиотекой стандартных подпрограмм. Библиотечные подпрограммы при подготовке решения новой задачи включаются в состав основной программы как ее отдельные, логически завершенные части.

Библиотеку стандартных подпрограмм можно значительно расширить, включив в ее состав подпрограммы других, также часто встречающихся вычислительных процессов. Например, могут быть составлены подпрограммы для известных численных методов решения систем алгебраических, дифференциальных уравнений, вычислений интегралов и многих других.

Использование тщательно проверенных и отлаженных подпрограмм не только облегчает сам процесс программирования, но и значительно уменьшает возможность появления ошибок в программе.

Библиотечные подпрограммы в основном можно подразделить на два типа: замкнутые и открытые.

Более надежно производить перепись и видоизменение команд подпрограммы с помощью самой машины. Для этого составляют специальные программы, называемые составляющими или объединяющими.

Применяется также метод автоматизированного обращения к подпрограммам. Для этого все подпрограммы записываются в одном из внешних запоминающих устройств машины. Кроме основной выполняемой программы в оперативный накопитель вводят специальную интерпретирующую программу, назначение которой состоит в вызове подпрограмм в оперативный накопитель; в переработке их (если такая требуется) в соответствии с местом оперативного накопителя, на котором они размещаются; в обеспечении переходов от основной программы к подпрограммам и обратно.

В основной программе должны быть предусмотрены специальные команды для перехода к интерпретирующей программе и обеспечения ее работы.

Библиотека стандартных подпрограмм в любом случае должна иметь каталог, в котором указаны номера всех подпрограмм, тип (замкнутая или открытая) каждой из них, приведены формулы, для которых составлена каждая подпрограмма.

Литература: [27], [37], [42], [45].

§ 7. Контроль за подготовкой и решением задач на машине

На электронных вычислительных машинах решаются задачи, иногда требующие для получения результатов многих миллионов арифметических действий. Ошибка в программе или неправильность работы машины, естественно, приводят к неправильному ответу. Предварительная проверка программы не гарантирует устранения всех ошибок. К тому же при решении задачи в самой машине могут возникать как систематические (при наличии неисправности отдельных устройств машины), так и случайные сбои. Отсюда становится очевидной необходимость тщательного контроля ошибок на всех этапах подготовки и решения задачи на машине.

Контроль за подготовкой и решением задач на машине включает следующие вопросы: проверку исправности машины и устранение систематических ошибок; проверку правильности составления программы и отладку ее на машине; контроль за правильностью работы машины в процессе непосредственного счета по программе (устранение случайных сбоев).

Проверка исправности машины и обнаружение систематических ошибок осуществляется методами профилактического контроля и специальными контрольными программами, которые получили название тест-программ, или просто тестов. При профилакти-

ческом контроле машина работает в более тяжелых условиях, чем при решении задач.

Тест-программы составляются отдельно для проверки работы каждого устройства машины с целью охвата всех ее звеньев. Правильность полученных результатов при решении тестов служит гарантией отсутствия систематических ошибок. Выявленные в результате проверки систематические ошибки устраняются, после чего машина считается исправной.

Проверка правильности составления программы производится вручную двумя работниками, одним должен быть сам составитель программы. Контролю подлежат также правильность записи программы на перфоленте и ввод программы в машину.

После того, как программа введена в память машины, производится дополнительная проверка ее на машине, называемая *отладкой программы*. Это чрезвычайно важная часть проверки, особенно при научных расчетах, так как очень часто задача решается единственный раз. В этом случае может оказаться, что на отладку программы понадобится больше машинного времени, чем на решение задачи.

Первое, в чем нужно удостовериться, это то, что программа может выполняться от начала до конца и что машина не «заблокируется» на каком-либо ошибочном коде, который ей задает неправильно написанная операция.

Затем нужно удостовериться, что различные участки программы выполняются в предусмотренном для них порядке.

Наконец, нужно тщательно проверить полученные численные результаты. Наиболее эффективным методом отладки здесь является сравнение результатов, даваемых машиной на отдельных этапах счета, с результатами, полученными заранее при помощи контрольных ручных вычислений. Обычно для этого вместо действительных исходных данных задачи берутся упрощенные исходные данные. Это делается, чтобы облегчить ручной счет, нужный для получения контрольных результатов. Программа считается отлаженной, если результаты, даваемые машиной, достаточно близки к контрольным результатам.

Для полной проверки отлаживаемой программы производят также комплексную отладку, заключающуюся в решении на машине заранее подобранных примеров, которые предусматривают работу отдельных частей программы в комплексе.

Существуют также контролирующие программы, с помощью которых автоматически производится отладка программы на машине. К их числу относится «Программа автоматического контроля программ», разработанная в ВЦ МГУ, а также более специализированные программы: ППУ «печать передач управления», служащая для проверки логики отлаживаемой программы и ЛУЧ, предназначенная для проверки правильности так называемых линейных участков отлаживаемой программы, т. е. участков, не содержащих внутри себя логических операторов.

Контроль машины в процессе рабочего счета ставит своей целью исключить влияние случайных ошибок на ход вычислений и на получение результатов. При этом предполагается, что машина работает правильно (без систематических ошибок), программа проверена, отлажена и правильно введена в машину.

Основным методом контроля вычислительного процесса является пока что контрольное суммирование. Оно заключается в том, что на отдельных этапах вычислений логическим образом суммируются как команды, так и числа, получающиеся в процессе счета, либо отдельные результаты. Затем контрольная сумма запоминается в памяти машины и вычисления для данного этапа повторяются, после чего снова суммируются команды и результаты счета, и новая контрольная сумма сравнивается с предыдущей. В случае совпадения контрольных сумм считается, что вычисления проведены верно и осуществляется переход к следующему этапу вычислений. Если контрольные суммы не совпадают, то машина либо останавливается, либо вычисления повторяются еще раз. Вновь вычисляется контрольная сумма и сравнивается уже с двумя предыдущими поочередно, и при наличии одного из совпадений управление передается к продолжению вычислений, в противном случае машина останавливается. Если двойной или тройной контроль не дает совпадения двух сумм, то считается, что машина работает неправильно. После останова машины отыскивается причина несовпадения контрольных сумм. Схема контроля с двойным пересчетом представлена на рис. 138.

Очень удобен при решении длинных задач следующий прием, обеспечивающий, кроме проверки правильности вычислений, так-

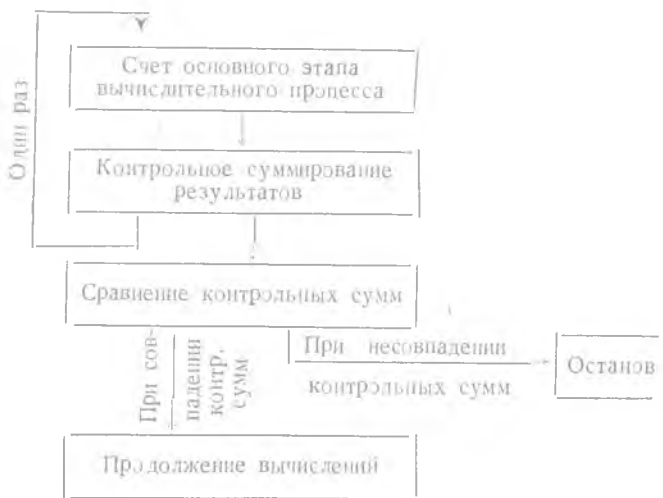


Рис. 138. Схема контроля с двойным пересчетом.

же проверку сохранности программы и периодическое ее обновление в памяти машины. Программу строят так, чтобы после выполнения каждой определенной части вычислений машина выводила все содержимое памяти на магнитную ленту и повторяла этап вычислений вторично. Если содержимое памяти после вторичного счета совпадает с записанным на ленте, то записанное на ленте вводится в память и машина переходит к следующей части вычислений.

Существует еще ряд способов контроля правильности работы машины, не рассматриваемых в данном пособии. Во всяком случае, разработка наиболее рациональных методов контроля является сейчас весьма актуальной проблемой.

Литература: [27], [37], [42], [45].

Глава XI. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Непосредственное ручное программирование — трудоемкий процесс, программы получаются длинными и требуют много времени для составления и отладки. В связи с этим большое значение имеет проблема автоматизации программирования.

Основные неудобства, возникающие при непосредственном программировании, связаны с тем, что приходится пользоваться машинным языком, сильно отличающимся от общепринятого и к тому же специфичным для различных вычислительных машин. Поэтому сейчас созданы и разрабатываются искусственные языки автоматического программирования, отличающиеся от машинного языка, и более или менее близкие к общепринятому. Это искусственные языки также подчиняются определенным правилам программирования, причем правил гораздо меньше и они более привычны, чем правила программирования на машинном языке. Кроме того, поскольку операции автоматического программирования имеют более синтетический характер, то каждая символическая операция заменяет несколько машинных.

§ 1. Принципы автоматического программирования

Сущность автоматического программирования заключается в следующем. Задача, описанная на синтетическом языке с помощью соответствующих символов, вводится в машину. Затем она обрабатывается специальной программой-транслятором, составленной на машинном языке. Эта программа воспринимает символическую программу как величины, исходя из которых и вырабатывает рабочую машинную программу, представляющую собой перевод символической программы на язык команд вычислительной машины.

Основным преимуществом автоматического программирования является простота правил, которым легко обучиться даже неспециалистам. При этом вычислительная машина становится доступ-

ным орудием работы инженера, которое по удобству и простоте изучения сравнимо с правилами обычных вычислений, но превосходит их по мощности и скорости в миллионы раз. Инженеры на предприятиях смогут сами запрограммировать те вычисления, которые им нужны, могут проследить за работой своей программы, внести в нее нужные изменения и т. д. При всем этом программа, написанная на языке автоматического программирования, намного короче, чем на машинном языке, ее гораздо быстрее писать, возможностей для ошибок меньше и поэтому отладить ее гораздо легче.

Приведем пример времени, необходимого для составления программы средней сложности.

Программирование на машинном языке:

Программирование и отладка 3 мес.

8000 команд.

Автоматизация программирования среднего уровня:

Программирование и отладка 8 дней.

500 символических команд.

Развитая система автоматического программирования:

Программирование и отладка 1 день.

30 символических команд.

Автоматизация программирования позволяет решать срочные задачи, результаты которых необходимо знать через несколько дней, что невозможно при обычном программировании.

Однако следует иметь в виду, что автоматическое программирование не всегда является более целесообразным, чем программирование на языке машины. Дело в том, что автоматически составленные машинные программы работают пока еще дольше, чем программы, составленные хорошим программистом на языке машины.

Пример. Программа, составленная хорошим программистом, который стремился выиграть время: время счета T . Программа, составленная средним программистом: время счета от $1,2 T$ до $1,4 T$. Автоматически составленная машинная программа в зависимости от типа применяемого метода: время счета от $1,6 T$ до $2 T$ и более.

Отсюда можно определить область применения автоматического программирования: если программой будут пользоваться часто или она предназначена для решения большого числа вариантов задачи, то для экономии машинного времени имеет смысл составлять ее на языке машины вручную; если же, напротив, ее будут использовать небольшое число раз, гораздо желательнее составлять программу с помощью автоматического программирования.

Кроме того, возникает ряд трудностей при использовании автоматического программирования для решения задач нематематического характера (экономических, бухгалтерских, технологических и т. п.).

Литература: [4].

§ 2. Классификация программирующих программ

Рассматривая процесс получения машинной программы, исходя из символического языка, различают следующие виды трансляторов (программирующих программ): составляющие программы; интерпретирующие программы; кодирующие программы.

Составляющие программы. Наиболее простая идея автоматизации программирования заключается в том, что для ряда типовых задач, функций и т. п. составляются и отлаживаются обычным способом соответствующие подпрограммы. Этим подпрограммам присваивают определенные коды обращения (названия или заголовки) и вводят их в машину.

Автоматизация программирования будет при этом состоять в объединении между собой различных подпрограмм в соответствии с поставленной задачей.

Весь процесс решения задачи можно представить следующим образом:

- разбиение задачи на части, точно соответствующие характеристикам подпрограмм;
- запись задачи в символическом виде (символическое программирование);
- ввод в машину символической программы, подпрограмм и составляющей программы;
- выработка с помощью составляющей программы соответствующей машинной программы;
- ввод величин задачи, работа машинной программы и получение результатов.

Положительными свойствами метода являются простота и скорость работы составляющей программы, хорошие рабочие качества машинной программы, так как составляющие ее подпрограммы написаны вручную и поэтому могут быть выполнены оптимальными с точки зрения времени счета.

С другой стороны, в методе составляющих программ имеется большой недостаток; он очень негибок, т. к. решаемая задача должна иметь такие характеристики, чтобы оказалось возможным разделить ее на тривиальные части. Следовательно, его нельзя легко приспособить ко всем типам задач. Он дает хорошие результаты для матричных задач, задач управления производством, для некоторых бухгалтерских задач, однако его нельзя существенно обобщить.

Сущность метода **интерпретирующих программ** состоит в том, что разрабатывается определенный символический язык и соответствующая ему интерпретирующая программа, которая берет символические команды по одной, переводит их в машинный код, затем сразу выполняет группу машинных команд до того, как переведет следующую символическую команду. По окончании решения задачи машинная программа не сохраняется.

Решение задачи осуществляется следующим образом:

- описание задачи на символическом языке (получение символической программы);
- ввод в вычислительную машину символической программы, интерпретирующей программы и величин задачи;
- выполнение интерпретирующей программы, которая формирует группы машинных команд и позволяет сразу получить результаты задачи.

Этот метод более гибок, чем предыдущий. Он может быть применен ко всем типам задач при условии, что к ним применим символический язык. Отладка символической программы значительно облегчена: получая результаты задачи в ходе интерпретации, легко сразу исправить символическую программу в случае ошибок в результатах.

С другой стороны, этот метод требует большего расхода машинного времени, необходимого для перевода каждой символической команды на машинный язык. Кроме того, сама интерпретирующая программа занимает значительное место в оперативной памяти машины.

Кодирующая программа. Этот метод приближается к первым двум в определенной части их работы.

Как и в предыдущем методе, определяется символический язык и составляется так называемая программа кодирования. Эта программа берет символические команды, переводит их в код соответствующей машины и, не выполняя их, составляет полную машинную программу. Таким образом, получается независимая машинная программа, которая может выполняться самостоятельно каждый раз, когда это необходимо.

В этом случае рабочий процесс представляется следующим образом:

- описание задачи на символическом языке;
- ввод символической и кодирующей программы в машину;
- выработка с помощью кодирующей программы соответствующей машинной программы и вывод последней на перфокарты или перфокарты;
- ввод величин задачи, машинной программы, решение и получение результатов.

Преимущества этого метода очевидны: в нем объединяются гибкость и скорость. Правда, машинная программа не будет такой же быстрой, как составленная хорошим программистом.

Используя тот или иной метод автоматического программирования, следует широко применять имеющуюся библиотеку стандартных подпрограмм.

Важным вопросом является также оптимальное распределение памяти машины, так как от этого зависит в большой степени общий расход машинного времени. Некоторые символические коды созданы специально для того, чтобы сделать возможной автомати-

ческую оптимизацию. Другие охватывают оптимизацию и автоматическое программирование сразу.

Литература: [4], [5], [27], [42].

§ 3. Символические языки

Основные трудности при работе с машинным языком возникают прежде всего из-за того, что он не является мнемоническим. Коды команд обычно бывают цифровыми, в частности, восьмеричными, и требуют предварительного изучения. Поэтому первым шагом на пути создания символического языка будет также такое упрощение кода, которое облегчит его понимание. Это упрощение может состоять в замене цифровых кодов операций буквенными; например, кода 01 (сложение) — типом операции Сл. Тогда команда будет иметь следующий вид:

Сл 0125 0126 0734*,

что означает:

- вызвать число из ячейки № 0125 на сумматор;
- сложить вызванное число с числом из ячейки № 0126;
- записать результат в ячейку №0734.

Этот метод сам по себе еще не приведет к автоматическому программированию, а даст просто упрощенную запись кода, в которой одна символическая команда будет соответствовать одной машинной. Однако, если исключить ряд вспомогательных операций и использовать соответствующую программирующую программу, то распределение памяти машины и присвоение действительных адресов можно переложить на машину.

Следующим шагом в развитии символического языка будет замена кодовых (цифровых) адресов чисел буквенными (или буквенно-цифровыми) символами, изображающими память машины, хранящую соответствующие числовые величины.

Например,

$$A+B=C$$

запишется Сл АВС.

Здесь может встретиться запись и такого вида:

Сл. АВВ,

которая не соответствует арифметическому $A+B=B$ и означает просто, что содержимое ячейки, называемой A , прибавляют к содержимому ячейки B и отсылают результат операции в ту же самую ячейку B , предыдущее содержимое которой стирается.

Можно ввести также символические операции, соответствующие, например, вызову подпрограмм.

Для $Y = \sin x$ пишется $\sin XY$.

* Здесь приведена символическая запись трехадресной команды, однако и для одноадресных машин запись команд можно привести к аналогичному трехадресному виду, что существенно сократит длину программ.

В общем случае программист должен будет разбить свою задачу на элементарные операции. Например, если нужно вычислить выражение

$$Y = \frac{(A \times X + B)}{C},$$

то требуется разбить его на:

Ум АХМ

Сл МВН

Дл NCP,

где *M*, *N*, *P* — символы, присвоенные промежуточным результатам.

Программируя на языке этого типа, программист не заботится о распределении памяти и не включает в программу вспомогательные операции. Эти вопросы решаются автоматически с помощью соответствующего транслятора.

Рассмотренные принципы построения символических языков относятся к так называемым неразвитым системам автоматического программирования, поскольку каждый тип операции имеет фиксированную и жесткую структуру.

Следующий этап будет состоять в построении таких символических языков, с помощью которых можно освободить программиста от необходимости разбивать задачу на последовательность искусственных операций. Изобразительные средства таких языков должны в значительной степени приближаться к обычным средствам выражения мысли.

Для математических задач структура записи и символики имеет вполне определенный и однозначный смысл.

Например:

$$Y = \frac{2T + P}{V^{3x} + W}$$

Однако поскольку современные машины могут читать только линейные формулы, приведенное выражение нужно преобразовать, указав все знаки и последовательность операций.

$$Y = (2 \times T + P) (V \uparrow (3 \times X) + W),$$

где знак \uparrow условно обозначает показатель степени.

Эта запись очевидна так же, как и правила, которыми пользуются для ее реализации. Другие команды, не являющиеся чисто вычислительными (например, задание итерационных циклов), записываются небольшим количеством общеупотребительных слов, связанных простыми синтаксическими правилами. Таким образом, каждую команду можно будет называть фразой, которая будет иметь только одно значение и сможет вызвать в машине процесс одного типа. Таких команд немного. Полутора десятков достаточно для программирования любой задачи.

Однако в этом случае предполагается, что для ввода информации на вычислительной машине, кроме букв латинского алфавита и арабских цифр, имеются обычные знаки +, —, × и некоторые дополнительные знаки пунктуации, скобки и т. д.

Кодирующие программы для таких языков, кроме оформления математических операций, проделывают важную работу по анализу и, учитывая скобки и знаки операций, устанавливают последовательность счета в математических формулах. Естественно, что подобные программы получаются большими по объему и, следовательно, плохо приспособлены к средним и малым машинам.

Программирование на развитом символическом языке не представляет трудностей. Поскольку команды очень синтетичны, их мало, и времени на написание программы уходит мало (примерно час на программу средней длины). Обучиться программированию также можно за короткое время.

Нужно отметить, что разработка символических языков для программирования нематематических задач встречает ряд специфических трудностей, связанных, в частности, с неоднозначностью понятий, отсутствием специальной символики и т. п.

Литература: [4], [5], [42].

§ 4. Универсальный язык

Принципиальные возможности создания символических языков различных типов очень широки. Эти языки должны, в первую очередь, характеризоваться простотой обучения, простотой и скоростью описания задачи, простотой постановки задач на машину. Известен уже ряд разработанных языков: (ФОРТРАН, ЮНИКОД и др.), отвечающих требованиям, предъявляемым к развитым математическим языкам. Однако различия, неизбежно имеющиеся в этих системах, приводят к ряду неудобств, связанных, например, с трудностями обмена программами, приспособлением программ к различным машинам и т. п.

Отсюда возникает задача разработки на уровне развитых систем автоматического программирования унифицированного языка, изобразительные средства которого, с одной стороны, должны предоставить математику максимальные удобства в записи алгоритмов решения задач численного анализа, с другой — сделать язык максимально независимым от конкретных особенностей вычислительных машин и придать ему характер универсального общего языка.

В 1958 г. на первой интернациональной конференции в Европе был разработан проект международного алгоритмического языка типа АЛГОЛ-58, обладающего следующими качествами.

1. Близость языка к общепринятым математическим формулам.

2. Отвлеченность языка от любой конкретной вычислительной машины.

3. Универсальность изобразительных средств языка.

4. Строго формальное синтаксическое описание языка.

5. Удобство перевода на машинный язык самой машиной.

После обсуждений и доработок в 1960 году был утвержден язык АЛГОЛ-60, получающий все более широкое распространение среди программистов всех стран.

Различают три формы языка АЛГОЛ: язык ссылок, язык публикаций и машинное представление языка.

Язык ссылок — это форма определения универсального языка. Он располагает хорошо определенным словарем основных понятий, характер которых не отражает ограничений, вносимых вычислительными машинами, и чисто математическими определениями; его целью является достижение наибольшей простоты понимания.

Язык публикаций имеет форму более гибкую, чем язык ссылок. В него можно включать греческий алфавит, индексы, приписываемые величинами, и показатели степени. Этот язык предназначен для обмена программами и для публикации методов численного анализа.

Машинное представление языка служит для перевода всех символов с языка ссылок или публикаций, чтобы дать возможность определенной вычислительной машине перевести с помощью соответствующего транслятора с универсального языка в код вычислительной машины.

Между тремя возможными способами представления существует только разница в записи. Структура должна оставаться той же самой.

Задачи на языке АЛГОЛ записываются последовательностью сгруппированных символов, называемых фразами. Упорядоченная последовательность фраз и сообщений позволяет получить программу. При этом язык управляется точными правилами синтаксиса. Все последовательности символов должны им подчиняться. Если этого нет, фраза не будет определена и трансляторы не смогут их интерпретировать.

Ниже приводятся некоторые основные символы языка АЛГОЛ

1. Заглавные буквы латинского алфавита (A, . . . , Z) и строчные буквы (a, . . . , z)

2. Арабские цифры (0, . . . , 9).

3. Разделительные знаки:

а) операторы:

— арифметические +, -, ×, /, ↑;

— сравнения <, ≤, >, ≥, =, ≠;

— логические ∨, ∧, ≡;

— присваивания :=;

— последовательностей: перейти к (go to); выполнить (do); иначе (else); для (for); если (if); то (then); пока (while) и др.

б) значки разделения: ;, ,

в) скобки: (), [], начало (begin), конец (end);

г) описания: массив (array), вещественный (real), целый (integer), процедура (procedure), примечание (comment), переключатель (switch) и др.

Таким образом, словарь основных символов, дополненный некоторыми английскими словами, очень небольшой и не предполагает специального знания английского языка.

Рассмотрим несложный пример программирования на языке АЛГОЛ.

Три числа отперфорированы на входном устройстве. Пусть эти числа обозначены a , b и c . Ввести a , b и c в машину. Вычислить выражение $\frac{a \cdot b + c}{a \cdot b - 2c}$ и вывести его значение на выходное устройство.

Формулировка процесса решения на языке

АЛГОЛ

ввод (a , b , c);

$h := a \times b$;

$g := (h + c) / (h - 2 \times c)$;

вывод (g).

Объяснение

Ввести три числа, отперфорированные на входном устройстве и присвоить их значения переменным a , b , c

Вычислить произведение $a \cdot b$ и присвоить значение результата переменной h .

Вычислить выражение $\frac{a \cdot b + c}{a \cdot b - 2c}$

и присвоить значение результата переменной g .

Отперфорировать значение, присвоенное переменной g на предыдущем шаге.

Здесь оператор $h := a \times b$ есть оператор присваивания, который присваивает переменной h значение $a \times b$ и символ $:=$ рассматривается как единый.

Рассмотрим без комментариев еще один пример программы, написанной на языке АЛГОЛ-60 для случая (приведенного в § 1, гл. X) вычисления функции:

$$y = f(x) = \sin\left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{x^2}{1+x^2}\right).$$

Начало вещественные x , x_0 , h , x_1 ;

целый i ;

массив y [$0 : (x_1 - x_0) / h$];

ввод (x_0 , h , x_1);

$x := x_0$; $i := 0$;

M1: $y[i] := \sin(0,7854 \times x \uparrow 2 / (1 + x \uparrow 2))$;

$x := x + h$; **если** $x > x_1$, **перейти к M2**.

иначе $i := i + 1$; **перейти к M1**;

M2: **вывод** (y); **стоп**

конец.

Приведенную программу можно непосредственно решать на машине, для которой имеется соответствующий транслятор.

Причем, будет нужно лишь произвести некоторую редакцию операторов «ввод», «вывод», «стоп» в связи с особенностями конкретного транслятора.

Во время перевода программы с языка АЛГОЛ на язык машины каждой переменной, встречающейся в программе, должна быть отведена ячейка памяти. Число, записанное в этой ячейке, является значением соответствующей переменной.

Нужно отметить, однако, что все разработанные алгоритмические языки, в том числе и АЛГОЛ-60, не свободны от недостатков. В частности, они неудобны для описания производственных процессов, экономических задач и т. д. Поэтому разработки алгоритмических языков не прекращаются. Для решения экономических задач разрабатывается модификация АЛГОЛ'а с приближением символики к обычному языку, в США применяются языки БОГОЛ, КОБОЛ и др.

Для инженера желательно иметь наглядную интерпретацию абстрактных символов алгоритмического языка, так как формулирование алгоритма облегчается, если можно представить себе графическое изображение блок-схемы алгоритма.

Эти соображения учитываются в языке АЛГОС, на котором часто по виду графической блок-схемы алгоритма или системы, его реализующей, можно записывать логическую схему алгоритма.

Касаясь перспектив будущего, можно предполагать, что будет создана программа, с помощью которой машина сможет выбирать наилучший математический метод для решения данной задачи. Некоторые исследователи интересуются также возможностью заставить машину делать буквенные вычисления, т. е. руководствоваться соображениями, идентичными тем, которыми руководствуются математики при анализе или синтезе формульных зависимостей. Такая возможность позволила бы быстро приходить к решениям, которые может получить математик, но получение которых требует многих часов утомительных вычислений, или позволила бы обобщить такие рассуждения, которые из-за своей сложности человек может проводить только в частных случаях.

Проводятся и другие исследования в области программирования, например, с целью получения возможности доказательства логических теорем с помощью машин.

Литература: [38], [40], [42], [43], [44].

Глава XII. СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ МАШИНЫ, ИХ ВОЗМОЖНОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В связи со значительным расширением применения электронных цифровых машин появилась необходимость и некоторой их специализации.

В настоящее время электронная вычислительная техника развивается в направлении создания следующих машин:

для выполнения сложных математических вычислений, возникающих при разработке различных научных и технических проблем и вопросов;

для обработки информации;

для автоматического управления производственными агрегатами и процессами;

для решения неарифметических задач.

Рассмотрим основные особенности и типовые примеры использования перечисленных типов машин.

§ 1. Машины для математических вычислений

Эффективность работы электронных цифровых машин, предназначенных для научных и технических расчетов, сводится в основном к получению возможно большего полезного машинного времени. Это значит, что машина должна каждые сутки большую часть времени затрачивать на полезную вычислительную работу и по возможности меньше простаивать из-за неисправностей и различного рода регламентных работ.

Для машин этого класса характерными являются следующие основные черты:

1. Разветвленная и гибкая система команд, обеспечивающая удобство программирования. Большое количество различных арифметических и логических операций, в том числе сложных операций (умножение, деление, извлечение корня, получение тригонометрических функций и др.).

2. Большая емкость оперативных запоминающих устройств.

3. Наличие внешних запоминающих устройств на магнитных лентах достаточно большой емкости (в 50—100 раз больше емкости оперативного накопителя).

4. Весьма широкий диапазон требований к производительности машин.

Математические вычислительные машины, в зависимости от указанных особенностей, можно разделить на три группы: малые серийные машины, предназначенные для выполнения массовых научных и инженерных расчетов сравнительно небольшой сложности; средние серийные машины для выполнения крупных вычислительных работ; уникальные большие машины для решения особо сложных математических задач.

Большинство задач, встречающихся в инженерной практике, так или иначе сводится к выполнению определенных математических расчетов, иногда довольно сложных. Поэтому машины рассматриваемого класса являются наиболее подходящими для таких целей.

Рассмотрим в качестве примера решение следующей характерной инженерной задачи.

Требуется произвести поинтервальную калибровку резервуара (см. рис. 139), то есть составить таблицы объемов содержимого резервуара через каждый сантиметр уровня. Это позволит измерять количество жидкости в резервуаре с помощью обыкновенной калиброванной линейки.

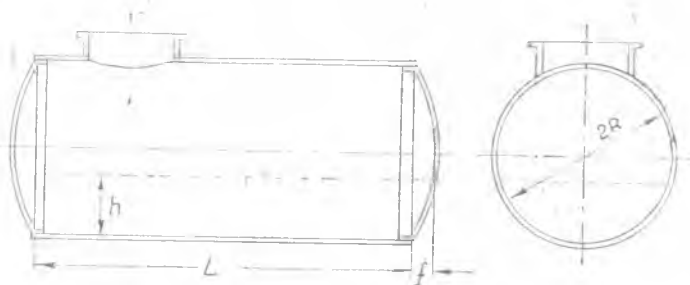
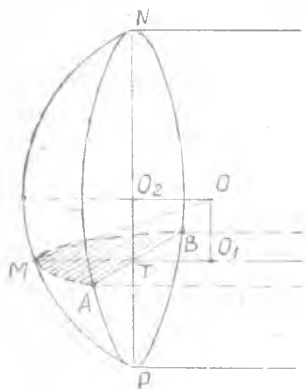


Рис. 139. Общий вид резервуара

Расчеты произвести для следующих типоразмеров резервуаров (таблица 16).

Таблица 16

Основные параметры	Размеры, мм			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Диаметр резервуара $2R$	908	903	852	906
Длина цилиндрической части L	1945	1968	1768	1963
Стрела выпуклости днищ f	90	90	90	90



Резервуар представляет собой цилиндр, установленный в горизонтальном положении, со сферическими боковыми днищами (рис. 140).

Для получения расчетной формулы объема введем следующие обозначения:

Рис. 140. Соотношение геометрических параметров резервуара

$$\begin{aligned}
 OM &= R_6; \\
 O_1M^* &= R_m; \\
 PT &= h \text{ (уровень);} \\
 AB &= k; \\
 O_2N &= R; \\
 MT &= H.
 \end{aligned}$$

Площадь сегмента $AMB-S$.

Исходя из геометрических соотношений, определим искомый объем на высоте h :

$$V = \int_0^h (kL + 2S) dh, \quad (12.1)$$

где

$$k = 2\sqrt{2hR - h^2};$$

$$\begin{aligned}
 S &= \int_0^H \sqrt{2HR_m - H^2} dH = \\
 &= (f - R_6) \sqrt{2R_m(R_m - R_6 + f) - (R_m - R_6 + f)^2} + \\
 &\quad + R_m^2 \arcsin \frac{f - R_6}{R_m} + \frac{\pi R_m^2}{2};
 \end{aligned}$$

$$H = O_1M - OO_2 = R_m - (R_6 - f);$$

$$R_m = \sqrt{R_6^2 - (R - h)^2};$$

$$R_6 = \frac{4R^2 + 4f^2}{8f}.$$

После ряда преобразований формулы (12. 11) окончательно получим

$$\begin{aligned}
 &\text{I часть} \\
 V &= [(h - R)\sqrt{2hR - h^2} + R^2 \arcsin \frac{h - R}{R} + \frac{\pi R^2}{2}] \cdot L + \\
 &\text{II часть} \\
 &+ (R_6 - f)[(R - h)\sqrt{R^2 - (R - h)^2} + R^2 \arcsin \frac{R - h}{R} - \frac{\pi R^2}{2}] + \\
 &\text{III часть} \\
 &+ \left[\pi R_6^2 h - \pi R^2 h + \pi R h^2 - \frac{\pi h^3}{3} \right] + \\
 &+ 2 \int_0^h [R_6^2 - (R - h)^2] \arcsin \frac{f - R_6}{\sqrt{R_6^2 - (R - h)^2}} dh.
 \end{aligned}$$

Программа составляется непосредственно по полученной формуле, причем в I и II части используются стандартные

подпрограммы \sqrt{x} и $\arcsin x$, а интеграл вычисляется по формуле прямоугольников также с использованием стандартной подпрограммы. Счет ведется не на отрезке $[0, h]$, а на отрезке $[h_1, h_2]$, где $h_2 - h_1 = 1$ см.

Блок-схема программы приведена на рис. 141. Рабочая программа составлялась для машины «Урал-1» и содержала 300 команд. Полное время счета заняло около 60 мин.

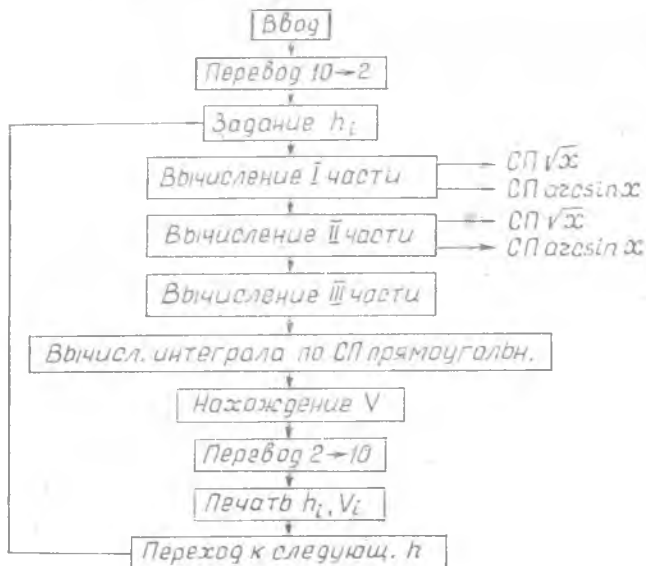


Рис. 141. Блок-схема расчета емкости резервуара.

На электронных цифровых машинах можно эффективно производить инженерно-технические и научные расчеты, которые сводятся к таким математическим задачам, как системы алгебраических уравнений, встречающиеся в геодезии, астрономии, строительной механике 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, описывающие процессы газовой динамики, радиотехники, гидродинамики, теплотехники, метеорологии и т. д.; нахождение корней полиномов высоких порядков; 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.

Для большинства из этих задач разработаны численные методы решения и во многих случаях имеются соответствующие стандартные программы. Среди них широко применяются такие, например, как СП решения систем линейных алгебраических уравнений методом Гаусса; СП интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений методами Адамса и Рунге-Кутты; СП вычисления определенного интеграла по формуле Симпсона; СП интерполирования по Чебышеву и по Ньютону; СП вычисления корней алгебраических полиномов и целый ряд других.

Приведем теперь некоторые сведения об отечественных серийных электронных цифровых вычислительных машинах.

МАШИНЫ СЕРИИ «УРАЛ»

МАШИНА «УРАЛ-1»

Малая машина «Урал-1», созданная в 1954 г. под руководством Б. И. Рамеева, является одноадресной машиной с фиксированной запятой и предназначена для использования в научно-исследовательских институтах, конструкторских бюро, на заводах, в высших учебных заведениях и др.

Машина оперирует с 36-разрядными двоичными числами, которые соответствуют приблизительно 10-разрядным десятичным числам. Скорость работы — 100 простых операций в секунду.

Оперативное запоминающее устройство емкостью в 1024 числа построено на магнитном барабане. Внешний накопитель на магнитной ленте имеет емкость 40 000 чисел. Ввод информации в машину производится при помощи перфорированной ленты, представляющей собой стандартную зачерненную киноленту шириной 35 мм.

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

Машина «Урал-1» имеет 800 электронных ламп и 3000 полупроводниковых диодов. Потребляемая мощность — около 7 квт. Машина собрана из пяти стоек, посередине которых смонтирован пульт управления.



Рис. 142. Электронная цифровая машина «Урал-1».

МАШИНА «УРАЛ-2»

Машина «Урал-2» относится к средним машинам. Предусматривается возможность работы как с фиксированной, так и с плавающей запятой. Для изображения чисел отводится 40 двоичных разрядов. Число команд — 41. Скорость работы 5000—6000 операций в секунду.

Внутреннее запоминающее устройство на ферритах емкостью 2048 чисел.

Внешняя память двух видов: магнитный барабан на 8192 числа, причем предусматривается возможность подключения до восьми барабанов, а также накопитель на магнитной ленте длиной от 100' до 250 м, емкостью 80 000 чисел. Ввод информации производится с перфоленты со скоростью 150 чисел в секунду, вывод на печать — со скоростью 20 чисел в секунду.

Машина «Урал-2» содержит 2200 электронных ламп и 10 000 полупроводниковых диодов. Потребляемая мощность около 25 квт.

МАШИНА «УРАЛ-4»

Машина «Урал-4» предназначена для решения широкого класса научных, инженерных и плано-экономических задач. Эта машина параллельного действия с переменной длительностью такта, работает по одноадресной системе команд со средней скоростью 5000—6000 операций в сек. при научных и инженерных расчетах и 9000—10 000 операций в сек. при решении плано-экономических и логических задач. Количество основных команд — 54. В машине возможна работа с числами с плавающей и фиксированной запятой. Длина кода чисел 40 разрядов (мантисса со знаком — 33, порядок со знаком - - 7 разрядов).

Оперативный накопитель емкостью 2048 сорокаразрядных двоичных чисел построен на ферритовых сердечниках (МОЗУ).

Внешние накопители на магнитных барабанах (до 8 шт.) емкостью 16384 числа на один барабан и на магнитной ленте (до 12 шт.) емкостью 262144 числа на один магнитофон (максимальная емкость при 12 магнитофонах 3145728 чисел).

Машина «Урал-4» имеет 32 сорокаразрядных входа и выхода для ввода и вывода информации. Возможен ввод, хранение, обработка и выдача целых чисел, графиков и алфавитно-цифровой информации.

Увеличенная емкость и надежность внешних накопителей, специальные команды, расширенный состав устройств ввода и вывода информации позволяют эффективно решать на машине задачи статистики, планирования, учета и анализа производства, учета товарно-материальных ценностей, обработки результатов наблюдений и других задач, связанных с приемом, хранением, обработкой и выдачей большого объема информации.

Машина потребляет мощность от 40 до 60 квт, в зависимости от режима работы и занимает площадь не менее 240 м².

В настоящее время выпускаются более совершенные полупроводниковые модели машин серии «Урал».

МАШИНА «МИНСК»

Машина «Минск» выпускается в нескольких модификациях. Первая базисная модель «Минск-1» представляет собой двухадресную машину с фиксированной запятой.

Машина оперирует с 30-разрядными двоичными числами, которые соответствуют примерно 7 десятичным. Принцип работы — асинхронный; средняя скорость 3000 операций в секунду.

Оперативный накопитель построен на ферритовых сердечниках (МОЗУ), емкостью 1024 числа. Внешнее запоминающее устройство на магнитной ленте имеет емкость 65000 чисел.

Ввод программы и числового материала с бумажной (телеграфной) ленты со скоростью 2 м/сек (800 строк/сек.).

Вывод результатов осуществляется печатающим устройством со скоростью 20 чисел/сек.

Модификации машины «Минск-12» и «Минск-14» в отличие от базисной модели обладают расширенным составом внешних устройств и большей емкостью накопителей.

Например, модель «Минск-14» имеет емкость оперативного накопителя 2048 чисел, а внешних запоминающих устройств до 256 000 чисел.

Внешние устройства могут обрабатывать также алфавитно-цифровую информацию. Предусмотрен прием и выдача информации по линиям связи.

Разработаны новые полупроводниковые варианты машины «Минск-2» и модификация «Минск-22», в которые внесены дополнительные усовершенствования.

Так, машина «Минск-22» обладает быстродействием в 5—6 тыс. операций в секунду и работает в режимах как с фиксированной, так и с плавающей запятой.

Оперативный накопитель на ферритовых сердечниках имеет емкость 8192 ячеек.

Емкость внешних накопителей на магнитной ленте составляет 1.600 000 чисел.

Машина двухадресная и может выполнять 107 различных команд.

Ввод информации осуществляется:

— входным устройством на перфорированной бумажной ленте со скоростью 800 строк/сек;

— входным устройством на 80-колонных перфокартах со скоростью 250 карт/мин.

Вывод информации осуществляется:

— цифровым печатающим устройством со скоростью 20 чисел/сек;

— алфавитно-цифровым печатающим устройством со скоростью 300 строк/мин.;

— перфорирующим устройством на бумажной ленте со скоростью 20 строк/сек;

— перфорирующим устройством на перфокартах со скоростью до 120 карт/мин.

МАШИНА «ПРОМИНЬ» («ЛУЧ»)

Электронная цифровая вычислительная машина «Проминь» предназначена для автоматизации инженерных расчетов в конструкторских бюро и научно-исследовательских институтах. Машина может производить вычисления по сложным формулам, решать системы обыкновенных дифференциальных уравнений 3—4-го порядка, находить корни и экстремумы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений, значения определенных интегралов, интерполировать по методу Ньютона, проводить квадратичное интерполирование по Чебышеву при количестве точек не более 30 и т. д.

Машина выполняет 32 различные операции: арифметические и операции управления, вычисления тригонометрических, обратных тригонометрических и гиперболических функций, натурального логарифма, экспоненциала, корня квадратного, скалярного произведения вектора не выше 30-го ранга, решения системы линейных алгебраических уравнений не выше 7-го порядка, а также операции с адресами второго ранга.

Набор вычислительного алгоритма осуществляется штеккерами или фольгированными перфокартами на бесконтактном магнитном коммутаторе объемом в 100 одноадресных команд. Каждая команда набирается тремя штеккерами; на одной перфокарте размещается 10 команд.

Машина «Проминь» — одноадресная. Числа в ней представляются в десятичной системе счисления с плавающей запятой. Разрядность чисел — 5 десятичных разрядов мантисы числа, десятичный разряд порядка числа.

Диапазон чисел, представляемых в машине, от $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^9$.

Объем запоминающего устройства — 100 ячеек; из них 80 используются для хранения исходной и промежуточной числовой информации, а 20 — для хранения часто встречающихся констант.

Ввод чисел в память осуществляется с помощью полноразрядной клавиатуры.

Вывод результата — десятичные индикаторные лампы. В комплект машины может также включаться цифрочитающее устройство ЭУМ-23.

Среднее время выполнения операций типа сложения — 1000 операций в секунду; умножения — 100 операций в секунду.

Машина полностью выполнена на полупроводниковых элементах.

Потребляемая мощность \approx 450 ватт.

МАШИНА «НАИРИ»

Малогобаритная цифровая вычислительная машина с автоматическим программированием «Наири» является двухадресной машиной с фиксированной запятой и предназначена для решения широкого круга инженерных и научных задач.

Программирование на этой машине значительно облегчено применением упрощенного машинного языка, а также благодаря режиму автоматического программирования, позволяющего вводить задачи [в частности, функции, имеющие вид $y=f(x)$] на обычном языке. Кроме того, часто встречающиеся задачи (например, решение алгебраических и дифференциальных уравнений и т. д.) выполняются на машине без предварительной подготовки путем использования внутренней библиотеки подпрограмм.

Средняя скорость вычислений — 1,5—2 тысячи операций в секунду.

Оперативное запоминающее устройство — на ферритовых сердечниках емкостью 1024 числа.

Долговременное запоминающее устройство — на ферритовых сердечниках емкостью 16384 числа.

Длина слова — 36 двоичных разрядов.

Ввод и вывод информации осуществляется при помощи электрифицированной пишущей машинки и трансмиттера со скоростью 7 знаков в секунду.

Ввод и вывод команд — в буквенно-цифровом коде.

Машина целиком выполнена на полупроводниковых приборах.

Потребляемая мощность — не более 1,6 кВт.

МАШИНА «МИР»

Малогобаритная полупроводниковая цифровая машина «МИР» предназначена для автоматизации инженерных расчетов в конструкторских бюро и научно-исследовательских институтах.

Вычислительный алгоритм вводится в машину в виде словесно-формульного описания с одновременным печатанием его на электрифицированной пишущей машинке.

Входной алфавит ЭВМ «МИР» содержит русские и латинские буквы, знаки операций, цифры, указатель порядка числа, разделительные знаки и т. д.

Десятичные числа вводятся в машину в произвольном написании. Разрядность, с которой будут производиться вычисления, указывается при вводе задачи. Диапазон чисел и разрядность ограничены только объемом памяти.

Запоминающее устройство машины емкостью 4096 символов входного языка выполнено на ферритовых сердечниках.

Микропрограммная организация управления, особенности схем позволяют выполнять логическую обработку текста со скоростью 3—4 тысячи операций в секунду.

Вывод результатов обеспечивается с помощью электрифицированной пишущей машинки в виде таблиц и графиков. Предусмотрены два формата: узкий — длина строк 65 и широкий — 140 символов. Скорость вывода не менее 7 знаков в секунду.

Литература: [1], [27], [41], [46], [47], [48], [49].

МАШИНА «СЕТУНЬ»

«Сетунь» — одноадресная машина последовательного действия с фиксированной запятой. Числа и команды в машине представлены троичным кодом с цифрами 1, 0, —1. Точность представления чисел — 18 троичных разрядов (эквивалентно 8 десятичным). Машина может выполнять 24 различные команды.

Память машины состоит из двух ступеней:

1. Оперативное запоминающее устройство на ферритовых сердечниках емкостью 162 ячейки по 9 троичных разрядов.

2. Запоминающее устройство на магнитном барабане емкостью 1944 ячейки по 9 трюичных разрядов.

Средняя скорость работы машины от 1 до 4,5 тысячи операций в секунду.

Ввод данных в машину осуществляется с бумажной перфоленты со скоростью 800 знаков в секунду. Вывод производится путем печати и получения перфоленты посредством рулонного телетайпа, работающего со скоростью 7 знаков в секунду.

Машина в основном собрана на ферритовых сердечниках и полупроводниковых приборах.

Потребляемая мощность — 2,5 ква.

МАШИНА «РАЗДАН-2»

«Раздан-2» — двухадресная машина с плавающей запятой. Форма представления чисел — двоичная; мантисса — 29 разрядов, знак числа — 1 разряд, порядок — 5 разрядов, знак порядка — 1 разряд.

Средняя скорость вычислений 5 тысяч операций в секунду. Оперативное хранение чисел в запоминающем устройстве на ферритовых сердечниках емкостью 2048 чисел или команд. Внешнее запоминающее устройство на магнитной ленте имеет емкость 120 000 чисел.

Ввод программы и числового материала с перфоленты со скоростью 35 чисел в секунду.

Вывод результатов осуществляется печатающим устройством со скоростью 20 чисел в секунду.

Машина выполнена на полупроводниковых приборах и ферритах, имеет малые габариты. Потребляемая мощность не более 3 кВт.

МАШИНА «РАЗДАН-3»

«Раздан-3» — двухадресная машина с плавающей запятой. Форма представления чисел — двоичная; мантисса 40 разрядов, знак числа — 1 разряд, порядок — 6 разрядов, знак порядка — 1 разряд.

Диапазон чисел (десятичных), с которыми оперирует машина, от $\pm 10^{-38}$ до $+ 10^{38}$.

Средняя скорость вычислений — 20—25 тысяч операций в секунду.

Оперативный накопитель на ферритовых сердечниках имеет емкость от 16 384 до 32 768 50-разрядных ячеек (два блока).

Внешнее запоминающее устройство на магнитном барабане имеет емкость от 12 800 до 204 800 чисел.

Внешнее запоминающее устройство на магнитной ленте имеет емкость от 390 000 до 6,2 млн. чисел.

Ввод информации осуществляется:

— входным устройством на перфорированной бумажной ленте со скоростью 55 чисел/сек;

— входным устройством на 80-колодных перфокартах со скоростью 700 карт/мин.

Ввод в свободный накопитель возможен без остановки вычислений.

Вывод результатов осуществляется:

— цифровым печатающим устройством со скоростью 20 чисел/сек;

— алфавитно-цифровым печатающим устройством АЦПУ-128 со скоростью 7 строк/сек;

— перфорирующим устройством на бумажной ленте со скоростью 20 строк/сек;

— перфорирующим устройством на перфокартах со скоростью 100 карт/мин.

Вывод результатов может производиться как с остановкой вычислений — из оперативного накопителя, так и без остановки — из буферного накопителя.

Машина выполнена на полупроводниковых приборах с широким применением унифицированных узлов и блоков.

Потребляемая мощность от 12 до 50 кВт (в зависимости от комплектности машины).

«БЭСМ-1» — первая электронная вычислительная машина из серии БЭСМ, созданная в 1953 г. в Академии наук СССР под руководством академика С. А. Лебедева. К моменту ее создания машина была одной из лучших в Европе. Скорость ее работы составляла около 8000 операций в секунду. Машина трехадресная с плавающей запятой и длиной машинного слова 39 двоичных разрядов. Кроме оперативного накопителя емкостью 1024 числа, имелась «пассивная» память на 384 числа для постоянного хранения некоторых констант и стандартных подпрограмм. Внешняя память: магнитный барабан на 5120 чисел и 4 магнитные ленты общей емкостью 120 000 чисел.

«БЭСМ-2» — усовершенствованная модель с емкостью оперативного накопителя в 2048 чисел. Она обеспечена набором СП с компилирующей и интерпретирующей системами.

«БЭСМ-3» — полупроводниковая машина с быстродействием около 20 тысяч операций в секунду. Оперативная память рассчитана на 8192 слова и 45 двоичных разрядов. Внешняя память на магнитных барабанах имеет емкость 65 536 слов, а на магнитной ленте — около 4 млн. слов. Машина имеет достаточно полное и хорошо разработанное математическое обеспечение (стандартные программы, подпрограммы, трансляторы и т. д.).

«БЭСМ-4» — улучшенная модификация машины «БЭСМ-3». Сохраняя все ее параметры, она имеет значительно большие возможности для решения планово-экономических и статистических задач.

«БЭСМ-6» — является весьма совершенной и высокопроизводительной машиной. Ее среднее быстродействие составляет 1 миллион операций в секунду. Основное оперативное запоминающее устройство имеет емкость 32 768 пятидесятиразрядных слов. В машине широко использовано совмещение выполнения операций обращения к оперативной памяти с работой арифметического устройства. Одновременно с работой центральной части машины осуществляется обмен информацией по нескольким независимым каналам связи с внешними устройствами, включающими 16 магнитных барабанов, 32 магнитные ленты, широкоформатные алфавитно-цифровые печатающие устройства, телеграфные линии и др. Машина имеет мультипрограммное управление, что обеспечивает наиболее эффективное использование центральной части машины и ее внешних устройств при одновременном решении нескольких задач. Специальная управляющая программа распределяет оперативную и внешнюю память между задачами и осуществляет распределение во времени работы внешних устройств. В машине имеется сверхбыстродействующее запоминающее устройство со специальной схемой, которая сохраняет в этом устройстве числа и команды, наиболее часто встречающиеся в вычислениях. В конструкции машины отражены современные требования автоматизации программирования, обеспечивается независимая работа с нескольких пультов управления и др.

§ 2. Машины для обработки информации

Электронные цифровые машины получают все более широкое применение для обработки информации в экономике, административно-управленческой области, а также в науке и технике, когда возникнет необходимость в обработке огромного количества экспериментальных данных.

Непрерывное совершенствование способов производства, успехи в развитии техники, научные обобщения и открытия, раскрытие тайн природы обогащают человеческую мысль новыми понятиями, суждениями и умозаключениями. «Чтобы действительно знать предмет, — говорил Ленин, — надо охватить, изучить все его стороны, все связи и «опосредствования». Мы никогда не достиг-

208

нем этого полностью, но требование всесторонности предостережет нас от ошибок и от омертвения».*

В информационных машинах используются результаты процесса познания человечеством окружающего мира. Благодаря точности воспроизведения накопленной информации машина сможет выполнять такую работу, которая практически не может быть выполнена человеком. В зависимости от функций, выполняемых информационно-логическими машинами, можно говорить о специализации машин.

Так, например, информационно-логические машины могут быть использованы для следующих целей:

обработки результатов научных исследований и инженерных разработок (технологических, схемных, построение приборов и машин). Основным сырьем являются отчеты, статьи, книги, экспериментальные данные;

автоматизации процессов поиска информации в мировом фонде литературы. Общее число накопленных человечеством печатных работ определяется величиной около ста миллионов названий. Естественно, что поиск информации в таком количестве литературных источников крайне затруднителен, и без новых видов машин человек в своей практической деятельности не в состоянии использовать весь материал, имеющийся по каждому данному вопросу;

обработки статистических сведений, накапливающихся в промышленности, сельском хозяйстве, транспорте. Сырьем для обработки являются сводки, таблицы, паспорта предприятий, графики;

обработки результатов наблюдений за больными в клиниках, больницах, амбулаториях. Сведения могут быть записаны в «память» машины и логически обработаны для изучения и предотвращения эпидемий или для обобщения симптомов болезни;

обработки запаса наблюдений за явлениями природы. Процессы обработки подвергаются данные, сообщаемые метеорологическими и сейсмологическими станциями, обсерваториями, спутниками Земли, автоматическими станциями космических ракет.

Совершенно очевидно, что объем человеческой памяти не может вместить все сведения, которые должны быть подвергнуты переработке в приведенных случаях.

Таким образом, специфика функционирования информационно-логических машин определяет их основные отличительные особенности:

1. Огромную емкость внешних запоминающих устройств и быстроту выборки информации. По существу, внешнее запоминающее устройство с необходимыми схемами для записи и выборки информации является основным устройством электронной цифровой машины, предназначенной для обработки информации.

* В. И. Ленин. Сочинение. Т. 32, стр. 71—72.

2. Сравнительно простую структуру арифметического устройства, которое должно выполнять только простые арифметические операции и ряд простых логических операций, необходимых для осуществления проверок и выборки данных.

3. Наличие большого количества (10—50 комплектов) параллельно и независимо работающих устройств ручного ввода данных. Устройства работают длительное время и одновременно с вычислительной машиной. Устройства вывода данных в машинах этого типа являются весьма производительными и специфичными; они обеспечивают печатание результатов сразу в форме отчетов, сводок, счетов и т. п. либо в виде графиков.

4. Необходимость контроля отдельных элементарных действий, то есть применение так называемого микроконтроля. С этой целью в состав слов, представляющих информацию, вводятся специальные дополнительные разряды, позволяющие автоматически проверять правильные записи и считывания чисел, их передачу между устройствами, а также выполнение отдельных операций.

5. Непрерывный процесс обработки информации и систематическое поступление новых данных, сочетающееся с периодической выдачей результатов вычислений.

Чаще всего процесс обработки информации состоит из повторения огромного числа сравнительно простых однотипных последовательностей операций над различными исходными данными.

Наглядным примером информационно-логических машин является машина «Погода», предназначенная для обработки сведений, поступающих от метеостанций, и предсказания погоды.

Литература: [24], [27].

§ 3. Управляющие математические машины

Развитие автоматизации управления с применением современных средств вычислительной техники является одной из важнейших народнохозяйственных задач. Дальнейшая интенсификация производственных процессов будет базироваться на внедрении новой, наиболее эффективной технологии в сочетании с техникой управляющих вычислительных машин.

Большое значение математические машины будут иметь и в различных областях государственного управления. Внедрение информации в сфере учета, экономики и статистики потребует создания централизованных систем управления с применением современных средств вычислительной техники. Особую роль они будут играть в области плановых и экономических расчетов.

В основу работы управляющих машин должно быть положено математическое описание регулируемого процесса в виде соответствующей системы уравнений, которая решается по определенному выработанному алгоритму. Машина должна перерабатывать исходную информацию по принятому логико-математическому ал-

горитму, чтобы получить наиболее выгодное управляющее воздействие на регулируемый объект с учетом изменения внешних возмущающих факторов и реализации всех дополнительных условий и ограничений. Естественно, что первостепенное значение приобретает при этом вопрос математизации тех или иных управляемых процессов.

Если вначале для автоматического управления применялись электронные цифровые машины универсального назначения, то сейчас созданы и разрабатываются специально приспособленные для этой цели машины. Они выделены в особый, очень важный класс машин, обладающих рядом характерных свойств и особенностей.

Первая особенность — необходимость непосредственной связи управляющей цифровой машины с управляемыми объектами, которая обеспечивала бы получение нужной информации и передачу команд управления. Обычно физические параметры, характеризующие состояние любой системы, являются величинами непрерывными: температура, давление, перемещение, 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 соответствующий 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 высокой скорости вычислений для обеспечения соответствия между вырабатываемыми машиной командами управления и действительным состоянием управляемого объекта.

Третьей, важной особенностью управляющих цифровых машин является необходимость надежности в работе. Если в работе универсальных математических машин сбои не являются аварийно опасными, так как приводят в конечном счете лишь к снижению производительности, к повторному решению задач, затрате времени на отыскание неисправностей и т. д., то в работе управляющих цифровых машин сбои должны быть исключены, так как иногда даже единственный случай нарушения работы машины может привести к аварии или к остановке всего производства. В настоящее время основным и наиболее перспективным путем повышения надежности электронных цифровых машин является внедрение полупроводниковых элементов и ферритов и разработка надежных схем и узлов машин на этих элементах. Пока часто 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.

Рассмотрим функциональную блок-схему некоторой обобщенной управляющей машины (рис. 143).

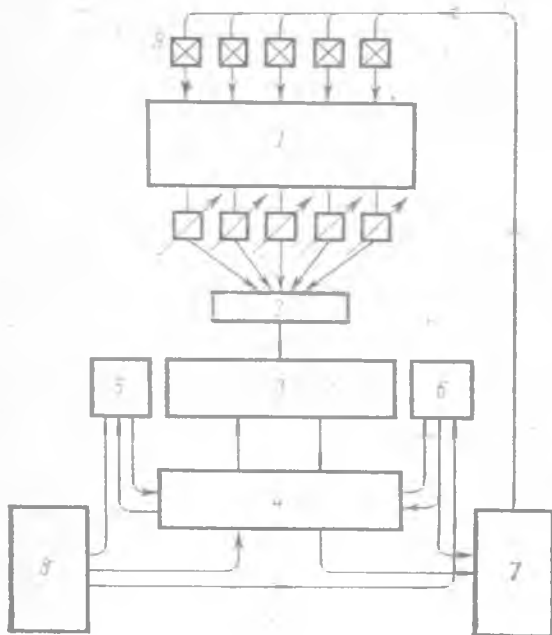


Рис. 143. Блок-схема управляющей математической машины.

Исходная информация о ходе процесса поступает от датчиков управляемого объекта 1 в блок преобразования 2, где происходит преобразование непрерывной информации в числовую форму по принятому коду для управляющей системы. Хранение первичной информации до поступления в вычислительное устройство, а также переработанной информации производится накопителем 3. При помощи блока управления 8 отдельные величины исходной информации в нужной последовательности вводятся в вычислительное устройство 4, где производится математическая обработка

данных по соответствующему алгоритму и программе и определяются параметры для управления процессом. Блок сравнительных программ 5, рассчитанных теоретическим путем, и блок предельных значений 6 некоторых величин ограничивают и определяют течение процесса в нужном направлении. Последовательность работы этих устройств также определяется блоком управления 8.

В вычислительном устройстве результаты полученных решений дополнительно обрабатываются в блоке сравнений и выбора наилучшего режима. Этот выбор происходит в результате сравнительного анализа большого количества вариантов или путем сравнения с какими-то наперед заданными критериями, определяющими наиболее рациональное состояние регулируемого процесса в данных условиях.

Найденные оптимальные значения основных параметров процесса преобразуются в оперативном блоке 7 в соответствующие управляющие сигналы, которые в свою очередь воздействуют на исполнительные механизмы 9. Таков в общих чертах элементарный

замкнутый цикл регулирования с применением управляющей машины.

В общем случае в управляющую машину поступает информация о состоянии регулируемого объекта и воздействии изменяющихся условий внешней среды. На основе этой информации вырабатывается сигнал $x(\tau)$, воздействующий через соответствующие исполнительные механизмы на регулируемый объект. Реакция управляемого объекта $y(t)$ есть функция следующих переменных: входного сигнала $x(\tau)$, влияния внешней среды $F(\tau)$, которое учитывается при реализации принятого алгоритма; влияния той части внешней среды $\Psi(t)$, о которой (при $t \leq \tau$) в машину информации не поступает.

В результате в рассматриваемой системе «регулируемый объект — управляющая машина» действует следующая зависимость:

$$y(t) = \Phi [x(\tau), F(\tau), \psi(t)].$$

Алгоритм получения управляющего воздействия должен быть построен таким образом, чтобы ответный сигнал (или сигналы) системы $y(t)$ достаточно мало отличался от функции $\bar{y}(t)$, обеспечивающей оптимальный процесс.

Для решения этой задачи необходимо знать математическую оценку имеющихся зависимостей, насколько точно и полно они определяют исследуемый процесс, разбить процесс на элементарные акты для формализации вычислений и учесть все дополнительные условия для осуществления управления объектом. В связи с этим возникают вопросы корректности решения поставленной задачи, построения для этого наиболее целесообразного алгоритма, разработки для его реализации соответствующих логико-математических схем и составления программы, позволяющей объединить в определенной последовательности все арифметические и логические действия принятого алгоритма.

Алгоритм управления тем или другим объектом должен включать в себя не только формальное решение задачи по регулированию протекающего процесса, но и учитывать все добавочные условия его качественного и безаварийного ведения.

В условиях автоматизации сложных производственных процессов можно идти по линии решения частных задач, на которые расчленяется регулируемый процесс, и создания отдельных зональных управляющих машин с последующим объединением их в единую систему комплексной автоматизации с центральной управляющей математической машиной. В этом случае регулируемый процесс расчленяется на ряд взаимосвязанных между собой локальных процессов, каждый из которых регулируется с помощью отдельной машины. Параллельно с этим осуществляется контроль над рядом важнейших параметров общего процесса с предварительной переработкой первичных данных.

Локальные управляющие машины и устройства для обработки первичной информации связаны с центральным управляющим агрегатом, который ведет регулирование всего объекта по основным определяющим параметрам процесса. К числу такого рода систем относятся централизованные системы управления промышленными предприятиями. Получая основные данные и технико-экономические показатели о работе отдельных производствен-

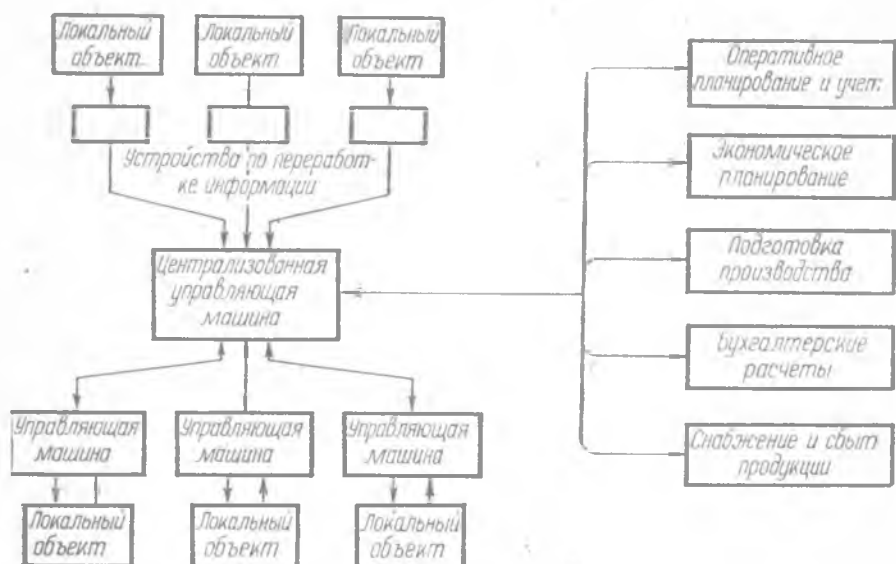


Рис. 144. Блок-схема централизованной системы управления.

ных объектов, о расходе сырья, энергии, вспомогательных материалов и т. д., математическая машина осуществляет необходимые расчеты и выдает данные для получения наиболее выгодных условий работы всего предприятия. Одновременно с этим регистрируется состояние запасов сырья, полуфабрикатов, вспомогательных материалов и определяются основные показатели работы предприятия за смену.

Таким образом, централизованная система управления представляет собой комплекс из управляющих машин для локальных процессов и устройств для получения и переработки первичной информации, связанных с единым вычислительным агрегатом для определения по выработанным логико-математическим алгоритмам оптимальных условий работы всего объекта в целом при соблюдении установленных норм по качеству конечного продукта. Блок-схема централизованной системы управления представлена на рис. 144.

Учитывая разнообразные функции, которые должны выполнять управляющие машины, последние можно классифицировать следующим образом.

К первой группе относятся математические машины, не связанные с объектом и, следовательно, с текущей информацией, и представляющие собой вычислительные устройства для исследования и проектирования соответствующих процессов. Эта группа в большинстве случаев представляет собой универсальные или специализированные математические машины, механизмирующие утомительный труд вычислителя и исследователя.

Ко второй группе машин в сфере управления производственными объектами относятся устройства для контроля и проведения соответствующих расчетов в процессе регулирования объекта — так называемые *машины-советчики*. Они применяются как средство для предварительной переработки поступающей с объекта информации и связаны непосредственно с регулируемым объектом, так как все вычисления производятся в процессе его работы.

И, наконец, третью, наиболее важную группу составляют управляющие машины, непосредственно включенные в ту или иную систему автоматически регулируемого производственного процесса. Они заменяют действия оператора, реализуя определенный алгоритм управления и воздействуя на соответствующие органы объекта.

Для централизованных систем управления промышленными предприятиями могут применяться универсальные электронные цифровые машины, а также и специализированные управляющие машины, некоторые данные о которых приводятся ниже.

МАШИНА «ДНЕПР» (УМШН)

Управляющая машина широкого назначения «Днепр» разработана на базе универсальной цифровой вычислительной машины, снабженной соответствующими каналами для связи с датчиками и исполнительными механизмами управляемого объекта. Машина позволяет вести визуальный контроль за отдельными элементами системы автоматического управления, обрабатывать получаемую информацию в соответствии с имеющейся программой, вносить с пульта управления дополнительные данные об объекте, фиксировать получаемые результаты и осуществлять автоматическое или от оператора управление объектом. Машину «Днепр» можно использовать для изучения статических и динамических режимов производственных объектов, а также для подготовки данных для систем цифрового программного управления.

Машина «Днепр» выполнена на полупроводниковых и ферритовых элементах и работает по двухадресной системе. Арифметические операции выполняются над 26-разрядными двоичными числами с фиксированной запятой. Среднее быстродействие — 8000 операций в секунду.

Объем оперативного накопителя на ферритовых сердечниках составляет 512 слов и может быть увеличен за счет подключения трех дополнительных блоков.

Исходная информация вводится в машину с бумажной перфоленты со скоростью 45 чисел в секунду.

Вывод и регистрация результатов производится печатающим устройством в буквенно-цифровом коде, а также на панель сигнализации пульта оператора.

Связь машины с контролируемыми и управляемыми объектами осуществляется

с помощью специального блока связи УСО. Устройство связи может содержать до 250 каналов, позволяющих производить опрос датчиков по специальному алгоритму, заложенному в программу управления, и допускает непосредственное подключение датчиков типа терморпар, термометров сопротивления и датчиков дифференциально-трансформаторного типа. Точность аналого-дискретного преобразования составляет 0,5%.

Конструктивно машина «Днепр» выполнена в виде трех отдельных шкафов, печатающего устройства и размещается на площади 35—45 кв. м.

Потребляемая мощность ≈ 1 квт.

МАШИНА «УМ-1»

Типовая управляющая машина «УМ-1» предназначена для централизованного контроля и автоматического управления в системах комплексной автоматизации агрегатов и цехов химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, металлургической и других отраслей промышленности.

Основное назначение машин — оптимизация технологических процессов путем расчета корректирующих и управляющих воздействий на местные системы автоматического регулирования и управления.

В системах комплексной автоматизации «УМ-1» выполняет следующие действия: исследование процесса, определение его технических и экономических характеристик; автоматический контроль значений технологических параметров с централизованной индикацией, регистрацией и сигнализацией отклонений их от заданных значений; расчет комплексных параметров и оперативный контроль их значений; расчет оптимальных режимов ведения процесса; расчет и выдачу управляющих воздействий непосредственно на исполнительные механизмы.

«УМ-1» является одноадресной машиной с фиксированной запятой и обеспечивает выполнение 30 различных операций над 21-разрядными двоичными кодами.

Среднее быстродействие — около 900 операций в секунду.

Количество оперативных накопителей — до четырех емкостью 1024 ячейки каждый.

Количество дополнительных постоянных накопителей — до трех, емкостью 2048 ячеек каждый.

Комплекс внешних устройств связывает «УМ-1» с управляемым объектом по входным и выходным сигналам.

Комплекс ввода и вывода обеспечивает связь оператора с вычислительным комплексом, а через него с автоматизируемым объектом и осуществляет ввод информации (ручной и перфоленты) от оператора в вычислительный комплекс.

Машина может использоваться как автономно, так и в составе системы оперативного управления СОУ-1.

Потребляемая мощность — не более 7,5 квт.

Новые средства автоматизации с помощью математических решений и логических операций позволят использовать оптимальные условия управления. В зависимости от сферы применения развитие их будет идти в направлении:

— создания управляющих машин для отдельных промышленных и транспортных объектов;

— внедрения централизованных систем учета, диспетчеризации и управления на промышленных предприятиях и железных дорогах страны;

— организации крупных систем для переработки информации государственного значения в планировании, распределении, финансах, статистике и других областях административно-хозяйственной жизни страны.

Литература: [28], [32], [33], [35].

§ 4. Машины для экономических расчетов

Главной экономической задачей, стоящей перед советским народом, является создание материально-технической базы коммунизма. Осуществление этой грандиозной задачи связано с резким увеличением масштабов и темпов производства в стране, с дальнейшим прогрессом науки и техники во всех отраслях народного хозяйства. Это, в свою очередь, означает, что процессы управления хозяйственной деятельностью будут усложняться год от года. Естественно, что старые методы решения экономических задач не обеспечат прогресса в этой области и будут лишь сдерживать и тормозить развитие производительных сил.

Применение электронных вычислительных машин в сфере экономики позволяет анализировать с помощью объективных математических методов основные характеристики работы предприятий и выбирать самые выгодные формы и способы организации работы. При этом в практическом использовании математических методов при решении экономических проблем можно выделить два основных этапа работы: выбор и постановка экономических задач и составление подробных математических описаний (моделей) исследуемых экономических систем и процессов; разработка и применение математических методов для исследования построенных моделей и поиск оптимальных решений поставленных задач.

От правильной постановки экономических задач в значительной степени зависит успех применения математических методов и электронных вычислительных машин.

Следует отметить, что эффективность подобных методов проявляется не только при решении экономических задач крупного масштаба, например, управления экономикой республики или всей страны, но и при решении частных задач, связанных с работой отдельных участков производства, с распределением и использованием материалов, энергии, станков, транспортных средств и т. д.

Характерным примером экономических моделей, при исследовании которых математические методы дают большой эффект, являются матричные межотраслевые балансы затрат и выпуска продукции, получившие сейчас широкое распространение. Этот метод можно с успехом использовать при организации материально-технического снабжения, при исследовании вопросов ценообразования, эффективности капитальных вложений и т. д.

Приведем примерный перечень работ, которые успешно могут быть выполнены с использованием средств вычислительной техники.

I. Механизация составления сводных технических и нормативных документов:

- а) подсчет применяемости деталей и узлов;
- б) составление нормативных документов по расходу сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий;

в) составление нормативных документов по трудоемкости и стоимости обработки деталей, узлов и изделий;

г) составление нормативных документов по обеспечению производства материалами, инструментом и оснасткой.

II. Механизация работ по технико-экономическому планированию;

а) расчеты при формировании плана производства и выпуска продукции;

б) расчеты производственных мощностей;

в) расчеты при составлении плана по материально-техническому снабжению;

г) расчеты при составлении плана по труду и заработной плате;

д) расчеты при составлении плана затрат на производство и себестоимость продукции;

е) расчеты при составлении финансового плана.

Следует особо отметить, что для получения объективных расчетных результатов необходимо иметь своевременную и достоверную исходную информацию в виде массивов перфокарт, изготовленных по специально разработанным макетам. Эта информация должна опираться на объективные нормативные документы и пройти предварительную обработку на счетно-перфорационных установках.

В общем случае сюда должны быть включены следующие мероприятия:

— подготовка систем кодирования данных в исходной документации;

— подготовка форм документов для обработки на машинах;

— организация нормативного хозяйства на перфокартах;

— подготовка технологического процесса обработки информации с использованием средств вычислительной техники.

III. Механизация работ по оперативному планированию и учету производства:

а) расчеты по системе непрерывного оперативно-производственного планирования;

б) расчеты календарно-плановых нормативов;

в) составление подетальных программ цехам;

г) составление оперативных заданий;

д) расчеты трудоемкости программы и загрузки производства;

е) расчеты по определению потребности в рабочей силе и фондах заработной платы на оперативную программу;

ж) расчеты по определению потребности в материалах и инструменте на оперативную программу;

з) расчеты по незавершенному производству.

IV. Решение транспортных задач.

Из этой группы задач, применительно к промышленным предприятиям можно отметить следующие:

а) нахождение оптимальной расстановки оборудования (стан-

ков) в механических цехах, обеспечивающее минимум транспортного пути всех обрабатываемых деталей;

б) минимизация пробегов внутривозовского транспорта;

в) оптимизация транспортных связей с заводами-поставщиками и потребителями.

V. Механизация работ по бухгалтерскому и статистическому учету, составлению отчетности и анализу хозяйственной деятельности предприятия:

а) учет труда и заработной платы;

б) учет заготовления, движения и расхода материальных ценностей;

в) учет затрат на производство и калькуляция себестоимости продукции;

г) учет брака;

д) учет готовой продукции, ее отгрузки и реализации;

е) финансово-расчетные операции;

ж) составление отчетности;

з) статистический учет;

и) анализ хозяйственной деятельности предприятия.

Опыт комплексного применения вычислительной техники на таких передовых предприятиях, как ленинградское оптико-механическое объединение ЛОМО, завод «Фрезер» и др. показывает следующее:

В ЛОМО в общем объеме работ, выполняемых с помощью вычислительных машин, планово-экономические расчеты составляют 29%, расчеты по материально-техническому снабжению — 24%, инженерно-конструкторские и другие — 12%, бухгалтерские, учетные и статистические — 35%.

На одном из московских заводов комплексное применение вычислительной техники дало возможность почти в пять раз снизить трудоемкость работ по планированию производства, сократить в три раза сроки составления сводной документации, в особенности, для материально-технического снабжения, обеспечить рациональную загрузку оборудования, уменьшить непроизводительные потери рабочего времени и повысить производительность труда рабочих в основных цехах в среднем на 10—15%.

Рассмотрим в качестве примера алгоритм прямого расчета *производственной мощности*.

Схема алгоритма следующая:

1. Расчет действительного (располагаемого) годового фонда времени по каждой группе технологического оборудования осуществляется по формуле

$$F_{k_i} = f_{k_i} \cdot n_{k_i}, \quad (12.2)$$

где F_{k_i} — действительный годовой фонд времени одной технологической группы оборудования;

k_i — наименование (шифр) группы технологического оборудования;

- i — количество (порядковые номера) технологических групп;
 f_{κ_i} — действительный годовой фонд времени работы единицы оборудования;
 n_{κ_i} — количество единиц оборудования данной технологической группы.

2. Расчет потребного фонда времени на изготовление каждого вида изделий в количестве, предусмотренном программой каждой технологической группы оборудования, производится по формуле:

$$T_{\kappa_i m_j} = \frac{t_{\kappa_i m_j} \cdot P_{m_j}}{\lambda_{\kappa_i} \beta_{\lambda \kappa_i}}; \quad j = 1, 2, 3, \dots, r, \quad (12.3)$$

где $T_{\kappa_i m_j}$ — потребный фонд времени на изготовление одного вида изделия в количестве, предусмотренном программой по каждой технологической группе оборудования;

- m_j — наименование (шифр) изделия;
 $t_{\kappa_i m_j}$ — норма времени на изготовление одного вида изделия по каждой технологической группе оборудования;
 P_{m_j} — количество данного вида изделия;
 λ_{κ_i} — коэффициент выполнения норм;
 $\beta_{\lambda \kappa_i}$ — коэффициент приведения действующих норм к прогрессивному уровню.

3. Расчет суммарного фонда времени на изготовление всех видов изделий, предусмотренных программой, по каждой технологической группе оборудования

$$L_{\kappa_i} = \sum_{j=1}^r T_{\kappa_i m_j} = T_{\kappa_i m_1} + T_{\kappa_i m_2} + \dots + T_{\kappa_i m_r}. \quad (12.4)$$

4. Расчет коэффициента использования производственной мощности по каждой технологической группе оборудования

$$\eta_{\kappa_i} = \frac{F_{\kappa_i}}{L_{\kappa_i}}. \quad (12.5)$$

5. Отбор коэффициентов, больших среднего заданного, означающих что при данной расчетной программе это оборудование будет иметь недогрузку

$$\eta_{\kappa_i} \geq (1,05 \div 1,15). \quad (12.6)$$

6. Нахождение минимального коэффициента из числа отобранных

$$\min(\eta_{\kappa_i}) = \eta_{\min} \quad (12.7)$$

7. Определение производственной мощности механического

цека, то есть максимального выпуска продукции по каждому виду, производится по формуле

$$N_{mj}^{np} = P_{mj} \cdot \eta_{\min}, \quad (12.8)$$

где N_{mj}^{np} — производственная мощность, выраженная в способности предприятия к максимальному выпуску продукции в соотношениях расчетного ассортимента (расчетной программы).

В процессе расчетов могут быть определены также коэффициенты загрузки оборудования и выведены на печать необходимые промежуточные параметры и величины. Блок-схема расчета производственной мощности приведена на рис. 145.

Экономические расчеты и анализ производства на промышленных предприятиях при решении задач внутриводского планирования, учете материальных ценностей, расчете заработной платы и других задач всегда связаны с обработкой больших объемов входной алфавитно-цифровой информации, тщательным контролем обрабатываемой информации и получением результатов в виде законченных бухгалтерских учетных документов, также содержащих алфавитно-цифровую информацию.

Наряду с использованием для указанных целей электронных вычислительных машин общего применения, целесообразно внедрение машин специализированных.

Научно-исследовательским институтом счетного машиностроения (НИИсчетмаш) разработан комплекс электронных вычисли-

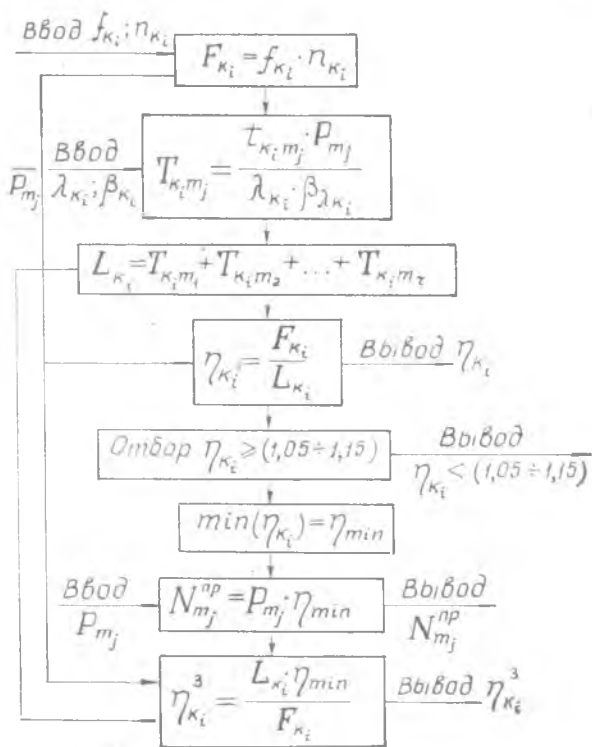


Рис. 145. Блок-схема расчета производственной мощности механического цеха.

тельных машин высокой производительности для экономических расчетов и анализа.

В состав комплекса входят три автономные электронные машины:

- электронная вычислительная машина «Эра»;
- устройство перезаписи с перфокарт на магнитные ленты УПЗ-1;
- устройство перезаписи с магнитных лент на печать и перфорацию УПЗ-2.

Такой комплекс обеспечивает большую скорость ввода и вывода информации, эффективное использование быстродействующего оборудования и значительно повышает общую скорость решения экономических задач. В отличие от других машин того же класса «Эра» не нуждается в большом количестве медленно действующих вводных и выводных устройств.

При правильной организации работы комплекса может быть достигнута равномерная загрузка всех трех машин с предварительным накоплением исходных данных и результатов на магнитных лентах.

Высокая скорость вычислений, большая емкость внешних накопителей позволяет использовать машину «Эра» не только для решения широкого круга экономических задач, но и для инженерно-технических расчетов и решения целого ряда научных задач.

Ниже приводятся некоторые сведения о машине «Эра».

«Эра» — одноадресная машина параллельного действия с фиксированной запятой. Машина обрабатывает 6- и 12-разрядные десятичные числа и алфавитно-цифровую информацию с длиной слова в 4 и 8 символов.

Команды кодируются 8-ю восьмеричными разрядами. Всего используется 36 основных команд с переменной длительностью цикла реализации команд. Арифметические операции с числами в машине выполняются в двоично-десятичной системе со средней скоростью при решении экономических задач 40 000—50 000 операций/сек., при решении математических задач — 6000 операций/сек.

Оперативный накопитель выполнен на ферритовых сердечниках емкостью 4096 6-разрядных десятично-двоичных чисел.

Внешний накопитель на магнитной ленте состоит из 5 лентопротяжных механизмов. Емкость одного блока 1 млн. 440 тыс. символов. Общая емкость 5 блоков составляет 7 млн. 200 тыс. символов.

При больших объемах информации ее запись с перфокарт на магнитные ленты подготавливается на УПЗ-1, после чего осуществляется считывание со скоростью 6000 символов в секунду. Малые объемы информации вводятся непосредственно с перфокарт со скоростью 160 карт/в минуту.

Вывод результатов вычислений производится на алфавитно-цифровое печатающее устройство со скоростью 300 строк в минуту. В виде записи таблиц или графиков со скоростью 300 точек в минуту. При большом объеме информации выводится на магнитные ленты.

В машине имеется около 3600 ламп и 15000 диодов.

Потребляемая мощность 40 ква.

Результаты эксплуатации машины «Эра» показали эффективность ее применения для решения экономических задач.

Так, например, подетальный расчет цехового, квартальных и месячных планов при использовании клавишных и счетно-перфо-

рациональных машин занимает примерно 375 человеко-дней. Причем, на расчете квартальной производственной программы занято 15 человек в течение месяца и примерно 30 человек в течение 7 дней занимаются составлением и корректировкой месячных производственных программ. Все эти расчеты на машине «Эра» выполняются за 20—30 часов.

Таким образом, при использовании машины «Эра» в данном случае трудоемкость расчетов снижается примерно в 400 раз, а стоимость — в 20 раз.

Расчет заработной платы 600 рабочих одного цеха (по 6500 тыс. нарядам), включающий таксировку, расчет удержаний и налогов, выписку расчетных листков, лицевого счета и кассового чека производится в течение 22 мин.

Решение задачи линейного программирования, заключающееся в распределении оборудования 100 потребителям с 25 складов, методом условно-оптимальных планов осуществляется за 133 мин.

Не менее эффективно машина может быть использована для решения ряда математических задач. Так, решение системы дифференциальных уравнений восьмого порядка методом Рунге-Кутты, включающее в себя около 2 млн. операций, производится за 5 мин., а с печатью графиков (через 10 шагов) — в течение 5 мин. 40 сек.

Вильнюсским заводом счетных машин выпущена ферротранзисторная алфавитно-цифровая вычислительная машина АТЭ-80, предназначенная для обработки деловой экономической информации.

К числу задач, успешно решаемых с применением АТЭ-80, относятся:

- расчет загрузки оборудования;
- расчет потребности в рабочей силе, оборудовании, материалах, энергии на планируемый период;
- механизация бухгалтерского учета;
- выполнение инженерных расчетов и вычислений;
- обработка статистических данных и ряд других задач.

АТЭ-80 представляет собой комплекс, состоящий из арифметического устройства; запоминающего устройства; вводно-выводного перфорирующего устройства ПЭР-80; вводно-выводного печатающего устройства ТЭ; итогового позиционного перфоратора ПИ-80 М2; соединительного устройства; устройства питания.

Арифметическое устройство АТЭ-80 работает с плавающей запятой со средней скоростью 50 операций в секунду.

Запоминающее устройство, выполненное на магнитном барабане, имеет емкость 1024 десятичных 12-разрядных числа.

Ввод данных осуществляется с помощью стандартных 80-колонных перфокарт.

Печатающее устройство обеспечивает вывод получаемой табуляграммы на бумажную ленту шириной 440 мм со скоростью печати 300 строк в минуту, причем емкость строки составляет 96 цифр или 48 алфавитных символов. Печатающее устройство содержит 49 различных символов (десятичные цифры, русский алфавит и некоторые знаки).

Определенный интерес представляет управляющая вычислительная машина ВНИИЭМ-1, с помощью которой успешно решаются задачи сетевого планирования и управления сложными комплексами работ.

Производимые на этой машине расчеты позволяют контролировать ход выполнения плана; прогнозировать появление критических участков с тем, чтобы заранее принимались необходимые меры; быстро информировать о критических участках, сосредоточивая внимание руководителей только на работах, имеющих действительно важное значение для общего хода разработки; выявлять работы, имеющие значительные резервы времени и т. п.

Разработана также более совершенная модификация ВНИИЭМ-3.

Последняя имеет следующие особенности: возможность обработки буквенно-цифровой информации; наличие аппаратного контроля правильности работы с применением автокоррекции ошибок; возможность расширения оперативной памяти до 28 672 слов; возможность увеличения емкости внешних накопителей с 2 млн. до 32 млн. слов; прием информации от телеграфных и телефонных линий; средняя скорость работы — 40 тыс. операций в секунду.

Литература: [21].

§ 5. Использование машин для решения логических и комбинаторных задач

Благодаря тому, что электронные цифровые машины могут выполнять ряд логических операций, таких, как логические задачи классификации, сравнения, отбора, силлогизмов и т. п., открываются дополнительные перспективы использования таких машин в различных областях человеческой деятельности.

Рассмотрим некоторые возможности.

Машинный перевод с одного языка на другой

Перевод с одного языка на другой весьма трудоемкий и однообразный вид умственного труда. Однако анализ процесса перевода и структуры языков показал, что это формальная умственная работа. Иначе говоря, работа переводчика может быть описана в виде сложной системы большого количества правил (то есть может быть алгоритмизирована), руководствуясь которыми можно переводить тексты, не понимая их смысла.

Алгоритм перевода можно представить в виде программы для электронной цифровой машины. При составлении такой программы необходимо обеспечить получение с помощью машины правильного в смысловом отношении перевода, который был бы понятен специалисту, не знающему иностранного языка, и пригоден для окончательного редактирования.

При составлении программ для машинного перевода возникают две основные трудности:

если переводимому слову отвечает несколько эквивалентов на другом языке, нужно добиться, чтобы машина выбирала тот из них, который требуется по смыслу текста;

после того, как слова одного языка заменены словами другого, последние должны быть грамматически достаточно правильно согласованы между собой и объединены в предложения.

Эти трудности играют основную роль и при обычном переводе в связи с чрезвычайно большим разнообразием грамматических правил, наличием большого количества исключений и зависимостью смысла отдельных слов от контекста.

Эксперименты по автоматическому переводу, проведенные на различных цифровых электронных машинах, показали необходимость создания специальных «переводческих» машин.

Принципы машинного перевода заключаются в следующем: буквы первого и второго языков нумеруются, и слова, таким образом, кодируются 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 словаря, 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, 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 перфокарте. Декодировать полученный перевод, то есть заменить числовой код на буквенный, можно с помощью автоматического дешифратора, печатающего текст обычными буквами.

Пока машинный перевод находится в начальной стадии развития. С помощью машин удается производить перевод лишь специальных научных текстов. Обусловлено это тем, что для перевода таких текстов требуются сравнительно небольшие словари (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 текстах сравнительно мало многозначных слов (имеющих на втором языке несколько эквивалентов). Однако уже сейчас можно утверждать, что перспективы в области применения машин для переводов весьма обширны.

Кроме того, проблема машинного перевода имеет и большой теоретический интерес, так как для программирования необходима полная формализация процесса перевода, что требует доведения до предельной отчетливости способов описания выражений одной и той же мысли на различных языках. В связи с этими исследованиями возникла новая область языкознания — математическая лингвистика.

Машинная игра

Весьма интересной и важной областью исследований является игра вычислительных машин в различные игры (шахматы, шашки, кости, карты и др.).

Обычные правила игры представляют собой комплекс условий, которые позволяют задать в машину с большей или меньшей степенью определенности необходимые исходные данные для целенаправленной работы по вычислению оптимальных вариантов игры, а следовательно, и разработать соответствующую программу.

Наконец, 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, домино являются увлекательным и полезным умственным спортом, и, конечно, человек всегда будет играть в них сам.

Однако, рассматривая такие программы и наблюдая машинную игру, можно глубже изучить логические возможности цифровых машин, а следовательно, значительно расширить сферу их применения. Весьма большую роль это также играет при разработке наиболее совершенных систем автоматического регулирования, управляющих машин, средств технической кибернетики.

Дискретная природа известных игр (расчленение на отдельные чередующиеся ходы) хорошо согласуется с цифровым принципом работы электронных цифровых машин, не требуя каких-либо преобразований непрерывных величин в дискретные и обратно.

Машины для выбора оптимальных ходов могут быть основаны на нескольких различных принципах, определяющих степень совершенства, сложность и гибкость «игры» машины.

В соответствии с этим «играющие» машины могут быть разделены на четыре основные группы в порядке возрастания степени совершенства и сложности «игры» этих машин.

В памяти машины типа «словарь» заранее должны быть запи-

саны ответы на все положения, которые могут возникнуть в результате ходов противника. В процессе игры машина просто сравнивает каждое очередное положение с тем запасом, который хранится в памяти, отыскивает такое же положение и соответствующий ему ответ.

Машины, основанные на этом принципе, должны иметь чрезвычайно большие запоминающие устройства, которые могли бы вместить огромное число возможных вариантов.

Ясно, что объем работы по подготовке и введению в машину этих вариантов чрезвычайно велик и для большинства известных игр практически невыполним. Однако этот принцип может использоваться для некоторых игр в комбинации с другими принципами на начальной стадии игры, то есть когда число возможных вариантов сравнительно невелико.

Машины, реализующие строго определенные правила игры. В основе некоторых игр лежит строгая математическая теория, которая позволяет при помощи определенных формул в любом положении рассчитать необходимый оптимальный ход. Таким образом, вычислительная машина, применяемая для подобных игр, должна обычным способом производить вычисления по программе, составленной для соответствующих расчетных формул.

Машины, использующие общие принципы оценки положений. В большинстве игр невозможно точно указать единственный оптимальный ход в каждом положении, который бы обеспечивал более успешное продвижение к выигрышу, чем любой другой ход. Однако существуют общие принципы для оценки положений, возникающих в ходе игры, позволяющие сравнивать различные возможные ходы. Эти принципы в своей основе являются общими для всех игроков, правильно играющих в данную игру (шашки, шахматы, карты и др.), но в зависимости от квалификации и индивидуальных особенностей игроков могут быть различные подходы к истолкованию и применению этих общих принципов.

В машину при помощи соответствующей программы могут быть заложены необходимые критерии для применения этих общих принципов в определенных положениях. Ясно, что совершенство игры по такому методу в основном зависит от совершенства исходных общих принципов игры. Это в одинаковой мере относится как к «играющей» машине, так и к людям.

Машины, накапливающие «опыт». В машину задаются правила игры, элементарная тактика игры и методы улучшения этой тактики в результате опыта, то есть методы «обучения» машины.

Могут быть использованы различные методы «обучения»: пробные ходы с запоминанием благоприятных и устранением неблагоприятных возможностей; подражание более успешно играющему противнику; обучение машины в результате одобрения или неодобрения действий машины с указанием характера допущенных ошибок со стороны внешнего наблюдателя — «учителя»; анализ самой машиной после окончания партии или в процессе игры допущен-

ных ошибок и общего хода игры с целью выработки общих принципов тактики игры.

Машины, играющие по принципу «словаря», и машины, вычисляющие оптимальные ходы по определенным постоянным расчетным формулам, не представляют особого интереса с точки зрения их логических возможностей.

Программы, обеспечивающие поиск и выборку нужных ответов из словаря, аналогичны программам выборки необходимых значений функций из таблиц при математических вычислениях.

Программы для вычисления оптимальных ходов по заданным расчетным формулам также не отличаются от обычных вычислительных программ.

Значительный интерес представляют машины, играющие по принципу общей оценки положения, и обучающиеся машины.

Следует отметить, что разработка вопросов применения электронных цифровых машин для игры в шахматы, шашки и другие игры, исследование вопросов машинной тактики и стратегии игры, в том числе создание программ самосовершенствующейся стратегии игры, имеют большое экономическое и военное значение. Строя такие автоматы и исследуя их работу, можно изучить законы построения целого класса автоматических устройств, которые могут быть применены в промышленности.

Оптимальное планирование

Задачи наилучшего использования ресурсов путем оптимального их распределения делятся на три группы.

1. Транспортные задачи (оптимальный план перевозок).

2. Задачи на составление смесей (задачи диеты) и рациональный раскрой материалов (оптимальное использование материалов).

3. Задачи планирования производства (оптимальное использование производственных мощностей).

В число транспортных задач входят: оптимальное прикрепление пунктов назначения к пунктам отправления при перевозке грузов; рациональное распределение транспортных средств; построение оптимального графика перевозок и др. К этой группе примыкают также родственные задачи по снабжению электроэнергией, оптимальному размещению почтовой сети (задачи сети); задачи регулирования движения материалов и т. д.

К задачам второй группы относятся следующие: определение оптимальной смеси, сплава, шихты, рецептуры, диеты; подбор наиболее дешевых и питательных кормовых рационов в животноводстве; рациональный раскрой промышленных материалов.

К третьей группе относятся задачи на оптимальное распределение заданной программы по станкам, определение максимальной загрузки оборудования при заданном ассортименте, нахождение оптимального ассортимента выпуска продукции и др.

Следует отметить, что задачи таких типов невозможно решить просто прямым перебором всех возможных вариантов, так как даже в простейшем случае (когда переменные x_1, \dots, x_n могут принимать лишь значения 0 и 1) придется испытать 2^n комбинаций значений этих переменных.

Если принять $n=60$, то $2^n > 10^{18}$. Даже если предположить, что мы располагаем машиной, которая может перебрать один миллион комбинаций в секунду, то для перебора 2^{60} комбинаций, такой машине понадобилось бы более 30 000 лет!

Поэтому возникает необходимость в разработке специальных алгоритмов, опирающихся на методы линейного, целочисленного, выпуклого или динамического программирования и некоторых других.

Рассмотрим несколько наиболее интересных случаев.

Транспортные задачи

Транспортные задачи весьма часто встречаются в самых различных областях науки, техники, экономики и планирования. В предыдущем параграфе уже упоминался частный случай приложения транспортной задачи во внутризаводском планировании. Однако представляет определенный интерес постановка подобных задач в более широком плане, охватывающем достаточно разнообразные случаи.

Не рассматривая здесь подробности решения таких задач (поскольку это выходит за рамки настоящего пособия), укажем лишь, что они достаточно точно формулируются с помощью методов линейного (ЛП) и целочисленного (ЦЛП) программирования и успешно решаются на электронных вычислительных машинах.

Приведем ряд характерных транспортных задач*.

Распределительная задача. В задачах этого типа переменные x_1, \dots, x_n обозначают количество физически неделимых объектов: станков, судов, самолетов и т. д.

Возьмем следующий пример. Имеется девять самолетов первого типа и десять самолетов второго типа. Необходимо так распределить их между двумя авиалиниями, чтобы эксплуатационные расходы в единицу времени были минимальны. При этом как по первой, так и по второй линии следует перевозить в единицу времени не менее 53 единиц груза.

Известно количество грузов a_{ij} , которое может перевезти в единицу времени один самолет i -го типа при использовании его на j -й линии: $a_{11}=5$, $a_{12}=7$, $a_{21}=6$, $a_{22}=5$. Известна также величина c_{ij} эксплуатационных расходов в единицу времени при использовании одного самолета i -го типа на j -й линии: $c_{11}=5$, $c_{12}=14$, $c_{21}=18$, $c_{22}=10$.

* Здесь использованы материалы по статье Ю. Ю. Финкельштейн «Целочисленное линейное программирование». Экономика и математические методы, т. II, вып. 1, 1966.

Обозначим через x_{ij} — искомое количество самолетов i -го типа, выделяемое для j -й линии. Тогда задачу о распределении самолетов между авиалиниями можно поставить как задачу ЦЛП.

Найти числа $x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}$, удовлетворяющие следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} 5x_{11} + 14x_{12} + 18x_{21} + 10x_{22} &\rightarrow \min, \\ 5x_{11} &+ 6x_{21} &\geq 53, \\ &7x_{12} &+ 5x_{22} &\geq 53, \\ x_{11} + x_{12} &&&\leq 9, \\ &x_{21} + x_{22} &\leq 10, \\ x_{11} \geq 0, x_{12} \geq 0, x_{21} \geq 0, x_{22} \geq 0, \\ &x_{ij} \text{ — целые.} \end{aligned} \right\} \quad (12.9)$$

Решая задачу одним из известных методов ЦЛП, мы получаем следующий оптимальный план:

$$\bar{x}_{11} = 5, \quad \bar{x}_{12} = 4, \quad \bar{x}_{21} = 5, \quad \bar{x}_{22} = 5.$$

Значение целевой функции равно:

$$c_{11}\bar{x}_{11} + c_{12}\bar{x}_{12} + c_{21}\bar{x}_{21} + c_{22}\bar{x}_{22} = 221.$$

Задача оптимального планирования транспортных перевозок является обобщением предыдущего случая.

Пусть имеется система коммуникаций, связывающая m пунктов отправления и n пунктов назначения. В каждом i -м пункте отправления находится некоторое количество — a_i единиц — однородного груза ($i=1, 2, \dots, m$). Потребности пунктов назначения таковы, что в j -й пункт назначения должно быть доставлено b_j единиц этого груза ($j=1, 2, \dots, n$). Предполагается, что количество груза, находящегося во всех пунктах отправления, полностью покрывает потребности в пунктах назначения. Стоимость перевозки единицы груза из любого i -го пункта отправления в любой j -й пункт назначения известна и равна c_{ij} . Требуется найти такой план перевозок, чтобы полные затраты были минимальны.

Представим условия задачи в виде таблицы 17. Элемент c_{ij} , стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца, выражает стоимость перевозки единицы груза из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения, а соответствующий элемент x_{ij} — количество груза, планируемое к перевозке из i -го пункта в j -й пункт. Сумма элементов x_{ij} по строке не должна превышать наличия груза в данном пункте отправления, то есть

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i.$$

Сумма элементов x_{ij} по столбцу есть количество груза, ввози-

Пункты отправле- ния	Пункты назначения												
	1	2	...	j	...	n							
1	C_{11} x_{11}	C_{12} x_{12}	...	C_{1j} x_{1j}	...	C_{1n} x_{1n}	a_1						
2	C_{21} x_{21}	C_{22} x_{22}	...	C_{2j} x_{2j}	...	C_{2n} x_{2n}	a_2						
...						
i	C_{i1} x_{i1}	C_{i2} x_{i2}	...	C_{ij} x_{ij}	...	C_{in} x_{in}	a_i						
...						
m	C_{m1} x_{m1}	C_{m2} x_{m2}	...	C_{mj} x_{mj}	...	C_{mn} x_{mn}	a_m						
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>b_1</td> <td>b_2</td> <td>...</td> <td>b_j</td> <td>...</td> <td>b_n</td> </tr> </table>							b_1	b_2	...	b_j	...	b_n	
b_1	b_2	...	b_j	...	b_n								

 Исходные количества грузов
в пунктах отправления

Потребности в грузах в пунктах назначения

мого в данный пункт назначения, которое должно быть равно потребности этого пункта

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j$$

Общая стоимость C перевозки всех грузов:

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

Таким образом, задача сводится к нахождению значений x_{ij} , минимизирующих общую стоимость перевозок и может быть записана, как

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \\
 & \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq a_i \quad (i = 1, 2, \dots, m), \\
 & \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, n), \\
 & x_{ij} \geq 0.
 \end{aligned}
 \tag{12.10}$$

Задача решается методами ЛП, причем в такой ее постановке предполагается, что коммуникации, связывающие пункты отправления и места назначения, имеют неограниченную пропускную способность.

Задача о ранце. Имеется n грузов весом g_1, g_2, \dots, g_n . Оценка грузов равна c_1, c_2, \dots, c_n . Требуется загрузить ранец (самолет, корабль и т. п.) грузоподъемностью G набором грузов с максимальной суммой оценок.

Введем переменные x_1, x_2, \dots, x_n , которым придадим следующий смысл:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й груз будет перевозиться,} \\ 0, & \text{если } j\text{-й груз не будет перевозиться.} \end{cases} \quad (12.11)$$

Тогда задача о ранце записывается так:

$$\left. \begin{aligned} c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n &\rightarrow \max, \\ g_1x_1 + g_2x_2 + \dots + g_nx_n &\leq G, \\ x_1 \leq 1, x_2 \leq 1, \dots, x_n &\leq 1, \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n &\geq 0, \\ x_1, x_2, \dots, x_n &\text{— целые.} \end{aligned} \right\} \quad (12.12)$$

Задача решается методами ЦЛП.

Задача о коммивояжере является классическим примером транспортной задачи и сводится к следующему. Имеется n городов. Для каждой пары городов i и j известно расстояние S_{ij} . Требуется найти такой маршрут, который начинается и кончается в одном и том же фиксированном городе, проходя по одному разу через все остальные города. Длина маршрута должна быть минимальной.

Следует отметить, что к задаче о коммивояжере могут быть сведены и некоторые другие практически интересные задачи.

Задачи составления оптимального расписания. Имеется m машин и n деталей. Каждая деталь должна пройти обработку на всех (или некоторых) машинах. Для каждой детали имеются технологические ограничения на порядок обработки (например, деталь № 5 после обработки на машине А должна проходить обработку на машине В). Известно время обработки каждой детали на каждой машине и время переналадки каждой машины с обработки одной детали на обработку другой. Требуется найти такое расписание (такой порядок запуска деталей в обработку для каждой из машин), при котором общее время всех работ будет минимальным. Возможны и другие постановки задачи оптимального расписания.

Электронные вычислительные машины могут с успехом применяться при составлении оптимальных расписаний движения поездов, а также работать в системе диспетчерской службы крупных железнодорожных узлов.

Так, например, электронная вычислительная машина может быть использована в качестве регулятора уличного движения на перекрестках с весьма интенсивным движением. Машина учитывает количество и плотность транспорта, движущегося в одном направлении, и количество транспорта, ожидающего на поперечной магистрали; сопоставляя поступающие данные, машина выбирает оптимальный вариант движения и включает соответствующий сигнал светофора.

Задача на составление смесей. Требуется рассчитать оптимальную диету (минимальной стоимости) с нужным набором ежесуточного потребления продуктов x_1, x_2, \dots, x_n .

Введем следующие обозначения:

m — общее число требуемых питательных химических веществ (белки, жиры, углеводы и др.) и микроэлементов (железо, кальций, витамины и др.);

n — число имеющихся в распоряжении различных видов продуктов;

a_{ij} — количество единиц i -го питательного вещества, содержащегося в единице j -го продукта;

b_i — минимальная ежесуточная потребность организма в i -м питательном веществе;

c_j — стоимость единицы j -го продукта;

x_j — количество единиц j -го продукта, используемое в диете, или суточное потребление j -го продукта.

Если принять, что общее количество i -го питательного вещества в принятой диете должно быть не меньше минимальной суточной потребности в i -м питательном веществе, то

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (12.13)$$

Поскольку суточное потребление каждого продукта ограничено запасами, а также возможностями и сроками их пополнения, учитываем дополнительные условия на компоненты диеты

$$a_{ij} \geq 0, \quad x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (12.14)$$

Решением задачи будет нахождение минимума целевой функции (функции стоимости), то есть

$$c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \rightarrow \min.$$

Задача оптимального раскроя материалов. Задачу рационального (оптимального) раскроя можно сформулировать следующим образом: раскроить стандартные листы на заготовки так, чтобы при заданном количестве комплектов обеспечить минимум отходов, при этом выбранный раскрой должен удовлетворять технологическим требованиям, вытекающим из конкретных условий данного производства.

Поскольку заготовки можно расположить на листе различными способами, должен быть предусмотрен анализ наиболее целесооб-

разных вариантов расположения заготовок и получающихся при этом отходов.

Имитация условного рефлекса

Задача имитации деятельности высшей нервной системы возникает в двух отраслях научных исследований, хотя и связанных между собой, но далеко не тождественных. Первая — изучение нервной системы животных, вторая — развитие самих машин.

При нормальной работе электронная цифровая машина с автоматической последовательностью операций действительно выполняет многие функции, которые до сих пор связывали лишь с деятельностью высшей нервной системы. Кроме того, ее легко запрограммировать для имитации многих функций, для которых она не была специально рассчитана. Были построены или запрограммированы машины для игр, имитации условных рефлексов, а также таких высших типов поведения, как выход из лабиринта и распознавание форм. Поэтому вычислительные машины могут быть очень полезны при изучении нервной системы и проверке теоретических моделей строения и функций мозга.

Относительно второй задачи — разработки машин — возникает вопрос, в какой степени знание устройства мозга может быть полезно для проектировщика машин. Современные вычислительные машины превосходят человеческий мозг при выполнении ряда функций. Например, скорость и точность выполнения ими арифметических операций много выше, чем у самых выдающихся чудо-вычислителей. Но в отношении свободы от грубых ошибок и особенно приспособляемости к новым ситуациям никакая современная машина не может сравниться с человеческим организмом.

Цифровая вычислительная машина очень гибка в том смысле, что может решать весьма разнообразные задачи. Но каждую задачу машина решает по особой программе, которую она получает от человека. В то же время человек снабжен средствами успешно приспособления к таким ситуациям, которые лежат совершенно вне сферы действия любой современной машины

Другие задачи логического характера

С помощью электронных программно-управляемых машин может быть решен еще целый ряд задач логического характера. Так, например, разработана 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, кровяное давление, результаты анализа 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 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, то есть ставит диагноз. Когда диагноз поставлен, составление рецепта не представляет трудностей. Для этого в памяти машины хранится своего рода «словарь», который выдает соответственно названию каждой болезни определенный рецепт.

Интересными направлениями в области использования ЭВМ являются применение их в системе программированного обучения и контроля знаний обучающихся, применение в системе кассового обслуживания пассажиров аэрофлота, в системе торговли для анализа конъюнктуры и спроса и т. д.

Литература: [3], [27], [41], [55], [56].

§ 6. Малые электронные цифровые вычислительные машины

Малогабаритные настольные электронные вычислительные машины являются промежуточной ступенью между механическими арифмометрами и так называемыми полноклавишными электро-механическими машинами типа ВМП и ВММ, с одной стороны, и программно-управляемыми электронными цифровыми вычислительными машинами — с другой. Имея небольшие размеры, они обладают в то же время достаточно высоким быстродействием, бесшумной работой и высокой надежностью. По существу, они являются дальнейшим развитием широко известных настольных электромеханических машин, однако, в их конструкцию введен ряд элементов и устройств больших ЭВМ, что позволяет расширить возможности их применения. Так, например, некоторые машины имеют небольшие запоминающие устройства в виде одного или нескольких оперативных регистров, печатающие приставки и, в отдельных случаях, программные устройства емкостью до нескольких десятков команд.

Кроме четырех арифметических действий, эти машины могут выполнять и некоторые специальные операции, например, извлечение квадратного корня, получение алгебраической суммы частных произведений и др. Большинство из них работает в режиме плавающей запятой, что значительно облегчает проведение вычислений; они просты и удобны в обращении.

Благодаря указанным особенностям такие машины могут быть рекомендованы для выполнения несложных, но достаточно трудоемких вычислительных работ в инженерных, научных и планово-экономических расчетах.

Ниже приводятся сведения о некоторых машинах подобного типа, выпускаемых в Советском Союзе и за рубежом.

ЭЛЕКТРОННАЯ НАСТОЛЬНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА «ЛАДА»

На машине «Лада» можно выполнять следующие операции: сложение, вычитание, умножение и деление (автоматически), возведение в степень и извлечение квадратного корня (полуавтоматически с точностью до 8 разрядов); получение

алгебраической суммы частных произведений, умножение на постоянный множитель.

Вывод результатов — визуальный на цифровые индикаторные лампы типа ИН-1.

Скорость работы: сложение и вычитание 0,085 сек.; умножение 0,6 сек.

Электронная настольная вычислительная машина «вега» (рис. 146) выполнена на феррит-транзисторных элементах.



Рис. 146. Настольная электронная вычислительная машина «Вега».

На машине «Вега» автоматически выполняются следующие операции: сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень, извлечение квадратного корня, накопление алгебраической суммы произведений, закрепление постоянного числа, которое может быть слагаемым, множителем, делимым или делителем. Полуавтоматически выполняются перевод чисел из десятичной системы счисления в любую другую.

Вывод результатов производится на люминисцентный индикатор нового типа «ЭЛИ».

Полная разрядная сетка машины составляет 11 десятичных разрядов. При переполнении разрядной сетки младшие разряды отбрасываются и на индикаторе загорается знак «П», показывающий, что результат получен приближенный.

Машина «Вега» работает по принципу плавающей запятой и выполняет арифметические операции со скоростью: сложение и вычитание 0,06 сек, умножение и деление 0,6 сек, извлечение квадратного корня 5 сек.

Габариты машины 500×430×240 мм. Вес 25 кг.

В Болгарской Народной Республике выпускается полупроводниковая настольная вычислительная машина «ЕЛКА», по своим характеристикам близкая к машине «Вега».

На машине «ЕЛКА» автоматически выполняются сложение, вычитание, деление, возведение в степень, извлечение квадратного корня, накопление алгебраической суммы произведений.

Вывод результатов производится на десятичные цифровые индикаторные лампы, причем предусматривается возможность подключения электрифицированной пишущей машинки для печатания результатов.

Разрядная сетка машины составляет 16 десятичных разрядов.

Габариты машины 430×510×200 мм. Вес 19 кг.

Итальянской фирмой «Оливетти» выпускается настольная электронная вычислительная машина «Программа 101» (рис. 147) с ручным и программным управлением. Программа, предварительно фиксируемая на магнитной карте, может содержать до 120 команд.

На машине «Программа 101» автоматически выполняются сложение, вычитание, умножение, деление, извлечение квадратного корня; предусматривается возможность выбора 16 подпрограмм.

Вычислительное и управляющее устройства выполнены на транзисторах. Запоминающее устройство состоит из трех оперативных регистров по 22 десятичных разряда, пяти регистров для накопления данных по 22 разряда, двух регистров программы, каждый из которых вмещает по 24 команды, и устройства считывания и регистрации магнитных карт.

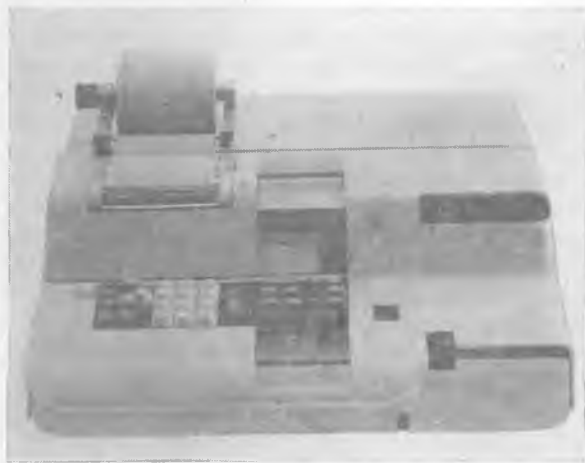


Рис. 147. Настольная электронная вычислительная машина «Программа 101»

Программным путем обеспечивается выполнение указанных арифметических операций, условных и безусловных переходов, автоматическое повторение последовательностей команд, выделение модуля числа, остановка и др.

Машина «Программа 101» имеет встроенное печатающее устройство с поворотным цилиндром, обеспечивающее печать результатов и программы в 28 колонок со скоростью 30 знаков в секунду.

Габариты машины 480×410×190 мм. Вес 29 кг

§ 7. Перспективы развития и усовершенствования электронных цифровых машин

Основной тенденцией в развитии техники цифровых машин является стремление к максимальному повышению их эффективности при одновременном уменьшении габаритов и потребляемой энергии, причем усовершенствование машин происходит по нескольким направлениям.

Повышение быстродействия машин

Увеличения быстродействия машин можно достичь применением элементов сверхвысококачастотного диапазона: параметрических

генераторов емкостного типа, имеющих два или три устойчивых состояния; элементов криогенной техники, в которых используется явление сверхпроводимости некоторых материалов при температурах, близких к абсолютному нулю; сверхтонких пленок, действие которых основано на свойствах быстрого перемагничивания; электронных приборов, основанных на использовании явления туннельного эффекта; нейристоров, построенных по схемам действия нервной клетки-нейрона; элементов с применением закона ядерных процессов и т. д.

Большинство перечисленных явлений достаточно хорошо исследовано в лабораторных условиях, и некоторые из них уже сейчас могут стать основой для создания совершенно новых типов вычислительных машин, работающих в области миллимикросекундной техники. Так, например, несколько американских фирм ведут разработку вычислительной системы «Молния» с несущей частотой 1000 мгц.

Однако при использовании таких высоких частот возникают определенные трудности, которые состоят в сложности технических приемов, обеспечивающих идентичность технических характеристик и надежности работы новых элементов, необходимости преодоления возникающих высокочастотных помех и сложности решения проблемы, связанной с наличием светового барьера при распространении электрических импульсов по соединительным трактам. Кроме того, время распространения электрических импульсов становится соизмеримым с тактовой частотой работы отдельных элементов машины. Поэтому для уменьшения времени запаздывания сигналов необходимо располагать элементы схем на минимальном расстоянии друг от друга (не более 1—2 см). Все это приводит к необходимости микроминиатюризации применяемых элементов.

Дальнейшее повышение быстродействия вычислительных машин можно получить, переходя в область электромагнитных колебаний оптического и инфракрасного диапазона на базе применения квантово-механических усилителей и генераторов, получивших название *лазеров*. Характерной особенностью лазеров является острая направленность и высокая интенсивность излучения. Использование лазерных систем в вычислительной технике открывает новые возможности, поскольку передача сигналов со скоростями миллионов импульсов в секунду осуществима только при помощи колебаний оптического диапазона.

Вычислительные машины, построенные на таких принципах и получившие название оптических вычислительных машин, еще только разрабатываются. Работы по их созданию, ведущиеся во многих странах, дают основание полагать, что оптические вычислительные машины могут быть созданы в недалеком будущем.

В элементах памяти таких машин предполагается использовать наличие в рабочем веществе лазера нескольких относительно

устойчивых энергетических состояний. Одно из этих состояний— обычное, невозбужденное, может считаться «нулевым» в устройствах, оперирующих с двоичным кодом. Другое состояние, одно из относительно устойчивых возбужденных (метастабильных) состояний, может соответствовать «единице» в некотором разряде.

Для передачи световых импульсов будут использоваться специальные волокна-световоды, представляющие собой стеклянные волокна малого диаметра (единицы и десятки микрон). Свет по волокну передается путем отражения внутри волокна. Затухание в таких волокнах доводится до очень малых величин, для чего поверхности волокон покрываются стеклом с меньшим коэффициентом преломления. Такое покрытие устраняет перекрестные наводки в соседних волокнах, связанных в пучки.

Производство таких волокон уже освоено. В настоящее время получены волокна сечением 50 мк с толщиной покрытия 10 мк. Это говорит о том, что проблему «транспортировки» световых импульсов в оптической вычислительной машине можно считать решенной.

Наиболее сложным при создании оптических вычислительных машин является конструирование логических элементов схем совпадений, вентилях и т. п.). Решение этих проблем предполагается осуществлять использованием поляризационных свойств световых сигналов, несущих информацию.

Уменьшение габаритов

Резкое уменьшение габаритов вычислительных машин может быть осуществлено *миниатюризацией* и *сверх-миниатюризацией* отдельных элементов и блоков, причем одновременно решаются вопросы снижения энергопотребления и повышения надежности работ вычислительных машин будущего.

Уже сейчас начинают широко применяться печатные схемы и модульные конструкции. Последние образуются путем размещения типовых радиотехнических элементов на галетах одинаковой формы и размеров. Галеты собираются в модули и крепятся на печатных платах, из которых и комплектуется аппаратура.

В области микроминиатюризации в настоящее время определены три основных направления:

- разработка и внедрение микромодулей;
- разработка тонкопленочных микросхем;
- разработка элементов, построенных на принципах молекулярной электроники.

Микромодули, представляющие собой законченные электронные схемы, элементарных блоков, изготавливаются в виде наборной конструкции из керамических пластин размером, например, $7,5 \times 7,5 \times 0,25$ мм, на каждую из которых наносится один из элементов схемы (емкость, сопротивление, индуктивность, полупроводниковый прибор и т. д.). Соединение микроэлементов в общей конструкции микромодуля осуществляется с помощью проводни-

ков, вставляемых в соответствующие пазы. Вся конструкция (рис. 148) заливается эпоксидной смолой, образуя надежный и монолитный блок с соответствующими входными и выходными параметрами. В настоящее время уже созданы и применяются в различных электронных схемах такие микромодули, как генераторы импульсов, схемы формирования, генераторы пилообразного напряжения, делители частоты следования импульсов и т. п. Внедре-



Рис. 148. Герметически упакованные микромодульные схемы.

ние микромодулей позволит снизить, по крайней мере, в 10 раз габариты современных машин при значительном уменьшении их веса.

Второй путь уменьшения размеров функциональных блоков связан с техникой тонких пленок и печатного монтажа, с помощью которых образуются необходимые микросхемы из активных и пассивных элементов. Полупроводниковые приборы либо присоединяются к микросхеме, либо формируются с ней на общей подложке. Применение таких схем уже в настоящее время обеспечивает двадцатипятикратную экономию в весе и уменьшение габаритов машин.

Наконец, одним из наиболее перспективных направлений для сокращения габаритов машин являются методы молекулярной электроники (молектроники), реализуемые путем создания так называемых полупроводниковых *твердых схем*. В настоящее время установлено, что электрические свойства твердого тела можно изменять за счет инородных и структурных дефектов. Кристаллическая решетка твердого тела может быть перестроена таким образом, что одна полупроводниковая пластинка будет представлять собой целый функциональный блок. При условии особой технологической обработки на одном кристалле могут быть получены простые мультивибраторы, счетные схемы и т. д. При этом отдельные элементы схемы становятся неразличимыми, а электрические параметры оказываются распределенными.

Объем такого функционального блока может составлять, на-

пример, $0,16 \text{ см}^3$. Соответствующая схема, выполненная на обычных полупроводниковых приборах и деталях, занимала бы объем в 1000 раз больший. На рис. 149 показана схема, собранная на панели с печатным монтажом из обычных деталей, а рядом для сравнения показаны пять функциональных блоков, заменяющих эту схему.

На основе использования таких функциональных блоков была разработана двоичная электронно - вычислительная машина общего назначения, последовательного действия, с фиксированной запятой. Длина кода, используемого в этой машине, составляет 10 разрядов плюс знак. Емкость запоминающего устройства — 300 двоичных единиц.

Разработанная электронно - вычислительная машина состоит из 47 сменных модулей (рис. 150), каждый из которых содержит от 8 до 16 функциональных блоков. Вся

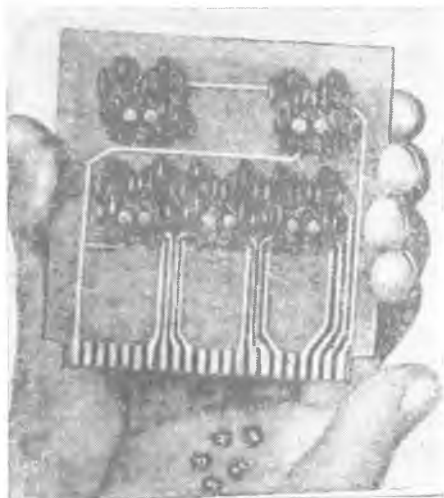


Рис. 149. Схема, собранная на панели с печатным монтажом из обычных деталей, и заменяющие ее пять функциональных блоков.



Рис. 150. Электронно-вычислительная машина, собранная из функциональных блоков фирмы Texas.

машина в целом содержит 587 функциональных блоков; каждый модуль имеет объем около 1 см^3 и вес 1,2 г.

Успешно разрабатываются также функциональные схемы, основанные на сочетании твердых схем и монокристаллических пленочных покрытий. В свете последних открытий в области атомной физики намечаются планы создания молекулярных схем на новых физических основах. Для выполнения электрических функций

в этих схемах используются явления вращения элементарных частиц, электрических зарядов и полей (например, элементы «спин-эхо»).

Несомненный интерес представляют машины и устройства, разрабатываемые на принципах *бионики*. Используя закономерности биологических процессов, бионика создает системы, воспроизводящие ряд функций, свойственных живым организмам. Перенесение принципов организации нервной системы живых организмов в современные вычислительные машины является весьма важной проблемой. Сейчас уже делаются попытки использовать эти биологические основы для создания новых элементов. Например, ведутся работы по созданию нового элемента — *артрона*, основанного на имитации элементарного мыслительного акта, разрабатываются устройства типа *персептрон*, предназначенные для распознавания образов и т. п.

Повышение гибкости структуры машин

Эффективность электронных цифровых машин возрастает с разработкой оптимальных принципов организации работы машины, построения ее структуры, совмещения во времени различных операций, выполняемых отдельными частями машины, выбора рационального алгоритма задачи.

В последних конструкциях машин широко используется принцип параллелизма в работе их отдельных блоков и устройств, одновременное выполнение нескольких команд, а также улучшение математических и логических методов выполнения операций.

Так, например, в машине «Стретч» (США) может параллельно работать несколько центральных устройств, несколько каналов обмена информации и запоминающих устройств, несколько каналов чтения-записи. Все это реализуется с помощью встроенных логических схем и специальных подпрограмм и приказов.

В последние годы начал разрабатываться и применяться новый способ выработки серий управляющих сигналов, получивший название *микропрограммирования*.

Устройство центрального управления в обычной машине вырабатывает необходимые серии управляющих сигналов, которые включают в работу различные функциональные блоки машины, в том числе и блоки самого устройства управления. При этом выработка серии управляющих сигналов осуществляется схемным путем.

При способе микропрограммирования заранее определяются все последовательности управляющих сигналов серии, необходимой для выполнения всех машинных операций. Каждая серия сигналов, относящаяся к определенной машинной операции, образует своего рода программу выполнения машиной отдельной команды, так называемую *микропрограмму*, а каждый сигнал, входящий в

эту микропрограмму, является *микрокомандой*. Эти серии сигналов (микропрограммы) записываются в специальное запоминающее устройство.

Для исполнения очередной команды устройство управления находит в памяти соответствующую микропрограмму и выдает последовательно все микрокоманды, входящие в состав этой микропрограммы. Сигналы от каждой микрокоманды управляют соответствующими функциональными блоками машины и обеспечивают выполнение требуемых действий, а последовательность микрокоманд обеспечивает выполнение заданной команды. После выполнения всей микропрограммы происходит вызов следующей команды основной программы и затем вызов и выполнение соответствующей микропрограммы и т. д.

Система микропрограммного управления обеспечивает значительную гибкость структуры машины и возможность изменения системы команд и состава машинных операций в зависимости от особенностей решаемых задач и условий применения машины.

Для машины с микропрограммным управлением необходимо, помимо оперативного запоминающего устройства, специальное запоминающее устройство для микропрограмм сравнительно небольшой емкости, но значительно более *быстродействующее*, чем основное ЗУ. С помощью микропрограммного управления обеспечивается возможность сравнительно простой реализации различных сложных операций, таких, как извлечение корня, вычисление тригонометрических функций и т. п., которые обычно получаются с помощью достаточно сложных подпрограмм с затратой большого количества машинного времени. Кроме того, микропрограммирование позволяет более просто и стройно с логической точки зрения построить систему управления электронной цифровой машины.

Недостатками принципа микропрограммного управления являются трудность получения высокого быстродействия машины, так как это требует резкого повышения скорости работы микропрограммной памяти, и наличие большого количества связей устройства центрального управления машины с остальными устройствами.

Что касается общих вопросов конструктивного построения, то в настоящее время получила распространение тенденция агрегатного построения машин. При этом отдельные устройства машин (запоминающие, арифметическое и др.) конструктивно оформляются в виде отдельных шкафов, включающих в себя также все необходимые управляющие и вспомогательные схемы. Из таких шкафов может собираться машина, причем в зависимости от потребностей в состав машины включается большее или меньшее количество типовых агрегатов.

Широко распространение получило производство стандартных блоков электронных цифровых машин. Среди выпускаемых стандартных блоков имеются усилители, триггеры, мультивибраторы, формирователи прямоугольных импульсов, линии задержки, генераторы, схемы совпадения, собирательные схемы, магнитные бара-

баны, устройства для ввода и др., то есть все элементы и узлы, необходимые для строительства машин.

Совершенствование гибкости управления машинами

Быстродействие элементов современных ЭВМ исчисляется микросекундами и наносекундами. Однако увеличение общей скорости решения задач не может быть достигнуто только за счет введения новых элементов и схем, поскольку существует определенная диспропорция между скоростью работы центральных и внешних устройств машины. По этой причине значительная часть времени «последовательных» машин расходуется на ввод и вывод информации при бездействующем центральном вычислителе. Это особенно заметно при решении задач с малым объемом вычислений, но с большим количеством информации, поступающей на обработку (таковы, например, многие экономические задачи).

Потери машинного времени могут быть значительно сокращены путем использования так называемых *мультипрограммных систем управления*. В этом случае в машину вводятся несколько программ решения различных задач и совмещается во времени работа внешних и центральных устройств. В частности, если для одной из решаемых задач вводится некоторый массив данных, без которых дальнейшее решение этой задачи невозможно, то одновременно центральное устройство может производить вычисления по другой программе.

Мультипрограммная система должна устанавливать очередность выполнения различных программ, порядок перехода из одной программы в другую, последовательность использования внешних устройств, обнаруживать ошибки, исследовать их характер и принимать соответствующие меры для продолжения работы. Эти сложные задачи могут быть решены путем совершенствования встроеной логики машин и применением специальной *программы-диспетчера*. Такая программа, используя имеющиеся в ее распоряжении аппаратные средства, должна управлять распределением места и времени для каждой основной программы. При этом программа-диспетчер руководит осуществлением операций ввода и вывода, организует обмен информацией между оперативной памятью и внешними накопителями, исследует причины прерываний и определяет характер дальнейшей работы. Проведенные эксперименты показали, что производительность машин с мультипрограммным управлением возрастает в 1,5—2,5 раза. Становятся вполне реальными системы с использованием целых машинных комплексов.

Литература: [27], [47], [48], [51].

ЛИТЕРАТУРА

Популярная

1. Архангельский Н. А., Зайцев Б. И. Автоматические цифровые машины. Физматгиз, 1958.
2. Беркли Э. Символическая логика и разумные машины. ИЛ, 1961.
3. Кобринский Н. Е., Пекеллис В. Д. Быстрее мысли. Изд-во «Молодая гвардия», М., 1959.
4. Пуайен Жак, Пуайен Жанна. Электронный язык, пер. с франц., Физматгиз, 1963.
5. Трахтенброт Б. А. Алгоритмы и машинное решение задач. Физматгиз, М., 1960.
6. Фридлиндер Ф. Л., Цейтлин Л. А. Электронные вычислительные машины. Изд-во «Высшая школа», 1961.

Общие вопросы

7. Зимин В. А. Электронные вычислительные машины. Машгиз, 1962.
8. Пелегрин М. Электронные вычислительные машины, пер. с франц., изд-во «Машиностроение», М., 1964.
9. Сучилин. Основы вычислительной техники, изд-во «Энергия». М.—Л., 1964.

Моделирующие устройства

10. Акиндеев А. Е., Малевич А. А., Румянцев Е. А. Руководство к работе на электронных моделях МПТ-9, МН-7, ИПТ-5. ВВИА им. Жуковского, 1958.
11. Васильев Д. В., Чунч В. Г. Расчет систем автоматического управления. Машгиз. М.—Л., 1959.
12. Волюнский Б. А., Бухман В. Е. Модели для решения краевых задач. Физматгиз, 1960.
13. Вопросы вычислительной математики и вычислительной техники. Под редакцией чл.-корр. АН СССР Люстерника Л. А. Машгиз, 1963.
14. Вопросы расчета и конструирования электронных вычислительных машин. Выпуск 1. Машгиз, 1960.
15. Кобринский Н. Е. Математические машины непрерывного действия. Гостехиздат, 1954.
16. Коган В. Я. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. Физматгиз, 1959.
17. Корн Г., Корн Т. Электронные моделирующие устройства. Изд. иностр. литературы, 1955.

18. Смолов В. Б. и др. Вычислительные машины непрерывного действия. Изд. «Высшая школа», Москва, 1964.
19. Тетельбаум И. М. Электрическое моделирование. Физматгиз, 1959.
20. Пухов Г. Е. и др. Электрическое моделирование задач строительной механики. Изд. АН УССР, Киев, 1963.

Электронные цифровые машины

21. Альферова З. В. и др. Комплекс электронных вычислительных машин для экономических расчетов и анализа «Эра», УПЗ-1, УПЗ-П. Вопросы радиоэлектроники. Серия VII. Выпуск 4, 1962.
22. Анисимов Б. В., Четвериков В. Н. Основы теории и проектирования цифровых вычислительных машин. Машгиз, 1962.
23. Бут Э., Бут К. Автоматические цифровые машины. Физматгиз, 1959.
24. Гутенмахер Л. И. Электронные информационно-логические машины. Изд. АН СССР, Москва, 1960.
25. Дроздов Д. А., Прохоров В. И., Пятибратов А. П. Основы вычислительной техники. Воениздат. Москва, 1961.
26. Каляев А. В., Пьявченко О. Н. Электронный цифровой дифференциальный анализатор «Метеор-1». Передовой научно-технический и производственный опыт. Электронные вычислительные и управляющие машины. ГОСИНТИ. Москва, 1963.
27. Китов А. И., Криницкий Н. А. Электронные цифровые машины и программирование. Физматгиз, 1959.
28. Клейн М., Морган Г., Аронсон М. Цифровая техника для вычислений и управления. ИЛ. Москва, 1960.
29. Комбинированные вычислительные машины. Труды 2-й Всесоюзной конференции по теории и методам математического моделирования. Изд. АН СССР. Москва, 1962.
30. Крайзмер Л. П. Новые элементы электронных цифровых машин. Госэнергоиздат. М.—Л., 1961.
31. Крайзмер Л. П. Устройства хранения дискретной информации. Госэнергоиздат. М.—Л., 1961.
32. Кулик В. Т. Принципы алгоритмизации и построения управляющих машин. Гос. Изд-во технической литературы УССР. Киев, 1963.
33. Лоскутов В. И. Управляющие математические машины. Машгиз, 1962.
34. Майоров Ф. В. Электронные цифровые интегрирующие машины. Машгиз, 1962.
35. Малиновский Б. Н. Цифровые управляющие машины и автоматизация производства. Машгиз, 1963.
36. Уилкс М. В. Автоматические цифровые вычислительные машины. Судпромгиз. Ленинград, 1960.

Программирование

37. Айнберг В. Д., Сабсович Л. Л. Сборник задач и упражнений по программированию для ЭЦВМ Урал-1. Изд-во «Машиностроение». М., 1964.
38. Боттенбрух Г. Структура АЛГОЛ-60 и его использование. ИЛ, 1963.
39. Гнеденко Б. В., Королюк В. С., Ющенко Е. Л. Элементы программирования. Физматгиз. М., 1961.
40. Жоголев Е. А., Трифонов Н. П. Курс программирования. Изд-во «Наука». М., 1964.
41. Каган Б. М., Тер-Микаэлян Т. М. Решение инженерных задач на цифровых вычислительных машинах. Изд-во «Энергия». М.—Л., 1964.
42. Криницкий Н. А., Мионов Г. А., Фролов Г. Д. Программирование. Изд-во физико-математической литературы. М., 1963.
43. Лавров С. С. Универсальный язык программирования. Изд-во «Наука». М., 1964.
44. Мак-Кракен Д. Д. Программирование для цифровых вычислительных машин. ИЛ. М., 1960.
45. Ледли Р. С. Программирование и использование цифровых вычислительных машин. Изд-во «Мир». М., 1966.

Справочная литература

46. Вавилова А. С., Жевелева И. С. Электронные вычислительные машины за рубежом. Машгиз, 1962.
47. Килнер Д. Е. Характеристики вычислительных машин второго десятилетия (обзор). Кибернетический сборник 5. ИЛ, 1962.
48. Лоскутов В. И. Развитие вычислительной техники за рубежом. Приборостроение. № 5, 1963.
49. Справочник программиста.

Дополнительная литература

50. Автоматическое управление и вычислительная техника. Сборник под ред. Солодовникова В. В. Машгиз, М., 1958.
 51. Азарх С. Х., Фрид Е. А. Микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Госэнергоиздат. М.—Л., 1963.
 52. Гитис Э. И. Электрорадиоавтоматика. Госэнергоиздат. М.—Л., 1959.
 53. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. Госэнергоиздат, 1961.
 54. Дроздов Е. А., Пятибратов А. П. Автоматическое преобразование и кодирование информации. Изд-во «Советское радио». М., 1964.
 55. Кибернетику на службу коммунизму. Под редакцией акад. Берга А. Госэнергоиздат. Ленинград, 1961.
 56. Красовский А. А., Поспелов Г. С. Основы автоматки и технической кибернетики. Госэнергоиздат. М.—Л., 1962.
 57. Скотт Н. Р. Техника аналоговых и цифровых вычислительных машин. Пер. с англ. ИЛ. М., 1963.
-
-

СОДЕРЖАНИЕ

Общие сведения о математических машинах	3
Электронные математические машины непрерывного действия	
Глава I. Решающие элементы	9
§ 1. Линейные решающие элементы разомкнутого типа	9
§ 2. Линейные решающие элементы замкнутого типа	13
Глава II. Методика набора и решения задач	18
§ 1. Составление структурных схем	18
§ 2. Выбор масштабов и расчет коэффициентов передач решающих элементов	21
§ 3. Задание начальных условий и внешних возмущений	24
Глава III. Принципы построения электронных моделирующих устройств на постоянном токе	26
§ 1. Схемы решающих усилителей постоянного тока	26
§ 2. Погрешности решающих усилителей постоянного тока	32
§ 3. Системы управления моделями. Режимы работы	33
§ 4. Измерительная аппаратура для снятия решения	35
Глава IV. Моделирование нелинейных зависимостей	38
§ 1. Электромеханические функциональные преобразователи	39
§ 2. Электронные функциональные преобразователи	42
§ 3. Множительные и делительные устройства	46
Глава V. Решение задач на моделирующих установках	48
§ 1. Решение линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами	49
§ 2. Решение линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами	52
§ 3. Решение нелинейных дифференциальных уравнений	54
§ 4. Решение краевых задач на моделирующих установках	55
§ 5. Моделирование систем автоматического регулирования	56
§ 6. Электронные моделирующие установки общего назначения	61
§ 7. Моделирующие устройства специализированного типа	66
Электрическое моделирование на основе аналогий	
Глава VI. Принципы построения моделей-аналогов	71
§ 1. Моделирование на основе аналогий	71
§ 2. Электромеханические аналогии	72
§ 3. Электрическое моделирование стержневых систем	76

Глава VII. Электрическое моделирование физических полей	77
§ 1. Моделирование полей методом сплошных сред	79
§ 2. Моделирование полей методом электрических сеток	84
§ 3. Статические электроинтеграторы	93
§ 4. Электроинтеграторы для решения краевых задач математической физики	95

Электронные цифровые вычислительные машины

Глава VIII. Принципы построения электронных цифровых вычислительных машин	100
§ 1. Функциональная схема ЭВМ. Принцип работы	101
§ 2. Системы счисления. Перевод чисел из одной системы в другую	106
§ 3. Арифметические операции в двоичной системе счисления	113
§ 4. Машины с фиксированной и плавающей запятой. Нормальная форма представления чисел	116
§ 5. Кодовое представление чисел	120
§ 6. Элементы математической логики	127
Глава IX. Основные устройства ЭВМ	132
§ 1. Переключательные и логические элементы электронных схем	132
§ 2. Арифметические устройства ЭВМ	137
§ 3. Запоминающие устройства ЭВМ	139
§ 4. Устройства управления ЭВМ	149
§ 5. Устройства ввода информации и вывода результатов	153
Глава X. Подготовка и решение задач на электронных цифровых машинах	160
§ 1. Разработка решающего алгоритма	162
§ 2. Составление блок-схемы программы	168
§ 3. Выбор масштабов	169
§ 4. Принципы программирования	172
§ 5. Операторное программирование	180
§ 6. Библиотека стандартных подпрограмм	184
§ 7. Контроль за подготовкой и решением задач на машине	186
Глава XI. Автоматизация программирования	189
§ 1. Принципы автоматического программирования	189
§ 2. Классификация программирующих программ	191
§ 3. Символические языки	193
§ 4. Универсальный язык	195
Глава XII. Современные электронные цифровые машины, их возможности и области применения	198
§ 1. Машины для математических вычислений	199
§ 2. Машины для обработки информации	208
§ 3. Управляющие математические машины	210
§ 4. Машины для экономических расчетов	217
§ 5. Использование машин для решения логических и комбинаторных задач	224
§ 6. Малые электронные цифровые вычислительные машины	235
§ 7. Перспективы развития и усовершенствования электронных цифровых машин	237
Литература	245

Юрий Николаевич Малиев
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
В ИНЖЕНЕРНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Учебное пособие

Часть I

Редактор И. С. Кольшева
Технический редактор Н. М. Земскова
Корректор И. Б. Гридина

ЕО00225. Сдано в набор 5/IX-1967 г. Подписано в печать 22/III-1968 г. Объем 15,75 печ. л. Тираж 3000 экз.
Цена 1 р. 21 к.

Куйбышевский авиационный институт
им. С. П. Королева
Типография изд-ва «Волжская коммуна»,
г. Куйбышев, пр. Карла Маркса, 201.
Заказ № 5694.