



**МОСКОВСКИЙ
ИНЖЕНЕРНО
ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

**И. М. ВИТЕНБЕРГ, Д. М. ДЕМЬЯНЕНКО, В. И. КАТАШКИН,
И. К. ОГОРОВОДА, Ю. В. ОГОРОВОД, В. Д. ЧАЛЫИ**

АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

МОСКВА — 1964

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

И. М. ВИТЕНБЕРГ, Д. М. ДЕМЬЯНЕНКО, В. И. КАТАШКИН,
И. К. ОГОРОВОДА, Ю. В. ОГОРODOV, В. Д. ЧАЛЫЙ

АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Утверждено кафедрой в качестве учебного пособия

МОСКВА 1964

Настоящее учебное пособие рассчитано на студентов специальности «Вычислительная техника», но может быть полезным студентам других специальностей, изучающих аналоговые вычислительные машины.

Пособие может быть также рекомендовано инженерам и научным работникам, использующим в своей работе вычислительную технику.

Глава I

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Универсальные аналоговые вычислительные машины общего назначения содержат ряд блоков, выполняющих следующие математические операции: алгебраическое суммирование, масштабное преобразование и инвертирование, интегрирование, умножение на постоянный и переменный коэффициент, перемножение двух переменных и функциональное преобразование. Соединение блоков между собой обеспечивает выполнение комплексных вычислительных операций.

1. Алгебраическое суммирование

Операция алгебраического суммирования выполняется с помощью усилителя постоянного тока с нечетным числом каскадов и большим коэффициентом усиления, охваченного глубокой активной отрицательной обратной связью и имеющего несколько активных входных сопротивлений.

Схема суммирующего усилителя представлена на рис. 1.

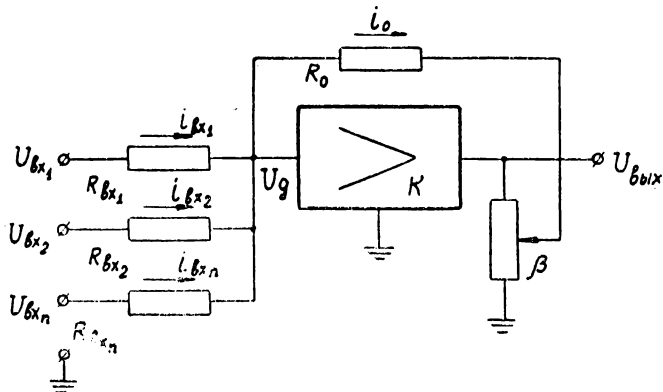


Рис. 1.

Если пренебречь величиной тока, потребляемого входной цепью усилителя, то уравнения, описывающие эту схему, могут быть записаны в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{\text{вх}_1} + i_{\text{вх}_2} + \dots + i_{\text{вх}_n} = i_0, \\ i_{\text{вх}_1} = \frac{U_{\text{вх}_1} - U_g}{R_{\text{вх}_1}}, \\ i_{\text{вх}_2} = \frac{U_{\text{вх}_2} - U_g}{R_{\text{вх}_2}}, \\ i_{\text{вх}_n} = \frac{U_{\text{вх}_n} - U_g}{R_{\text{вх}_n}}, \\ i_0 = \frac{U_g - \beta U_{\text{вых}}}{R_0}, \\ U_{\text{вых}} = -k U_g. \end{array} \right. \quad (1)$$

Решением системы (1) является:

$$U_{\text{вых}} = - \frac{k \sum_{i=1}^n U_{\text{вх}_i} \frac{R_0}{R_{\text{вх}_i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{R_0}{R_{\text{вх}_i}} + 1 + \beta k}, \quad (2)$$

или при $k \gg 1$

$$U_{\text{вых}} \cong - \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^n U_{\text{вх}_i} \frac{R_0}{R_{\text{вх}_i}}.$$

2. Масштабное преобразование и инвертирование

Операция масштабного преобразования и инвертирования производится при использовании одного входа суммирующего усилителя. Для инвертирования (перемены знака) используется схема с равным входным сопротивлением и сопротивлением обратной связи.

3. Интегрирование

Операция интегрирования также выполняется с помощью усилителя постоянного тока с нечетным числом каскадов и большим коэффициентом усиления, охваченного емкостной отрицательной обратной связью. Предположим, что ток, потребляемый входной цепью усилителя, пренебрежимо мал.

Тогда система уравнений, описывающая схему, приведенную на рис. 2, имеет вид:

$$\begin{aligned} i_{\text{вх}} &= i_0, \\ i_{\text{вх}} &= \frac{U_{\text{вх}} - U_g}{R}, \\ i_0 &= C \frac{d(U_g - U_{\text{вых}})}{dt}, \\ U_{\text{вых}} &= -kU_g. \end{aligned} \quad (3)$$

Система (3) сводится к линейному дифференциальному уравнению первого порядка:

$$\frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + \frac{1}{RC(k+1)} U_{\text{вых}} + \frac{k}{RC(k+1)} U_{\text{вх}} = 0, \quad (4)$$

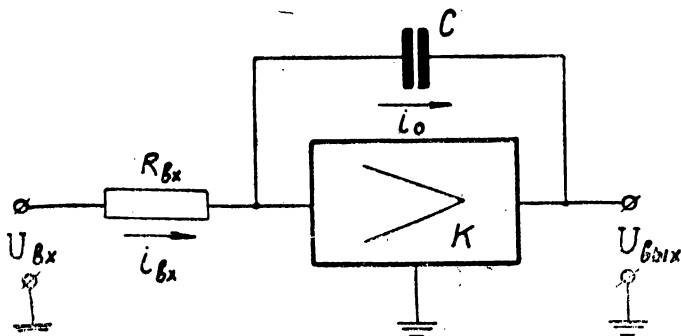


Рис. 2.

решение которого при постоянном $U_{\text{вх}}$ имеет вид:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{kU_{\text{вх}}}{(k+1)RC} \left[1 - e^{-\frac{t}{(k+1)RC}} \right]. \quad (5)$$

При достаточно большом k

$$U_{\text{вых}} \cong -\frac{1}{RC} U_{\text{вх}} t, \quad (6)$$

а для случая переменного входного напряжения

$$U_{\text{вых}} \cong -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt. \quad (7)$$

4. Умножение на постоянный коэффициент

Операция умножения на постоянный коэффициент соответствует операции масштабного преобразования. Чтобы обеспечить выполнение этой операции, необходимо установить

соответствующие отношения величин сопротивлений обратной связи к величинам входных сопротивлений усилителей. Кроме того, в аналоговых вычислительных машинах МН-2, МН-7, ИПТ-5 для умножения на постоянный коэффициент предусмотрено применение потенциометрических делителей напряжения.

5. Умножение на переменный коэффициент

Операция умножения на переменный коэффициент выполняется с помощью схемы, изображенной на рис. 3. Выходное напряжение между движком и «землей» будет равно

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{r}{R}. \quad (8)$$

Если движок потенциометра перемещается таким образом, что величина r является заданной функцией времени, то выходное напряжение будет равно произведению входного напряжения на переменный коэффициент. Потенциометр обычно выполняется в виде стосекционного делителя, а перемещение движка потенциометра в функции времени обеспечивается шаговым искателем и схемой коммутации.

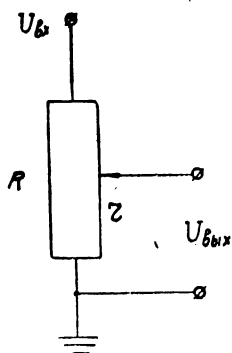


Рис. 3.

6. Перемножение двух переменных

Во всех описываемых ниже машинах перемножение двух переменных производится схемной реализацией выражения:

$$ab = \frac{1}{4} [(a + b)^2 - (a - b)^2]. \quad (9)$$

Алгебраическое суммирование перемножаемых величин (a и b) производится с помощью сопротивлений. Возведение в квадрат осуществляется методом кусочно-линейной аппроксимации параболы с применением диодных элементов. Суммирование отрезков прямых и получение величины произведения производится с помощью суммирующего усилителя.

7. Функциональное преобразование

Эта операция производится методом кусочно-линейной аппроксимации функций, подлежащих воспроизведению. Аппроксимация функции производится 11—13 отрезками путем замены требуемой зависимости функцией вида:

$$y = f(x) = y_0 + kx + \sum_{i=1}^n b(x - x_{i_{нач}}). \quad (10)$$

Зависимость вида:

$$y = b_i(x - x_{i_{\text{нач}}}) \quad (11)$$

реализуется с помощью диодного элемента, изображенного на рис. 4. При этом величина начального значения $x_{i_{\text{нач}}}$ устанавливается перемещением ползунка потенциометра α , величина коэффициента b_i изменяется перемещением ползунка

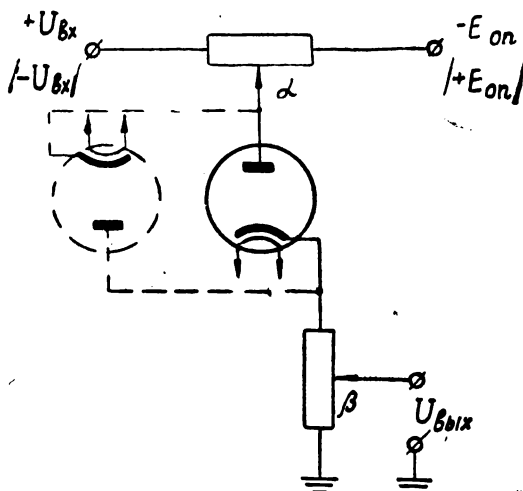


Рис. 4.

потенциометра β , а знак коэффициента b_i меняется в зависимости от знаков напряжений $U_{\text{вх}}$ и $E_{\text{оп}}$ и изменения схемы включения диода.

Величина y_0 образуется с помощью потенциометра, подключенного к источнику напряжения постоянного тока; величина kx обеспечивается с помощью потенциометра, на вход которого поступает входное напряжение $U_{\text{вх}}$. Суммирование всех членов выражения (10) и получение величины y производится с помощью суммирующего усилителя.

Глава II

ОБЩАЯ МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НА АВМ

ПОРЯДОК ПОДГОТОВКИ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ К РЕШЕНИЮ НА АВМ

Аналоговые вычислительные машины являются устройствами с жесткими связями между блоками, выполняющими определенные математические операции.

При решении систем обыкновенных дифференциальных уравнений на аналоговых вычислительных машинах рекомендуется соблюдать предлагаемую последовательность работ:

1. Приведение заданной системы уравнений к виду, удобному для моделирования.

2. Составление структурной схемы соединений между блоками.

3. Расчет масштабов величин (известных, промежуточных и искомых).

4. Расчет коэффициентов передачи суммирующих и интегрирующих усилителей.

5. Подготовка функциональных преобразователей (блоков нелинейности) к решению.

6. Подготовка блоков переменного коэффициента к решению.

7. Установка в операционных блоках рассчитанных коэффициентов передачи.

8. Соединение операционных блоков согласно структурной схеме на коммутационном поле машины и проверка правильности соединений.

9. Пробное решение задачи и проверка выбранных масштабов.

10. Перерасчет масштабов и перенастройка блоков (в случае необходимости).

11. Вторичное пробное решение, и, в случае удачного выбора масштабов, исследование заданной системы уравнений на машине.

Ниже будут рассмотрены основные из перечисленных выше работ.

1. Приведение заданной системы уравнений к виду, удобному для моделирования

Приведение системы к виду, удобному для моделирования, сводится к таким действиям над заданной системой дифференциальных уравнений, которые облегчают составление структурных схем. Приведение системы уравнений к виду, удобному для моделирования, в основном заключается в выполнении операций понижения порядка заданной системы и разрешении уравнений относительно производных, что легче всего рассмотреть на примере. Пусть задано уравнение:

$$\frac{d^3z}{dt^3} + A \frac{d^2z}{dt^2} + B \frac{dz}{dt} + Kz + L = 0. \quad (12)$$

После подстановок $\frac{dz}{dt} = y$, $\frac{dy}{dt} = x$ и разрешения относительно производных, уравнение (12) преобразуется к системе трех уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= x, \\ \frac{dx}{dt} &= -(Ax + By + Kz + L). \end{aligned} \quad (13)$$

Из рассмотренного примера вытекает следующее правило преобразования, являющееся общим для преобразований подобного рода и применимое к уравнениям любого порядка: *если задана система k уравнений, в которой каждое из уравнений имеет соответственно $m_1, m_2, m_3, \dots, m_k$ порядок, то такая система преобразуется вышеуказанным способом к системе n уравнений первого порядка, где:*

$$n = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_k. \quad (14)$$

2. Составление структурной схемы соединений между блоками

Структурная схема моделирования системы дифференциальных уравнений представляет собой схему соединений операционных блоков в последовательности, определяемой заданной системой уравнений.

Для построения структурных схем используется метод неявных функций, который в применении к схемам электрического моделирования заключается в следующем: все неизвест

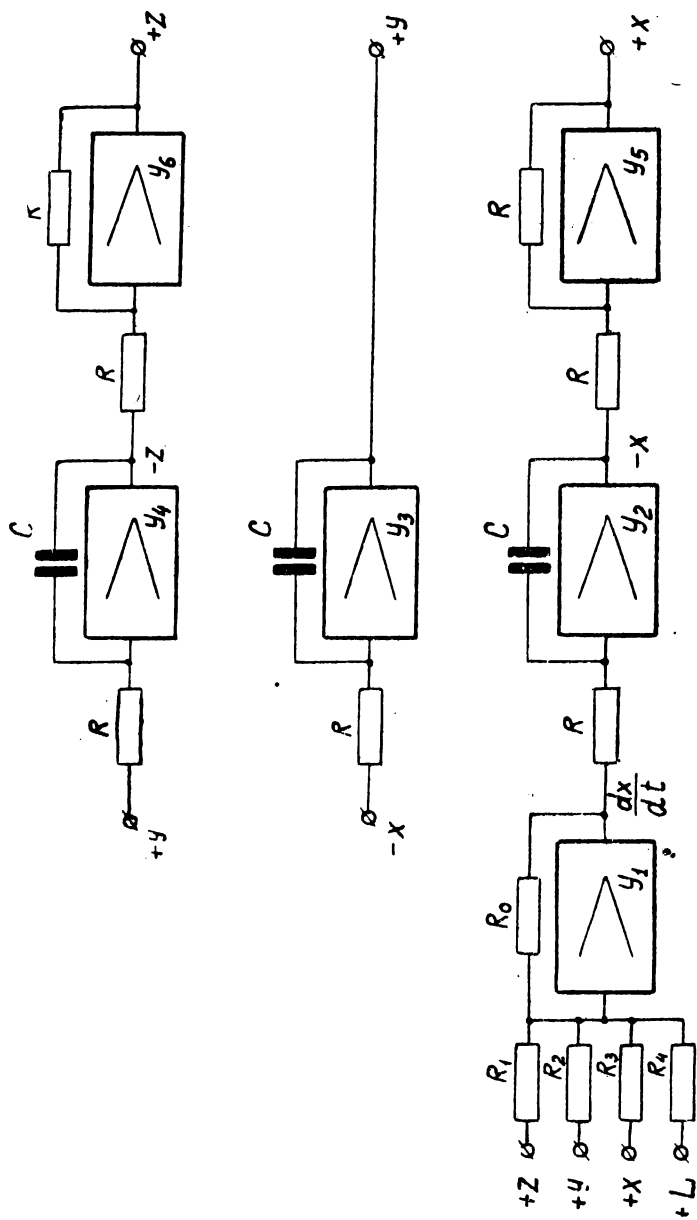


Рис. 5.

ные (искомые) переменные схемы считаются заданными и подаются на входы соответствующих операционных блоков. Рассмотрим применение метода неявных функций на примере. Пусть требуется составить структурную схему для решения системы (13). Неизвестные x , y и z могут образоваться только в результате интегрирования, но при построении структурной схемы их нужно считать известными. При этом величины x , y , z являются выходными величинами соответствующих интегрирующих усилителей, как это и показано на рис. 5. На входах указанных интегрирующих усилителей должны действовать соответствующие производные. Учитывая, что $y = \frac{dz}{dt}$, а $x = \frac{dy}{dt}$, выход усилителя $У_2$ следует соединить с входом $У_3$, а вход $У_4$ с выходом $У_3$. Полученные на выходах интегрирующих усилителей величины z , y , x и величина L суммируются с помощью усилителя $У_1$. Таким образом, на выходе $У_1$ образуется напряжение, пропорциональное производной $\frac{dx}{dt} = -(Ax + By + Kz + L)$, которое подается на вход интегрирующего усилителя $У_2$. Усилители $У_5$ и $У_6$ служат для изменения знака переменных x и z . Аналогичным образом составляются все структурные схемы.

Вид структурной схемы зависит от того, как выполнены в машине отдельные операционные блоки. Так, например, в ма-

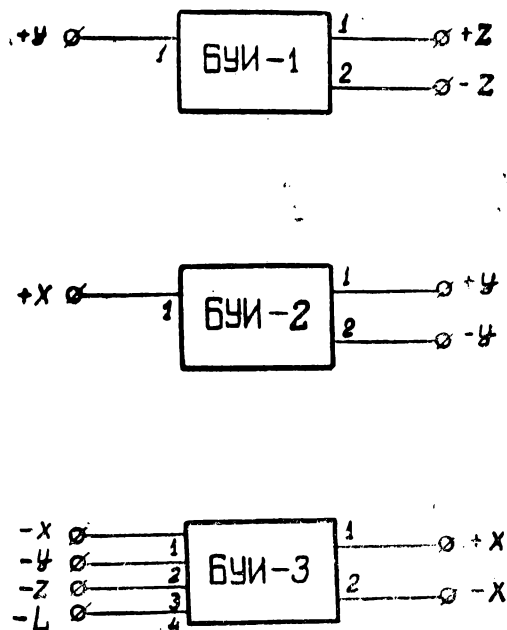


Рис. 5.

шине МН-2 блок интегрирующего усилителя включает в себя суммирующий, интегрирующий усилители, а также усилители задания начальных условий и перемены знака. Поэтому вид структурной схемы будет отличаться от вышеприведенной. Для той же системы уравнений (13) при решении ее на МН-2 структурная схема будет выглядеть так, как показано на рис. 6.

На схемах (рис. 5 и 6) не показаны соединения выходов усилителей (блоков) со входами этих усилителей, так как эти соединения затруднили бы чтение схемы. Составляя структурную схему, следует обращать внимание на форму записи системы уравнения, так как от этого зависит экономное использование усилителей (блоков) машины. Количество используемых усилителей всегда следует сводить к минимуму. При составлении структурных схем следует также отдавать предпочтение более простым блокам. Например, если операцию деления можно свести путем несложных преобразований структурной схемы к операции умножения, то замена блока деления блоком перемножения будет целесообразной, так как блок деления более сложен и менее точен в работе, чем блок перемножения. Следует также помнить, что почти все операционные блоки АВМ кроме основной математической операции выполняют еще и дополнительную — умножение величины на (-1) .

3. Расчет масштабов величин и определение коэффициентов передачи операционных усилителей

В аналоговых вычислительных машинах все искомые, промежуточные и заданные переменные представляются соответствующими машинными переменными; в электронных АВМ они чаще всего выражаются напряжениями или токами. Связь между физическими и машинными переменными в АВМ устанавливается с помощью масштабных соотношений (масштабов). Масштабом или масштабным коэффициентом физической переменной x обычно называют некоторый множитель на который надо разделить значение машинной переменной, чтобы получить значение искомой физической переменной x .

Таким образом:

$$M_x = \frac{U_x}{x} = \frac{\text{значение машинной переменной}}{\text{значение физической переменной}}. \quad (14)$$

Масштабный коэффициент M_x всегда имеет размерность, если размерности физической и машинной переменной не совпадают. Так например, если величина x измеряется в радианах, а величина U_x — в вольтах, то размерность M_x будет:

$$[M_x] = \left[\frac{\text{вольт}}{\text{радиан}} \right]. \quad (15)$$

В целях максимального использования шкалы операционных блоков машины масштабные коэффициенты выбираются из условия

$$M_x = \frac{U_{x_{\max}}}{x_{\max}}. \quad (16)$$

Обычно максимальное значение машинной переменной равно 100 в.

Выбор масштабов начинается с оценки максимальных значений переменных. Пределы изменения переменных могут быть заданы или установлены, исходя из физической сущности задачи. Если установить максимальные пределы невозможно, выбирают произвольные пределы, которые уточняются после первого пробного решения. При решении систем линейных дифференциальных уравнений желательно пользоваться общим масштабом для всех переменных и их производных, который для однородных уравнений определяется начальными условиями, а для неоднородных — правой частью. При моделировании нелинейных систем устанавливают индивидуальные масштабы для каждой из переменных и нелинейных зависимостей.

Масштабы переменных и коэффициенты передачи операционных блоков рассчитываются следующим образом:

1. Коэффициент передачи суммирующего усилителя по i -входу будет равен

$$k_i = \frac{M_{\text{суммы}}}{M_{i \text{ слагаемого}}} a_i, \quad (17)$$

где a_i — постоянный коэффициент перед i -слагаемым суммы. Если в состав суммы входит постоянная величина C , то $M_{i \text{ слагаемого}}$ для подстановки в (17) определяется по выражению:

$$M_C = \frac{E_{\text{вольт}}}{C_{\text{единиц}}}, \quad (18)$$

где C — значение постоянной величины, E — источник постоянного напряжения в машине (± 350 , ± 230 , ± 100 в).

2. Постоянная времени RC цепи интегрирующего усилителя будет равна

$$RC = \frac{b M_{\text{подынтегр. вел}}}{c M_{\text{интеграла}}}, \quad (19)$$

где b — постоянный коэффициент, определяемый схемой машины, c — постоянный коэффициент, стоящий перед производной.

3. Масштаб произведения будет равен

$$M_{xy} = k M_x M_y, \quad (20)$$

где k — коэффициент, определяемый схемой блока перемножения, равный 0,01 для большинства блоков.

4. Масштабные соотношения для функционального преобразования (при наборе на функциональном преобразователе функции вида $y = f(x)$) определяются по формулам:

$$M_x = \frac{U_{x_{\max}}}{x_{\max}}, \quad (21)$$

$$M_y = \frac{U_{y_{\max}}}{y_{\max}}.$$

5. Масштаб времени (требуется для того, чтобы ускорить или замедлить решение уравнения) определяется по формулам:

при $T = t$, $M_t = \frac{T}{t} = 1$ — натуральный масштаб времени,

при $T < t$, $M_t = \frac{T}{t} < 1$ — ускоренный масштаб времени,

при $T > t$, $M_t = \frac{T}{t} > 1$ — замедленный масштаб времени,

где t — реальное, T — машинное время.

Масштаб времени вводится путем пропорционального изменения коэффициентов передачи интегрирующих усилителей.

Так, если при моделировании в натуральном масштабе времени RC цепь имела величину $(RC)_t$, то при переходе к ускоренному (замедленному) масштабу времени новая величина $(RC)_T$ цепи вычисляется по формуле:

$$(RC)_T = M_t(RC)_t. \quad (22)$$

Пример. $(RC)_t = 2$ сек; при введении ускоренного масштаба времени M_t , равного 0,2, новое значение RC цепи будет равно

$$(RC)_T = M_t(RC)_t = 0,2 \cdot 2 = 0,4 \text{ сек},$$

при M_t , равном 2 (замедленный масштаб), $(RC)_T = 2 \cdot 2 = 4$ сек.

4. Подготовка функциональных преобразователей к решению

В современных аналоговых вычислительных машинах чаще всего применяются функциональные преобразователи, выполненные на диодных элементах. Поэтому ниже изложена методика подготовки к решению функциональных преобразователей на диодных элементах. Нелинейная зависимость (функция) может быть задана аналитически, в виде таблицы или графика. В первых двух случаях требуется вычертить график

функции в координатах $U_{\text{вх}}, U_{\text{вых}}$ с учетом масштабных соотношений. Масштаб изображения функции на графике желательно взять возможно большим.

Последовательность работ по подготовке функционального преобразователя к решению:

1. На вычерченной кривой определяют количество линейных отрезков, аппроксимирующих заданную функцию. При этом количество линейных участков и их ориентация зависят от заданной точности аппроксимации. Линейные участки нумеруются.

2. Определяют значения аргумента и функции для точек сопряжения линейных отрезков (в вольтах).

3. Устанавливают номер квадранта и знак входного напряжения для каждого линейного отрезка.

4. Составляют таблицу настройки функционального преобразователя.

Так, если задана функция $y = x^2$ для интервала $0 \leq x \leq 2$, и требуется точность аппроксимации 5% (от максимума), то сперва определяют масштаб переменной x :

$$M_x = \frac{U_{x_{\text{макс}}}}{x_{\text{макс}}} = \frac{100}{2} = 50 \text{ [в/ед]}$$

и масштаб функции y :

$$M_y = \frac{U_{y_{\text{макс}}}}{y_{\text{макс}}} = \frac{100}{4} = 25 \text{ [в/ед]}.$$

Затем вычерчивают график функции в координатах $U_{\text{вх}}, U_{\text{вых}}$. После нанесения заданной функции на график проводят две вспомогательные кривые, которые отличаются от заданной функции на величину допустимой погрешности аппроксимации, т. е. наносят кривые

$$\bar{y} = f(x) + \Delta y \text{ и } \underline{y} = f(x) - \Delta y,$$

где Δy — заданная погрешность (5%).

После этого проводят, начиная с левого конца ($x = 0$) образованного «коридора», линейные отрезки, как это показано на рис. 7. Линейные отрезки не должны выходить за пределы «коридора». В результате аппроксимации находят координаты точек сопряжения отрезков. Указанные координаты начала и конца отрезка позволяют определить квадрант, в котором должен проходить отрезок, входное напряжение, необходимое для открывания диодного элемента, и угол наклона характеристики. В универсальных функциональных преобразователях имеется возможность установить для каждого элемента любой квадрант, любое (в пределах шкалы ± 100 в) напряжение открывания и угол наклона линейного отрезка. Все эти данные сводятся в таблицу.

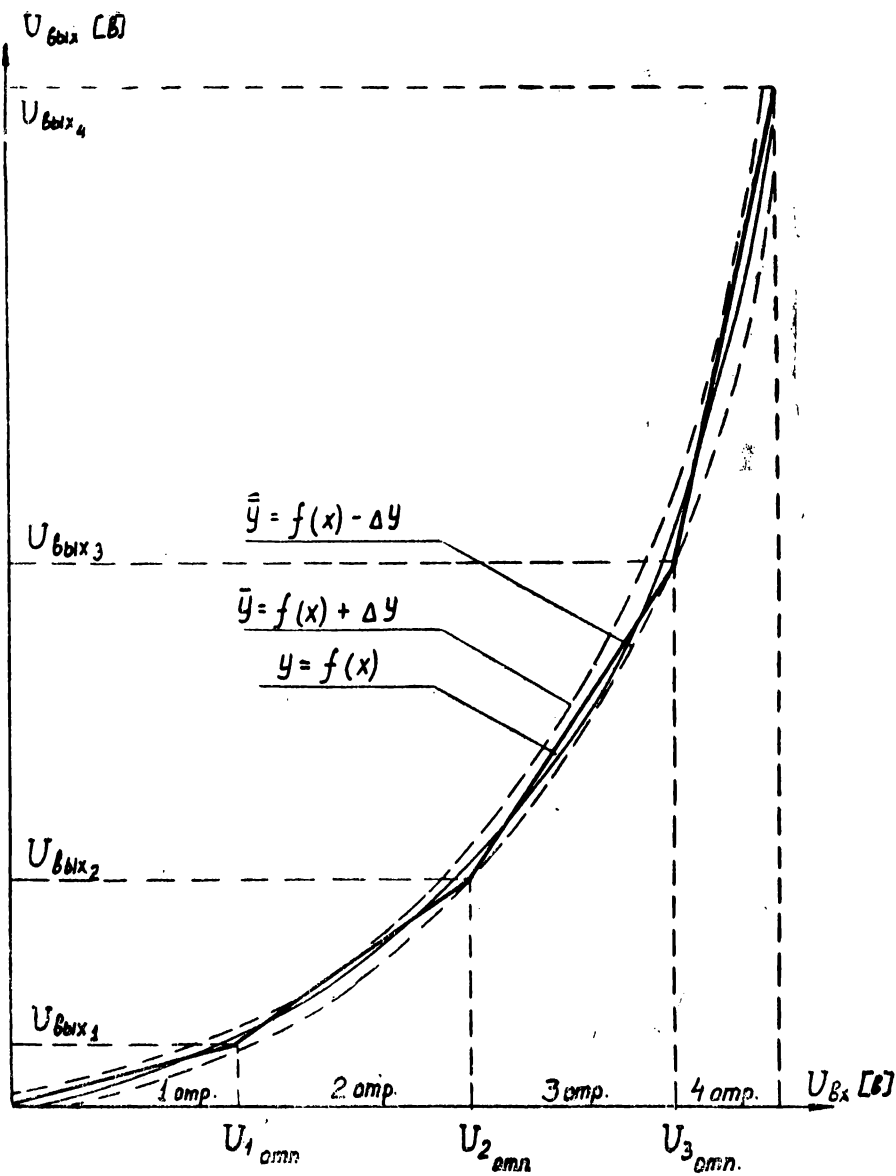


Рис. 7.

Таблица настройки функционального преобразователя
(заданная функция $y = x^2$)

Номер отрезка	1	2	3	4
Номер квадранта	1	1	1	1
Знак входного напряжения	+	+	+	+
Напряжение отпир. диодного элемента	0	$U_{1\text{отп}}$	$U_{2\text{отп}}$	$U_{3\text{отп}}$
Значение выходного напряжения на конце отрезка	$+U_{\text{вых}_1}$	$+U_{\text{вых}_2}$	$+U_{\text{вых}_3}$	$+U_{\text{вых}_4}$

5. Подготовка блоков переменного коэффициента к решению

Подготовка к решению блоков переменного коэффициента, в которых используются шаговые искатели, сводится к следующему:

1. Диапазон изменения заданной функции $f(t)$ приводится в соответствие с диапазоном ступенчатого изменения плеч делителя.

2. Вычерчивается график функции.

3. Устанавливается время решения задачи, исходя из чего выбирается темп работы (частота) шагового искателя (например, 1, 2 или 10 «шагов» щеток в секунду).

4. Производится графическая аппроксимация функции $f(t)$ кусочно-постоянными отрезками в соответствии с выбранной продолжительностью шага.

5. Составляется таблица соединений отпаяк делителя напряжения с ламелями шагового искателя.

Так как максимальное значение функции времени $f(t)$ может быть как больше, так и меньше единицы, а в общем случае изменяется в весьма широких пределах, то следует в первую очередь принять меры к тому, чтобы можно было использовать (с целью повышения точности) весь делитель напряжения. При этом переменный коэффициент $f(t)$ разбивается на два сомножителя:

$$f(t) = \alpha f^*(t), \quad (23)$$

где α — коэффициент, численно равный максимальному значению функции $f(t)$ на всем диапазоне изменения аргумента (t) ; $f^*(t)$ — график изменения переменного коэффициента, изменяющегося в пределах $-1 \leq f^*(t) \leq 1$ (в частном слу-

чае $0 \leq f^*(t) \leq 1$). Например, если $f(t) = t^2$ для $0 \leq t \leq 10$, то $f(t) = 100 f^*(t)$.

Если переменные коэффициенты входят в состав подынтегральной функции в виде $\sum_{i=1}^n f_i(t) x_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i^*(t) x_i$, то при определении коэффициентов передачи суммирующего усилителя следует пользоваться соотношением:

$$\frac{R_0}{R_{вх_i}} = \alpha_i \frac{M_{\Sigma}}{M_{x_i}}. \quad (24)$$

При определении величины RC цепи интегрирующего усилителя (в том случае, если член $f_i(t) x_i$ непосредственно интегрируется) следует пользоваться соотношением:

$$R_i C = \frac{1}{\alpha_i a_i} \frac{M_{\text{подынтегр. вел.}}}{M_{\text{интеграла}}}; \quad \left(\frac{dy_i}{dt} = \sum_{i=1}^n a_i f_i(t) x_i \right), \quad (25)$$

где a_i — постоянный множитель перед производной.

Щетки переменного коэффициента переключаются с ламели на ламель через отрезок времени, равный $\Delta t = \frac{t_{\text{макс}}}{m}$, где m — число рабочих ламелей шагового искателя (в ИПТ-5 $m = 100$). Однако время Δt может быть только таким, которое предусмотрено в схеме машины. Чаще всего оно равно: 2; 1; 0,5; 0,1 или 0,05 сек. Поэтому Δt следует взять ближайшим бóльшим. В результате проведенной аппроксимации график функции $f^*(t)$ выглядит, как показано на рис. 8. По этому графику составляется таблица соединений, указывающая в каком порядке должны присоединяться отпайки делителя к ламелям шагового искателя:

Номер ламели ШИ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Номер отпайки делителя		2	3	4	6	8	9	9	9	9	8	7	7	7	8	—	—

Указанная таблица является основным документом для выполнения паек на коммутационном поле блока переменного коэффициента.

6. Коммутация блоков машины и особенности коммутации в различных машинах

По составленной структурной схеме решаемой задачи на коммутационном поле машины производится соединение операционных блоков. Коммутационное поле любой из машин представляет собой узел, в котором объединены входы и выходы всех операционных блоков машины. Таким образом, при

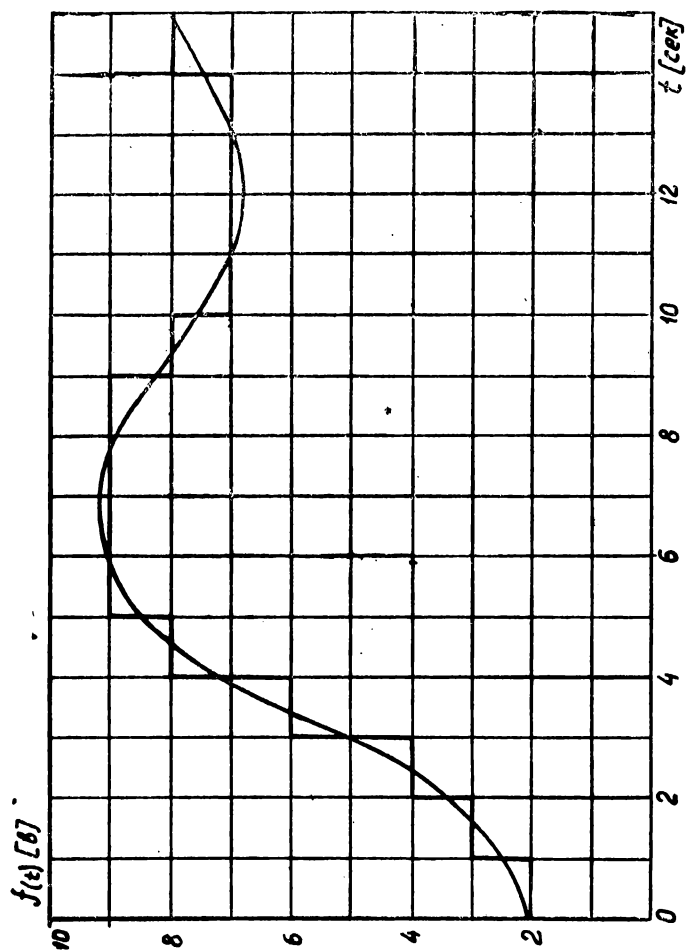


Рис. 8.

составлении структурной схемы определяются номера и места блоков, участвующих в решении задачи. На коммутационном поле блоки соединяются гибкими шнурами. Для удобства коммутации и последующей проверки правильности соединения следует пользоваться коммутационными шнурами разного цвета. В некоторых машинах (например, МН-7) коммутационная доска несет на себе функцию подключения сопротивлений и конденсаторов ко входам операционных усилителей и в обратную связь. Конденсаторы и сопротивления подключаются с помощью тумблеров или коммутационных шнуров.

На коммутационном поле отдельных машин выполнены мнемонические схемы операционных блоков и устройств машины, помогающие легко ориентироваться при коммутации структурной схемы. Подключение устройств индикации решения (стрелочных приборов, электронно-лучевых индикаторов и т. п.) к выходам операционных блоков машины производится с помощью коммутационной доски.

В некоторых машинах (например, ИПТ-5) коммутационного поля нет. В этом случае входы и выходы операционных блоков вынесены с помощью специальных гнезд на лицевые панели блоков. Коммутация структурной схемы производится непосредственно на панелях блоков, участвующих в решении задачи. При этом входные сопротивления, сопротивления и конденсаторы обратной связи подключаются с помощью тумблеров, расположенных на лицевых панелях операционных блоков.

Для исключения грубых ошибок в коммутации, перегрузки или выхода из строя операционных блоков, следует максимально внимательно подходить к соединению блоков на коммутационном поле машины.

Глава III

ОПИСАНИЕ АНАЛогоВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

АНАЛОГОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА ТИПА МН-2

1. Назначение установки и ее общие характеристики

Аналоговая вычислительная машина типа МН-2 предназначена для исследования физических процессов, когда это исследование может быть сведено к математическому моделированию систем обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений до шестого порядка, содержащих в правых частях не более 10 произведений переменных, 10 нелинейных зависимостей и 12 сумм.

Моделирование указанных выше систем уравнений может производиться в течение времени не более 200 секунд.

МН-2 является установкой структурного типа. Моделирование систем нелинейных дифференциальных уравнений в машине МН-2 производится электронными схемами с помощью типовых операционных блоков. В состав МН-2 входят следующие типовые блоки:

Блок интегрирующего усилителя (БУИ)	— 6 шт.
Блок суммирующего усилителя (БУС)	— 2 »
Блок усилителей перемены знака (БУП)	— 2 »
Блок перемножения (БП)	— 10 »
Блок нелинейности (БН)	— 10 »
Блок переменных коэффициентов (БПК)	— 2 »
Блок постоянных коэффициентов (БД)	— 6 »

Масштаб времени при моделировании принят 1:1 (натуральный); при этом МН-2 обеспечивает возможность работы с внешней аппаратурой автоматического регулирования или управления. Возможно увеличение масштаба времени в пределах общего времени интегрирования и уменьшение его до 1:100.

Операционные блоки коммутируются между собой гибкими шнурами на общем коммутационном поле МН-2 в соответствии со структурной схемой, составленной при подготовке задачи.

На коммутационное поле выведены входы и выходы всех операционных блоков, входы системы регистрации решения, а также гнезда для связи с внешней аппаратурой.

Переход от задачи к задаче осуществляется изменением схемы коммутации операционных блоков, заменой масштабных коэффициентов и перенастройкой отдельных операционных блоков. Для быстрой подготовки операционных блоков к работе предусмотрена аппаратура контроля и настройки блоков.

2. Операционные блоки МН-2

Блок суммирующего усилителя (БУС) представляет собой отдельный операционный узел МН-2, предназначенный для выполнения одновременно трех раздельных операций алгебраического суммирования входных величин, заданных в виде напряжений постоянного тока. Среднеквадратичная погрешность суммирования блока составляет 0,5%. В состав блока входят три суммирующих усилителя, построенных на базе усилителя постоянного тока типа УПТ-12 (рис. 9). Суммирующий усилитель блока суммирует до шести входных величин с одновременным масштабным преобразованием по каждому входу путем изменения коэффициента передачи в пределах от 0,01 до 50. Каждый из трех суммирующих усилителей блока работает в режиме глубокой отрицательной обратной связи. Усилители постоянного тока блока являются съемными. Изменение коэффициента передачи по каждому входу осуществляется с помощью сменных входных сопротивлений $R_{вх_1}$, $R_{вх_2}$ и сопротивления обратной связи R_0 . В блоке применяются сменные сопротивления трех типов (рис. 10). Первый тип сменного сопротивления представляет собой точно подобранное (погрешность порядка $\pm 0,2\%$) постоянное сопротивление величиной от 10 ком до 1 мгом. Второй тип сменного сопротивления — последовательное соединение постоянного и переменного сопротивлений, допускающее некоторые изменения величины сопротивления. Сопротивления второго типа имеют величины от 50 ком до 10 мгом. Третий тип сменного сопротивления выполнен по потенциометрической схеме и обеспечивает изменение величины сопротивления в широких пределах от номиналов 10, 30 и 300 мгом.

При эксплуатации машины выходные напряжения усилителей могут превысить ± 100 в. В этом случае сработает схема индикации (световая сигнализация), представляющая собой

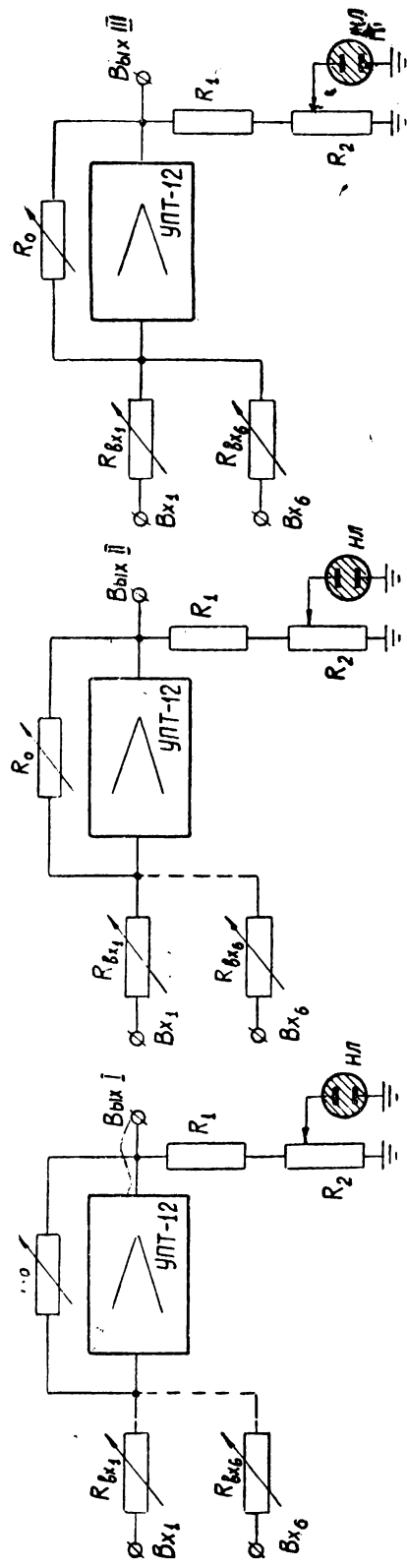


Рис. 9.

потенциометрическую схему, выходное напряжение которой подается на неоновую лампу МН-5.

Конструктивно блок суммирующего усилителя оформлен в виде съемного блока, на шасси которого размещаются усилители, сменные сопротивления и потенциометры регулировки схем индикации. На лицевую панель блока вынесены гнезда, соединенные со входами и выходами усилителей, и три неоновых лампы схем индикации.

Блок усилителей перемены знака (БУП) представляет собой отдельный операционный узел МН-2, выполняющий опе-

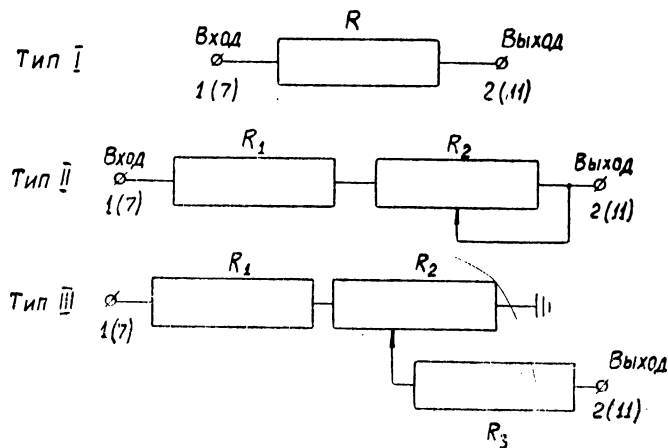


Рис. 10.

рацию перемены знака шести различных величин.* Блок состоит из 6 усилителей типа УПТ-12. Коэффициент передачи каждого усилителя блока равен единице (рис. 11). Все входные сопротивления и сопротивления обратной связи усилителей ($R_1 - R_{12}$) проволочные, выполнены с высокой точностью (0,1%). Конструктивно блок усилителей перемены знака оформлен аналогично блоку суммирующего усилителя. Схемы индикации уровня выходного напряжения в блоке отсутствуют. Гнезда для контроля за входными и выходными напряжениями вынесены на лицевую панель блока.

Блок интегрирующего усилителя (БUI) представляет собой отдельный операционный узел МН-2, который выполняет следующие операции: суммирование шести входных величин, интегрирование полученной суммы по времени, суммирование значения интеграла с начальным значением переменной, изменение знака интеграла. Среднеквадратичная погрешность блока не превышает 0,5% от максимальной величины интеграла при $RC = 2$ сек за 100 сек интегрирования.

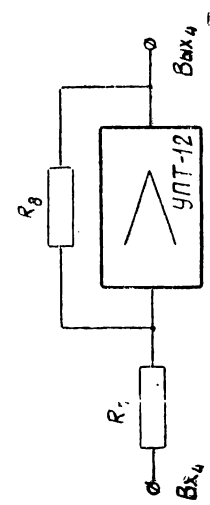
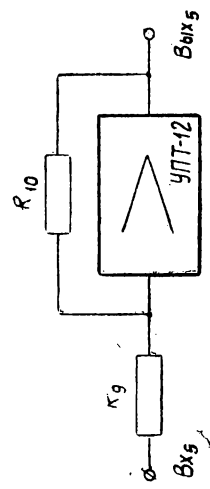
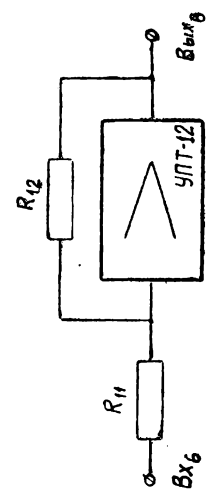
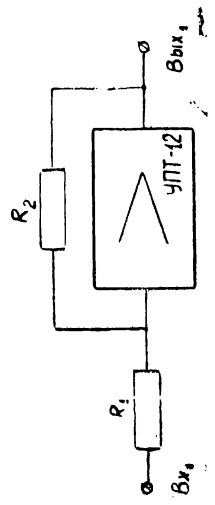
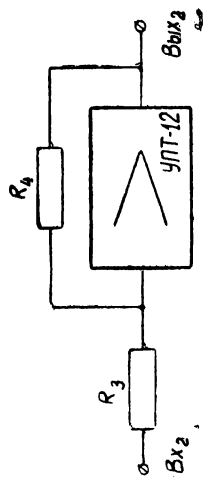
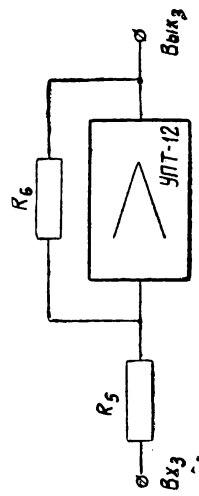


Рис. 11.

Блок состоит из четырех усилителей постоянного тока, охваченных отрицательной обратной связью (рис. 12):

Усилитель суммирующий со сменными входными сопротивлениями и сопротивлением обратной связи; построен на базе усилителя постоянного тока типа УПТ-12. Наличие в блоке отдельного суммирующего усилителя облегчает выбор оптимальных масштабных соотношений и позволяет выделить производную для использования ее в других целях.

Усилитель непосредственно интегрирующий с емкостной отрицательной обратной связью; построен на базе усилителя постоянного тока типа УПТ-13; выполнен со сменным входным сопротивлением и постоянной емкостью ($C_{01} = 2 \text{ мкф}$) в цепи обратной связи. В схему интегрирующего усилителя входят два поляризованных реле типа РП-7, контакты которых управляют его работой. Контакт K_1 подключает сетку интегрирующего усилителя ко входному сопротивлению на период интегрирования и к цепи «Сброса» (сопротивление R_0) выходного напряжения усилителя при «Отбое» (возврате к исходному состоянию). Контакт K_2 отключает входное напряжение от усилителя в режиме «Остановка» и подключает его в режиме «Пуск» (интегрирование).

Для работы в режиме периодизации при малой величине периода повторения в схеме интегрирующего усилителя предусмотрена дополнительная емкость в цепи обратной связи. Включение дополнительной емкости осуществляется тумблером Т (масштаб времени); при этом масштаб времени уменьшается в 100 раз ($C_{02} = 0,02 \text{ мкф}$).

Усилитель задания начальных условий с двумя входами; суммирует напряжения начальных условий с результатом интегрирования производной. Коэффициент передачи по первому входу, на который подается интеграл, равен двум, а по входу задания начальных условий—единице.

Расчет RC цепи в блоке интегрирующего усилителя ведется по формуле (19), где $b = 2$.

Выделение системы задания начальных условий в схему отдельного усилителя, включенного за интегрирующим усилителем, обеспечивает безынерционность ввода начальных условий.

Выходное напряжение усилителя задания начальных условий является выходным напряжением БУИ (с отрицательным знаком).

Усилитель перемены знака с коэффициентом передачи, равным единице; выполнен на базе усилителя постоянного тока типа УПТ-12.

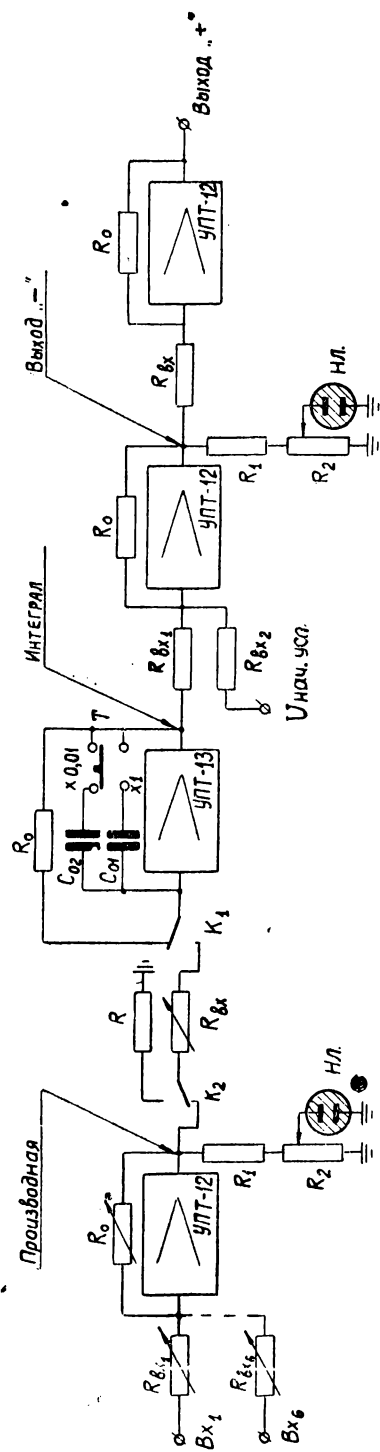


Рис. 12.

Таким образом, выходное напряжение блока выражается формулой:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{RC} \int_0^t \left(\sum_{i=1}^6 U_{\text{вх}_i} \right) dt \pm U_{\text{н. у.}} \quad (23)$$

Для индикации превышения выходным напряжением уровня ± 100 в служат потенциометрические схемы сигнализации с неоновой лампой МН-5. Схемы сигнализации установлены на выходе суммирующего усилителя и усилителя перемены знака. Конструктивно блок оформлен аналогично блокам, приведенным выше. В качестве интегрирующих емкостей применены конденсаторы высокой точности (порядка 0,2%).

Блок перемножения (БП) предназначен для получения произведения двух знакопеременных напряжений, изменяющихся в пределах ± 100 в. Погрешность блока лежит в пределах 0,5 в при 100-вольтовой выходной шкале.

В основу построения схемы блока положено соотношение:

$$ab = \left[\frac{a+b}{2} \right]^2 - \left[\frac{a-b}{2} \right]^2 \quad (24)$$

Схемно это соотношение реализуется применением суммирующих цепей на пассивных элементах и диодных квадраторов (рис. 13). Алгебраическое суммирование входных напряжений осуществляется с помощью сопротивлений $R_1 - R_4$ (проволочные сопротивления величиной по 100 ком). В схеме используются четыре суммирующих устройства, два из которых предназначены для получения суммы входных величин a и b , а два других — для получения разности входных величин. Для получения суммы и разности входных величин на входы суммирующих устройств подаются величины a и b и равные им по величине, но обратные по знаку величины $-a$ и $-b$. Входы суммирующих устройств соединены между собой так, что при любой комбинации знаков входных величин первые два суммирующих устройства используются для образования только положительной суммы величин a и b , а два другие — только для отрицательной разности. Выделение суммы и разности со знаками плюс и минус соответственно производится коммутирующими диодами D_1 (два двойных диода типа 6Х6С). Нагрузкой коммутирующих диодов являются два функциональные преобразователя, построенные по диодной схеме с общим делителем на ламповых диодах типа 6Х6С ($D_2 - D_6$). Верхний функциональный преобразователь (рис. 13) образует положительную полуветвь параболической кривой, нижний — отрицательную.

Таким образом, функциональные преобразователи возводят в квадрат положительную полусумму и отрицательную полуразность величин a и b . Выходные токи функциональных

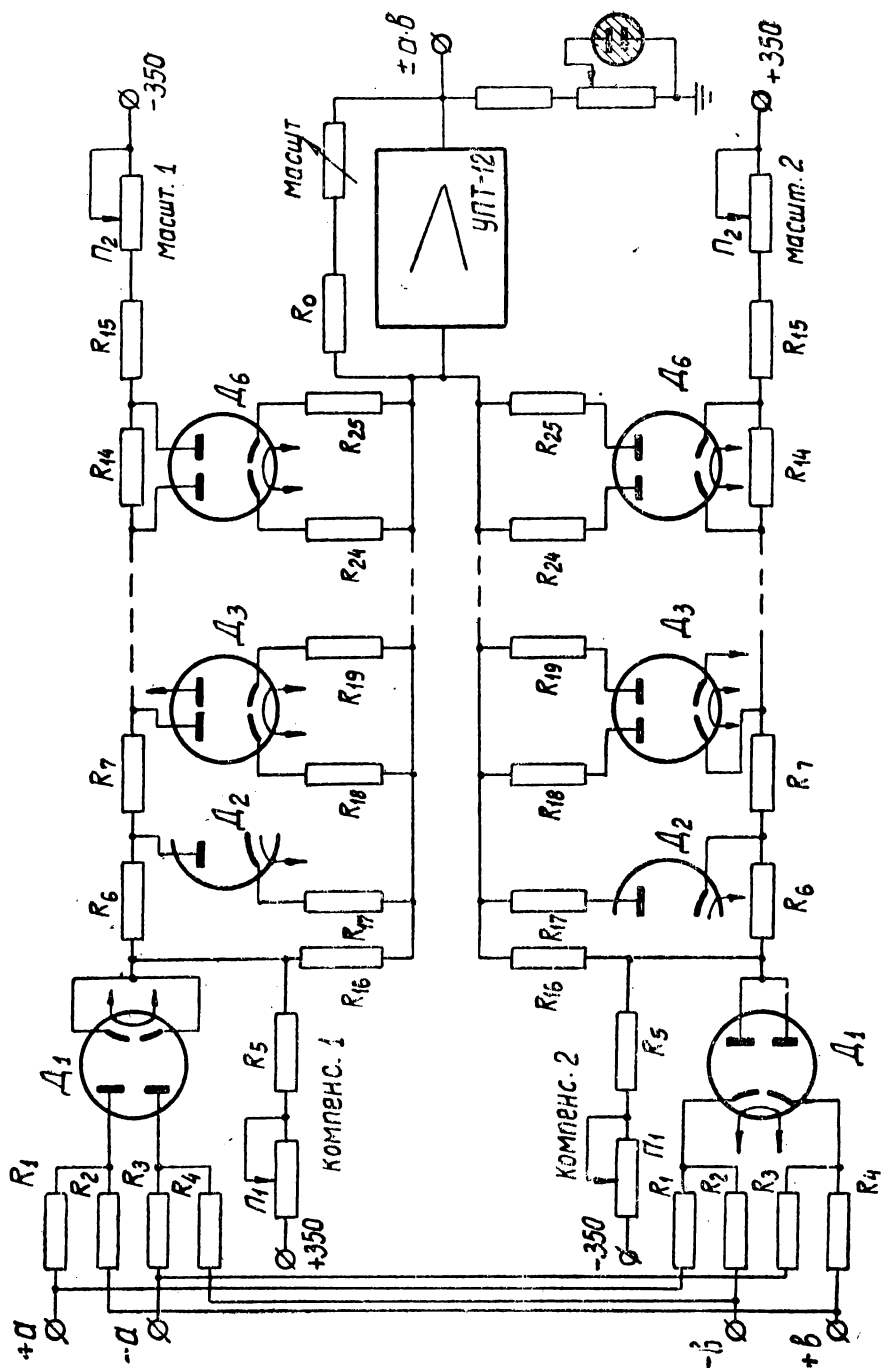


Рис. 13.

преобразователей алгебраически суммируются с помощью усилителя постоянного тока типа УПТ-12. Блок перемножения принципиально допускает получение произведения ab с любым знаком. Знак произведения зависит лишь от того, в каком порядке поданы на вход величины a , $-a$, b и $-b$. При указанном на рис. 13 чередовании знаков $(+a, -a, -b, +b$ или $-a, +a, +b, -b)$ образуется положительное произведение величин a и b . При другом чередовании $(+a, -a, +b, -b$ или $-a, +a, -b, +b)$ — знак произведения отрицательный.

Потенциометрами Π_1 (компенсация 1, компенсация 2) выходное напряжение блока регулируется при нулевых значениях величин a и b . Потенциометрами Π_2 (масштаб 1, масштаб 2), подключенными к делителю, выходное напряжение блока регулируется при максимальных значениях величин a и b (± 100 в).

Некоторое изменение величин сопротивлений блока можно компенсировать, изменив сопротивление обратной связи (масштаб) усилителя постоянного тока (обычно при регулировке блока). Усилитель снабжен схемой индикации превышения выходным напряжением уровня ± 100 в. Конструктивно блок перемножения оформлен аналогично блокам, описанным выше.

Функциональный преобразователь (блок нелинейности) предназначен для аппроксимации нелинейной функции одной переменной двенадцатью — четырнадцатью линейными отрезками. Погрешность блока для функций типа $y = \sin x$, $y = \cos x$ при $|x| \leq 90^\circ$ лежит в пределах $\pm 0,6$ в.

Входное напряжение преобразуется по требуемому закону в блоке методом кусочно-линейной аппроксимации. Аппроксимирующая функция представляется в виде

$$U_{\text{вых}} = U_0 + kU_{\text{вх}} + \sum_{i=1}^n b_i (U_{\text{вх}} - U_{i_{\text{отп}}}). \quad (25)$$

Схема блока нелинейности (рис. 14) содержит 12 диодных элементов, обладающих линейно-ломаной характеристикой и реализующих в выражении (25) члены:

$$U_{\text{вых}_i} = b_i (U_{\text{вх}} - U_{i_{\text{отп}}}). \quad (26)$$

Все 14 отрезков суммируются с помощью усилителя постоянного тока типа УПТ-12. Ввиду того, что суммирующий усилитель меняет знак входной величины на обратный, в блоке предусмотрен усилитель перемены знака (также УПТ-12).

Для каждой пары диодных элементов (рис. 14) в зависимости от квадранта выбирается тот или иной знак входной величины. Знак определяется положением переключателя Π_1 .

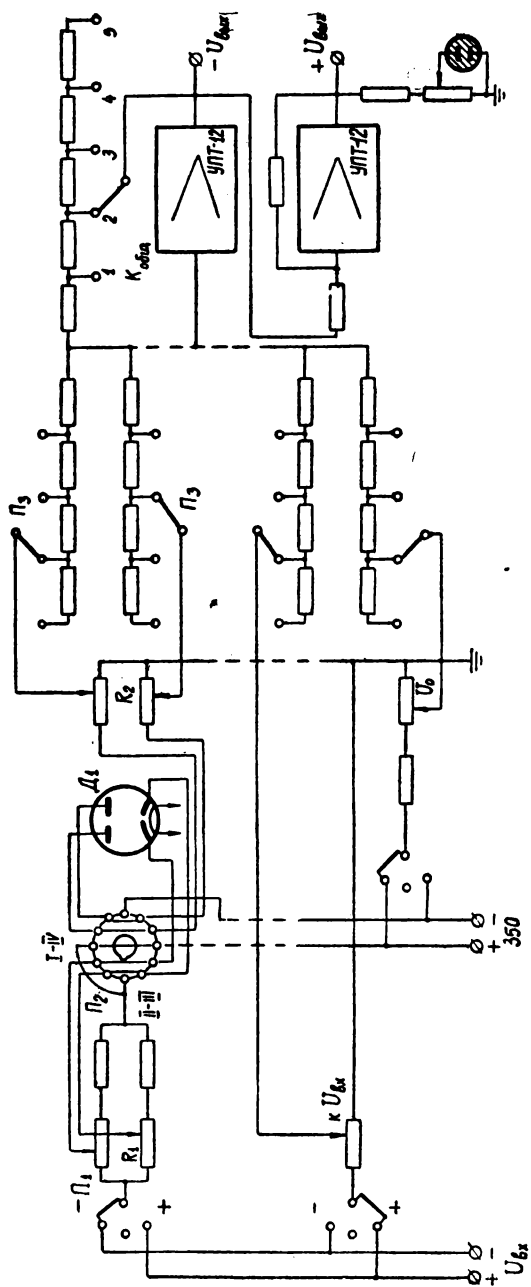


Рис. 14.

Номер квадранта определяется переключателем Π_2 . Потенциал отпираания диодов ($U_{\text{отп}}$) регулируется потенциометрами R_1 («ограничение»). Угол наклона характеристики диодного элемента плавно регулируется сопротивлением R_2 , ступенчато — с помощью входного сопротивления усилителя (переключателем Π_3) или с помощью сопротивления обратной связи усилителя ($K_{\text{общ}}$). Так же регулируется наклон начального участка аппроксимируемой кривой ($kU_{\text{вх}}$) и величина постоянной составляющей (U_0). Выходной усилитель постоянного тока снабжен системой индикации превышения выходным напряжением уровня ± 100 в. Конструктивно блок оформлен аналогично другим блокам МН-2.

3. Усилители постоянного тока

В машине МН-2 применены усилители постоянного тока трех типов: УПТ-12, УПТ-13 и УПТ-14. Усилители типа УПТ-12 и УПТ-13 (рис. 15) представляют собой трехкаскадные усилители с коэффициентом усиления $40 \div 60$ тысяч (УПТ-12) и $150 \div 200$ тысяч (УПТ-13). Усилители обеспечивают выходное напряжение ± 100 в на нагрузке от 13 ком и выше (УПТ-12) и от 130 ком и выше (УПТ-13). Усилители УПТ-14 (рис. 16) имеют коэффициент усиления 150—200 тысяч. Усилитель УПТ-14 предназначен для работы с малым выходным напряжением на нагрузку порядка $5 \div 15$ ком.

В режиме отрицательной обратной связи частотная характеристика усилителей УПТ-12, УПТ-13 и УПТ-14 линейна до частоты $400 \div 500$ гц при амплитуде выходного напряжения ± 100 в. В основу усилителей положена схема с потенциометрическими связями между каскадами. Первые каскады УПТ-12 и УПТ-13 выполнены по схеме с катодной стабилизацией дрейфа нуля. Первый каскад УПТ-14 выполнен по несимметричной мостовой схеме с общим катодным сопротивлением. Смещение на сетку правой половины лампы обеспечивается за счет канала МДМ. Второй каскад усилителей всех трех типов выполнен на пентоде 6Ж4. Третий каскад всех трех усилителей выполнен по неэкономичной мостовой схеме, что позволяет получить выходное напряжение двух знаков. В отличие от усилителя УПТ-12, в котором выходной каскад выполнен на лампе 6П6С, выходные каскады в УПТ-13 и УПТ-14 выполнены на пентоде 6Ж4. Усилители типа УПТ-12 и УПТ-13 применяются в операционных блоках машины, а усилитель УПТ-14 — в электронных нуль-индикаторах системы настройки нулей усилителей в сочетании с усилителем переменного тока и вибропреобразователем (канал МДМ).

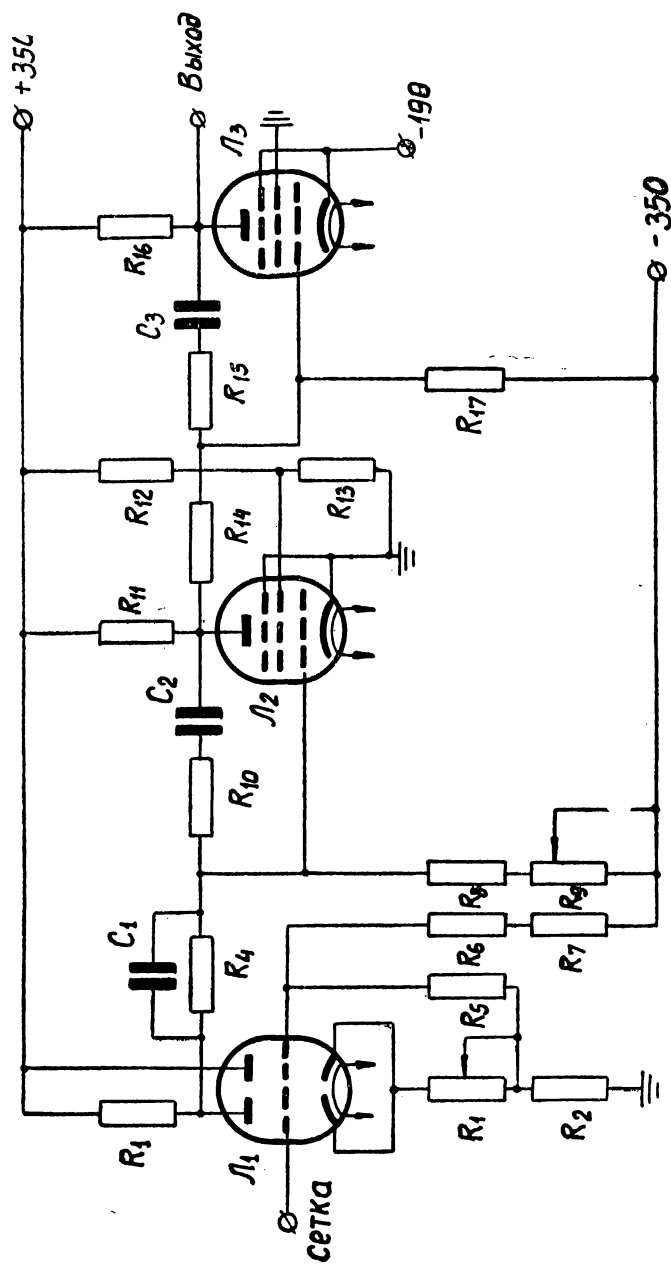


Рис. 15.

В УПТ-12 ЛЗ-6П6С
В УПТ-13 ЛЗ-6Ж4

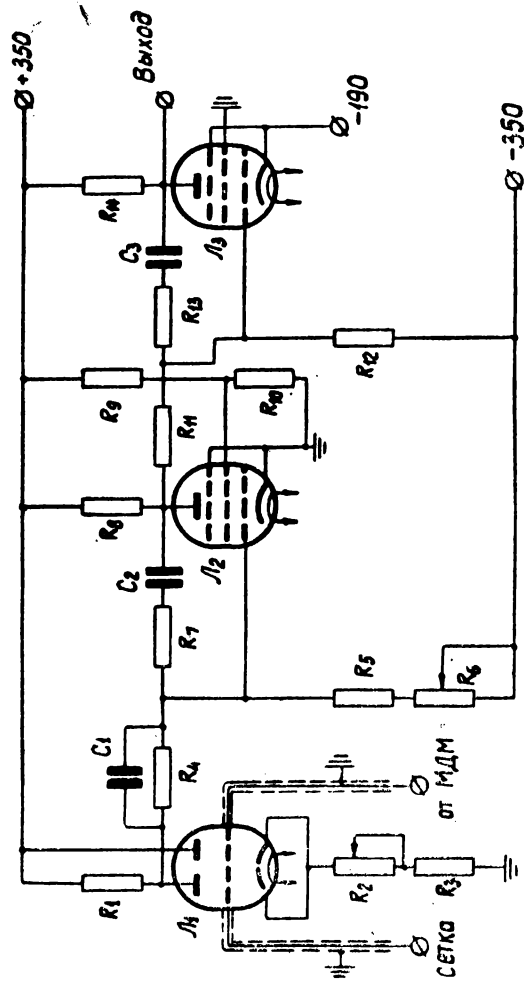


Рис. 16.

4. Система питания машины МН-2

Электропитание машины МН-2 осуществляется от сети трехфазного напряжения переменного тока $220 \text{ в} \pm 10\%$ промышленной частоты. Потребляемая мощность от сети переменного тока составляет около 10 кВт . Питание собственно машины осуществляется стабилизированным напряжением $220 \text{ в} (\pm 2 \div 3 \text{ в})$ и стабилизированным напряжением постоянного тока $+110 \text{ в}$ от блока питания типа БСП (блок стабилизированного питания).

Потребителями энергии от источника напряжения переменного тока являются операционные блоки машины (питание накала ламп через трансформаторы накала, питание анодных, сеточных и экранных цепей ламп усилителей от стабилизированных кенотронных выпрямителей, обеспечивающих напряжение $+350$, -350 и -190 в).

Операционные блоки распределены по стабилизированным выпрямителям с учетом величин токов, потребляемых каждым блоком. Общее количество стабилизированных выпрямителей СВ:

СВ $+350 \text{ в}$ — 6 шт.
» -350 в — 1 »
» -190 в — 5 »

(с учетом потребления тока от стабилизаторов $+350$ и -350 в в пределах $350 \div 400 \text{ ма}$ и от стабилизаторов -190 в — в пределах $400 \div 500 \text{ ма}$).

Конструктивное выполнение блоков стабилизированных выпрямителей предусматривает возможность отключения питания от неиспользуемых в решении блоков. Все блоки стабилизированных выпрямителей взаимозаменяемы.

5. Система управления машины МН-2

Управление МН-2 состоит из пяти самостоятельных систем:

Система общего управления.

Система синхронизации развертки времени.

Система автоматической настройки нулей усилителей.

Система автоматической настройки стабилизаторов.

Система задания начальных условий и контроля схем коммутации.

Система общего управления предназначена для оперативного управления блоками МН-2 («Пуск», «Остановка», «Отбой»). «Пуском» в системе управления МН-2 является момент начала интегрирования уравнений; «Остановкой» — момент прекращения интегрирования с целью определения искомым переменных в момент остановки, т. е. прекращение интегриро-

вания без возврата величин и устройств в исходное положение, который осуществляется в режиме «Отбой».

Оперативное управление машиной МН-2 осуществляется с пульта управления. Упрощенная схема системы общего управления показана на рис. 17. Кнопкой «Пуск» включается реле Рл1 («Работа»), определяющее начало интегрирования. Реле Рл1, блокируя себя, включает поляризованные реле в блоках интегрирующих усилителей БУИ1-ПР1 — БУИ6-ПР1 и своим контактом подключает реле повторного пуска Рл4 к кнопке «Пуск». При этом поляризованные реле включаются, если они подключены тумблерами Т1 к источнику +110 в. Лампа ЛН («Работа») сигнализирует о включении реле Рл1. Нормально разомкнутые контакты реле включают, кроме того, 1) датчик импульсов и секундомер, 2) реле управления работой шаговых искателей блоков переменного коэффициента (на схеме не показаны).

При срабатывании реле БУИ1-ПР1 — БУИ6-ПР1 контакт К1 (рис. 12) отключает сетку интегрирующего усилителя от сопротивления R_0 , подключенного параллельно конденсатору в цепи обратной связи и подключает к сетке входное сопротивление $R_{вх}$. Одновременно с началом интегрирования начинается подача импульсов на блоки переменного коэффициента и секундомер. Кнопкой «Остановка» включается реле Рл2, которое, блокируя себя отключает:

1. Цепи подачи входных напряжений на интегрирующие усилители блоков БУИ1 — БУИ6 (контакт К2, см. рис. 12) включением поляризованных реле БУИ1-ПР2 — БУИ6-ПР2.

2. Цепи подачи импульсов на блоки переменного коэффициента и секундомер.

3. Лампу сигнализации ЛН («Работа») и включает лампу сигнализации ЛН («Остановка»).

Интегрирование может быть, кроме того, остановлено импульсом с секундомера (при установке определенного времени интегрирования с помощью тумблеров на панели секундомера). Повторный пуск схемы осуществляется нажатием кнопки Кн «Пуск». При этом срабатывает реле Рл4, цепь которого была подготовлена контактом реле Рл1 при первом нажатии кнопки Кн «Пуск». При срабатывании реле Рл4 контакты его деблокируют реле Рл2, контактом которого обесточиваются реле БУИ1-ПР2 — БУИ6-ПР2. Приведение всех цепей и блоков МН-2 в исходное положение осуществляется нажатием кнопки «Отбой». При этом включается реле Рл3, своими нормально замкнутыми контактами деблокирующее реле Рл1 («Работа») и Рл2 («Остановка»). Кроме того, реле Рл3 своими контактами включает реле отбоя на панелях систем настройки нулей усилителей, реле отбоя системы настройки стабилизаторов, лампу сигнализации ЛН («Отбой»). При этом реле Рл3 включает своими контактами реле

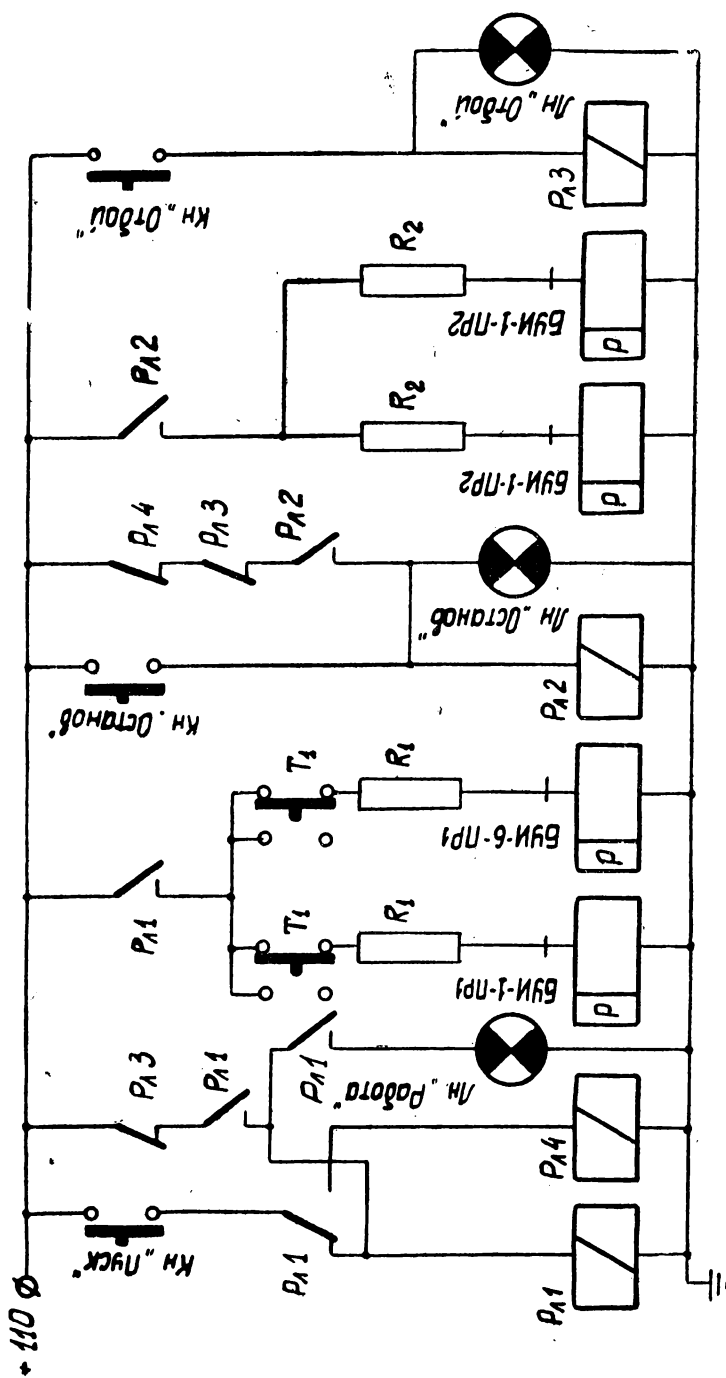


Рис. 17.

готовности схемы (на рис. 17 не показано), а реле готовности в свою очередь подготавливает цепь пуска при условии исходного положения блоков переменного коэффициента.

Кроме описанного выше режима управления в МН-2 предусмотрено управление от электронно-лучевого индикатора (в режиме автоматического повторения решения).

Система синхронизации развертки времени предназначена для синхронизации работы схемы блоков интегрирующих усилителей, схемы ввода переменных коэффициентов, системы регистрации и схемы отсчета времени. Основными узлами этой системы являются датчик импульсов и электронный секундомер (рис. 18). Синхронизация по времени работы всех узлов

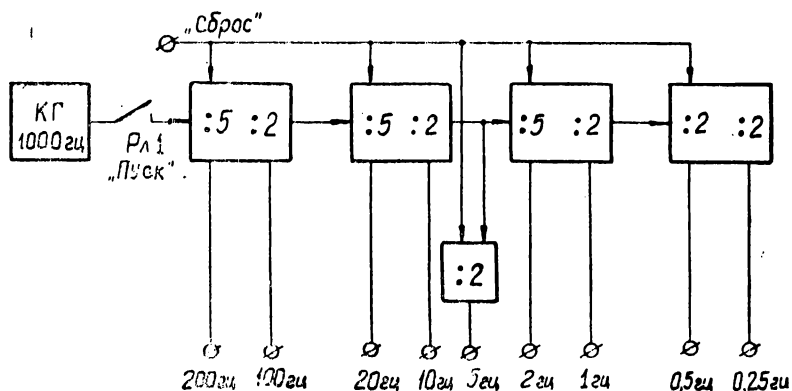


Рис. 18.

машины обеспечивается тем, что при включении машины датчик импульсов начинает генерировать импульсы стабильной частоты, которые поступают одновременно в блоки переменного коэффициента, в систему регистрации и, на секундомер, производящий счет количества импульсов, т. е. фактически отсчет времени. Датчик импульсов состоит из кварцевого генератора, работающего на частоте 1000 гц, и пересчетных ячеек. Пересчетные ячейки построены на фантастронных схемах (пересчет на 5) и триггерах (пересчет на 2). В результате пересчета импульсов, поступающих с кварцевого генератора, на выходе датчика импульсов можно получать импульсы следующих частот: 200, 100, 20, 10, 5, 1, 0,5, 0,25 гц. Триггерные и фантастронные ячейки, благодаря своему запоминающему свойству, позволяют исключить ошибку по времени при повторных пусках машины.

Пересчет импульсов кварцевого генератора начинается при замыкании контакта реле Рл1 («Пуск»). При остановке машины реле Рл1 обесточивается, и поступление импульсов пре-

кращается. Чтобы сбросить показание предыдущего счета, на датчик импульсов подается ручную (Кн «Сброс») потенциал — 350 в, поступающий на сетки ламп пересчетных ячеек, чем достигается возврат их в исходное положение. Электронный секундомер включает в себя типовой электромеханический счетчик импульсов ЭМС типа СБ21М/100 и восьмиразрядную триггерную пересчетную схему с диодной схемой совпадения и тумблерным коммутатором (рис. 19).

Установка тумблерного коммутатора (определенный двоичный код) определяет продолжительность решения, по окончании которого на триггерной пересчетной схеме устанавливается (в результате пересчета импульсов с датчика) тот же код. При равенстве кодов на тумблерном коммутаторе и пересчетной схеме на катодный повторитель (Кп) с диодной схемы совпадения поступает импульс. Нагрузкой катодного повторителя является обмотка реле Рл2, производящего остановку решения. На пересчетную схему импульсы поступают через устройство переключения частот (ПЧ), с помощью которого выбирается любая из частот импульсов. Через формирователь (Ф) импульсы подаются на пересчетную схему, электромеханический счетчик импульсов (ЭМС), производящий счет количества импульсов с момента «Пуск» до момента «Остановка». Емкость восьмиразрядной пересчетной схемы составляет 256 импульсов. При использовании всего диапазона частот можно получить следующие значения для времени решения:

Время решения сек	Интервал сек
0,1— 25,6	0,1
0,2— 51,2	0,2
0,5— 128	0,5
1 — 256	1
2 — 512	2
4 — 1024	4

Система автоматической настройки нулей усилителей служит для уменьшения погрешностей, вызванных дрейфом нулей усилителей. Настройка нулей может производиться как перед решением задачи, так и в процессе решения.

Система настройки состоит из трех однотипных панелей автоматической настройки усилителей и трех электронных нуль-индикаторов. Каждая из трех панелей настройки обслуживает 25 усилителей постоянного тока, поочередно подключаемых к одному нуль-индикатору. Блоки, включающие в себя настраиваемые усилители, соединены с панелью автоматиче-

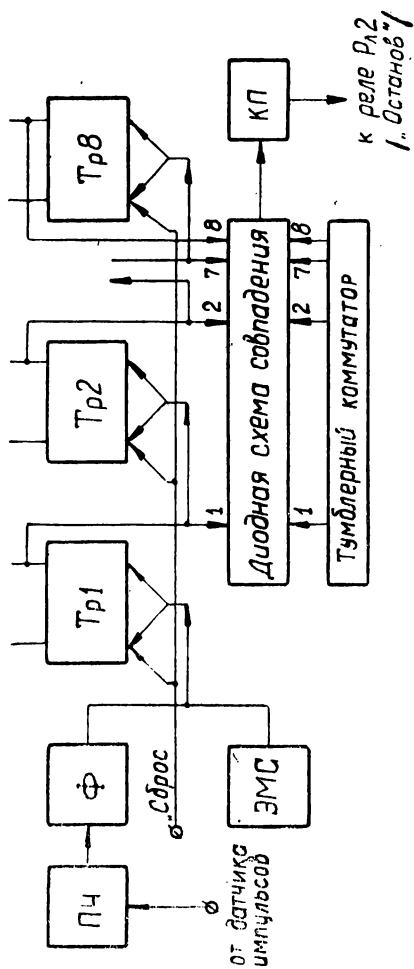


Рис. 19.

ской настройки двумя функциональными связями — на панель автоматики поступает измеряемое напряжение от сеток первых каскадов усилителей, а через потенциометры панели автоматики подано питание цепей сеток вторых каскадов усилителей. Упрощенная блок-схема, поясняющая принцип работы системы настройки нулей, показана на рис. 20. Сетка настраиваемого усилителя (УПТ № 1) подключена через фильтр ($R_{\Phi} C_{\Phi}$) и шаговый искатель (1-ШИ) к электронному нуль-индикатору (ЭНИ). В зависимости от знака выходного напряжения ЭНИ поляризованное реле ПР подключает источник напряжения E через щетки ряда 3-ШИ шагового искателя к магнитным муфтам левого вращения (МЛ-1 — МЛ-25), или через 2-ШИ к муфтам правого вращения (МП-1 — МП-25). Щетки 1-ШИ, 2-ШИ, 3-ШИ переключаются синхронно, поэтому при настройке УПТ № 1 могут включиться только муфты МЛ-1 или МП-1, выходная ось которых вращает ползунок потенциометра автоматической настройки R_{1-1} . В зависимости от того, какая из муфт включилась, потенциометр будет вращаться влево или вправо, тем самым подстраивая нуль усилителя УПТ № 1. Вращение потенциометров осуществляется двигателем Д через понижающий редуктор Р. В любой момент времени вращаются приводные шестерни всех 50 муфт, но движение на потенциометр передается только через ту муфту, которая соответствует выбранному усилителю. Последовательно с потенциометрами $R_{1-1} — R_{1-25}$ включены потенциометры $R_{2-1} — R_{2-25}$, которыми можно пользоваться при ручной настройке нулей усилителей. При окончании настройки любого из 25 усилителей, подключенных к панели, система автоматически переходит к настройке следующего усилителя. На панель управления системой настройки выведены сигнальные лампы, по которым легко определяется номер настраиваемого усилителя. В случае неисправности последнего или невозможности настройки включается звуковая сигнализация (звонок). Все три панели настройки могут работать как параллельно так и последовательно.

Электронный нуль индикатор типа ЭНИ-1 представляет собой усилитель с малым дрейфом нуля (сочетание типового усилителя УПТ-14 и усилителя переменного тока с вибропреобразователем на входе и выходе). Коэффициент усиления электронного нуль-индикатора может устанавливаться в пределах от 500 до 1500, т. е. чувствительность нуль-индикатора по входу лежит в пределах от 0,5 до 2 мв. «Дрейф» напряжения на выходе нуль-индикатора не превышает 0,3—0,5 в за 7—8 часов работы.

Система автоматической настройки стабилизаторов служит для уменьшения погрешностей, возникающих вследствие нестабильности номиналов питающих напряжений. Система состоит из панели автоматической настройки, электронного

Рис. 20.

нуль-индикатора и исполнительных электродвигателей, размещенных в блоках стабилизаторов. В основу системы положен принцип компенсационного сравнения напряжения стабилизированного выпрямителя (ЭСВ) с напряжением батареи (эталонное напряжение). Упрощенная блок-схема системы автоматической настройки стабилизаторов приведена на рис. 21.

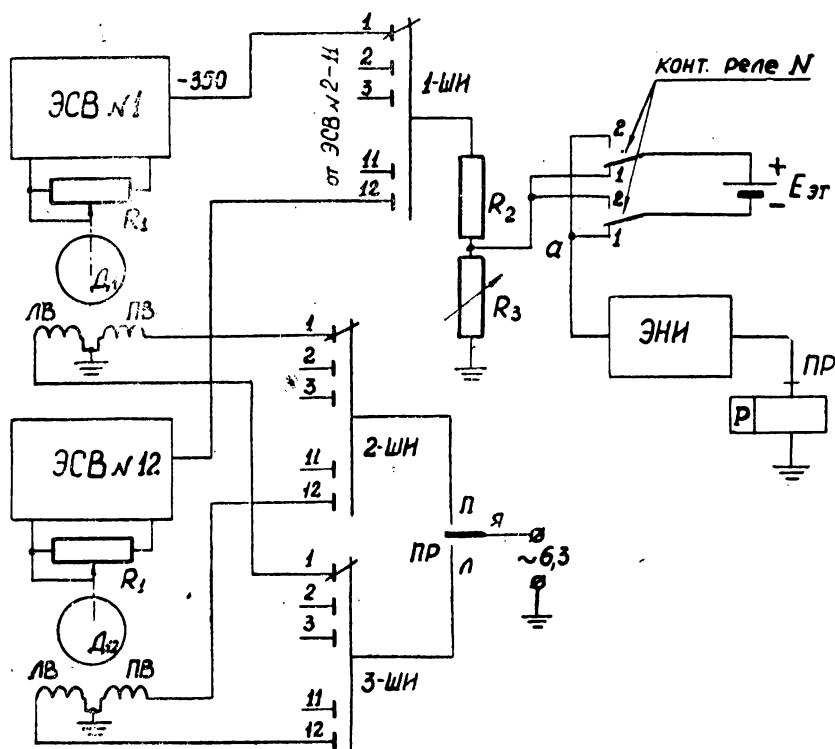


Рис. 21.

Выходные напряжения стабилизаторов через ламельное поле шагового искателя (1-ШН) последовательно подключаются к делителю $R_2 - R_3$. К средней точке делителя через контакты реле N подключается эталонное напряжение $E_{эт}$ (батарея). Вне зависимости от знака выходного напряжения ЭСВ батарея $E_{эт}$ включается всегда встречно по отношению к выходному напряжению ЭСВ. Это достигается переключением контактов реле N : если $U_{вых}$ ЭСВ положительное, то контакты переключаются в положение 1, если $U_{вых}$ ЭСВ отрицательное — в положение 2. Таким образом, в точке a всегда образуется разность эталонного напряжения и части напряжения, снимаемого с выхода ЭСВ. Эта разность усиливается элек-

тронным нуль-индикатором ЭНИ. К выходу ЭНИ подключено поляризованное реле ПР. В зависимости от знака разности якорь реле ПР замыкается с правым или левым контактами. Через якорь реле ПР на ламельные поля шагового искателя 2-ШИ и 3-ШИ подключается напряжение $\sim 6,3$ в. Все три ламельных поля шагового искателя коммутируются с движками синхронно, поэтому при настройке ЭСВ № 1 (контакт 1 поля 1-ШИ) ламельные поля 2-ШИ и 3-ШИ коммутируются со своими движками идентично. С якоря ПР напряжение переменного тока 6,3 в подается (через 2-ШИ или 3-ШИ) на обмотки возбуждения двигателей $D_1 — D_{12}$. Если якорь ПР подключен к правому контакту, то переменное напряжение 6,3 в подается к правым обмоткам возбуждения ПВ двигателя. В этом случае движок потенциометра R_1 , посаженного на вал двигателя, вращается вправо. Если ПР подключен к левому контакту, движок потенциометра вращается влево. Потенциометром производится подстройка стабилизатора до тех пор, пока разность между $E_{\text{т}}$ и частью выходного напряжения ЭСВ не будет сведена к нулю (или к допустимой величине). По окончании настройки одного стабилизатора система переключается на настройку следующего и т. д. Управление работой системы построено так, что по окончании настройки последнего (12) стабилизатора система вновь возвращается к первому ЭСВ или отключается.

В случае неисправности ЭСВ или невозможности его настройки включается звуковая сигнализация (звонок). Кроме автоматической настройки блоков стабилизированных выпрямителей предусмотрена ручная настройка.

Система задания начальных условий и контроля схем коммутации включает в себя потенциометры задания начальных условий на блоки интегрирующих усилителей, вольтметры для измерения величины напряжения, соответствующего начальным значениям переменных, два усилителя типа УПТ-12 для образования напряжений питания потенциометров задания начальных условий, что обеспечивает также возможность одновременного изменения знаков и величин начальных условий, и компенсатор (на базе УПТ-12) для измерения напряжений с точностью до трех знаков. Схема системы приведена на рис. 22. Потенциометры задания начальных условий Π_1 , вольтметры и органы управления заданием начальных условий (тумблеры T_1, T_2, T_4, T_5) расположены на приборных панелях МН-2. Компенсатор на базе УПТ-12 с трехдекадным проволочным сопротивлением (ТПС) в обратной связи обеспечивает изменение выходного напряжения в диапазоне от 0 до ± 111 в ступенчато через 0,1; 1 или 10 в. На панели компенсатора конструктивно объединены: все три усилителя постоянного тока $У_1, У_2, У_3$, гальванометр Γ , переключатель сопротивления компенсатора, переключатель вида работы ПРК-1,

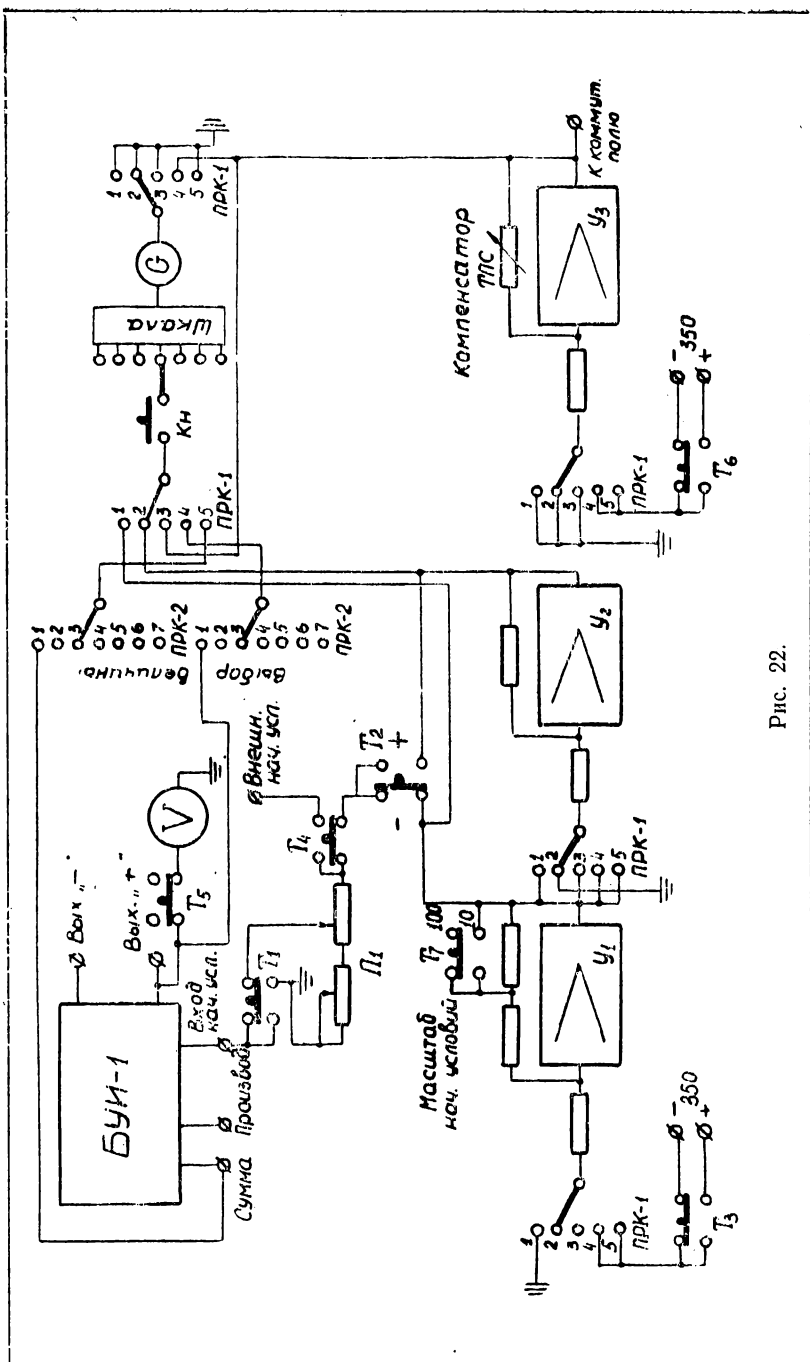


Рис. 22.

переключатель трехдекадного сопротивления компенсатора, переключатель «Выбор величины» ПРК-2, переключатель «Шкала гальванометра», тумблер «Масштаб начальных условий», тумблеры для переключения знаков начальных условий и компенсирующего напряжения.

Напряжения питания потенциометров P_1 задания начальных условий поступают с выходов усилителей $У_1$ (—) и $У_2$ (+). Знаки этих напряжений изменяются на обратные тумблером T_3 . Изменение величин напряжения начальных условий в 10 раз (масштаб начальных условий) производится тумблером T_7 (с 10 на 100 и наоборот). Отключение (или подключение) напряжений начальных условий от БУИ производится тумблером T_1 . Тумблером T_2 производится выбор знака. Тумблер T_4 подключает БУИ к внешнему источнику начальных условий. Тумблер T_5 отключает (в случае необходимости) вольтметры от БУИ. Изменение знака выходного напряжения компенсатора производится тумблером T_6 .

При проверке начальных условий или измерении переменных с помощью компенсатора выход соответствующего БУИ с помощью переключателя ПРК-2 подключается к гальванометру. На второй вывод гальванометра подается компенсирующее напряжение. Изменением величины (а также знака) последнего добиваются равновесия стрелки гальванометра. При этом чувствительность гальванометра постепенно увеличивается (переключатель ПРК-3). По положению ручек трехдекадного сопротивления определяется значение измеряемого напряжения. Контроль схем коммутации при заданных начальных условиях производится путем ввода в правые части уравнений добавочного члена («Контрольная величина»), обеспечивающего равенство производной нулю. Контрольная величина (равная по величине производной и обратная по знаку) набирается на компенсаторе и подается на коммутационное поле (клемма «Контроль»). При этом переключатель ПРК-2 ставится в 7-е положение. На коммутационном поле клемма «Контроль» соединяется с клеммой «Вход производной» соответствующего БУИ. Переключатель ПРК-1 при этом ставится в положение «Контроль».

6. Некоторые приемы работы на машине МН-2 (аппаратура обслуживания и индикации)

Подготовка операционных блоков к решению, профилактические и ремонтные мероприятия на машине предполагают проведение определенных работ, связанных со специальной аппаратурой обслуживания и контроля машины.

В состав аппаратуры обслуживания и контроля входят следующие блоки, конструктивно не включенные в состав МН-2:

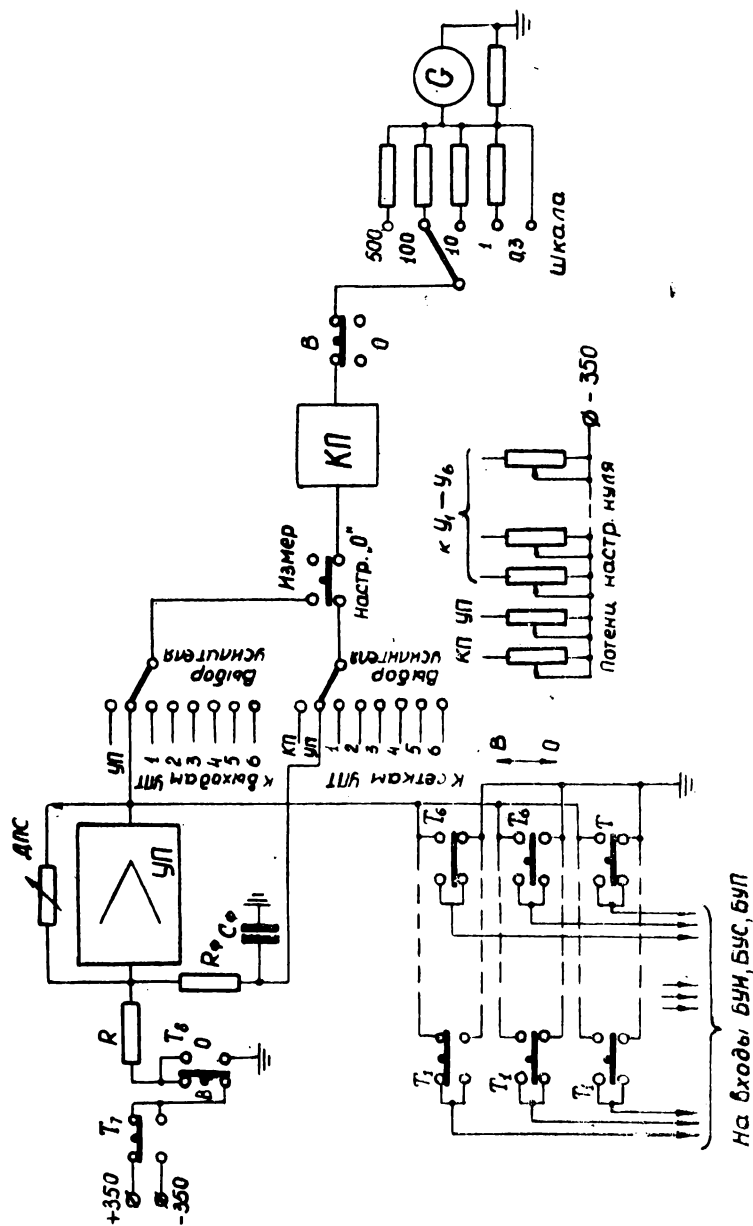


Рис. 23.

пульт проверки и настройки блоков операционных усилителей (ПБУ-1);

пульт проверки и настройки блоков перемножения и нелинейности (ПБН-1).

Для настройки заданных коэффициентов передачи в суммирующем усилителе и настройки RC цепи в интегрирующем усилителе БУИ подключается специальными шлангами к пульту ПБУ-1 (рис. 23). Пульт ПБУ-1 обеспечивает возможность настройки на нуль (вручную) всех четырех усилителей блока и установку заданного коэффициента передачи по каждому из шести входов суммирующего усилителя. В состав ПБУ-1 входят:

1. Усилитель постоянного тока (УП), в цепи обратной связи которого включено двухдекадное сопротивление. При изменении коэффициента передачи УП (за счет изменения величины двухдекадного проволочного сопротивления (ДПС) цепи обратной связи) обеспечивается подача на входы проверяемых усилителей напряжений от 0 до ± 110 в (шкала «Единицы» и «Десятки»). Эти напряжения подключаются ко входам проверяемых усилителей через тумблеры $T_1 - T_6$ (всего 18 тумблеров). Знак подаваемого напряжения может быть изменен тумблером T_7 . Используя соотношение:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_0}{R_{\text{вх}}}, \quad (27)$$

можно при известном сопротивлении R_0 (или $R_{\text{вх}}$) так подобрать сопротивление $R_{\text{вх}}$ (или R_0), что их отношение будет отвечать заданному коэффициенту передачи усилителя. Входное и выходное напряжения при этом измеряются по стрелочному прибору G .

2. Катодный повторитель (КП), имеющий большое входное и малое выходное сопротивления, благодаря чему применяется как промежуточное звено при настройке нулей проверяемых усилителей и УП в момент измерения по сетке первой лампы с помощью гальванометра пульта (КП исключает уменьшение чувствительности отсчета из-за малого сопротивления гальванометра). Конструктивно пульт проверки усилителей выполнен в виде настольного прибора. На лицевой панели пульта размещены ручки настройки нулей УПТ и другие органы управления. На боковых панелях пульта размещены 14-контактные разъемы, через которые к пульту подключаются БУИ, БУС и БУП, а также электропитание от специального источника. Пульт для проверки и настройки блоков перемножения и нелинейности ПБН-1 (рис. 24) использует компенсационный принцип измерения напряжений, т. е. принцип сравнения выходного напряжения блока (БП и БН) с соответствующим (эталонным) напряжением, подаваемым с пульта. Пульт ПБН-1 состоит из пяти усилителей, четыре из которых

($U_1 - U_4$) предназначены для подачи напряжения на входы блока перемножения ($+a, -a, +b, -b$) или блока нелинейности ($+a, -a$), а пятый (U_5) — для подачи напряжения сравниваемого с выходным напряжением настраиваемого блока. Усилители U_1, U_3 и U_5 имеют постоянное проволочное сопротивление во входной цепи, равное 350 ком , и переменное трехдекадное сопротивление в цепи обратной связи, изменяющееся в пределах от 0 до 100 ком через 1 ком . Усилители U_2 и U_4 имеют постоянный коэффициент передачи, равный единице,

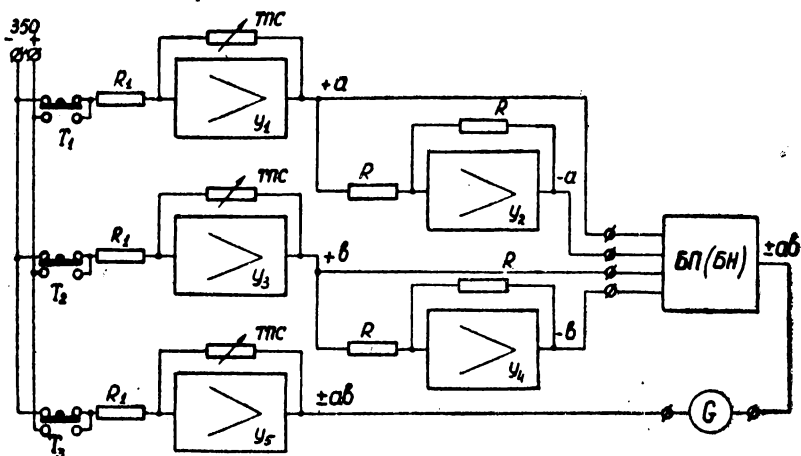


Рис. 24.

и служат для изменения знака напряжений, подаваемых соответственно с выхода U_1 и U_3 . Кроме усилителей, пульт содержит вольтметр со шкалами 0,3, 1, 10, 100 в , служащий индикатором при настройке блоков. Настройка нуля усилителей пульта и усилителя настраиваемых блоков производится также с помощью катодного повторителя (аналогично ПБУ-1). Конструктивно пульт выполнен в виде настольного прибора, на лицевую панель которого выведены все органы управления пультом.

Индикация решения на машине МН-2 производится с помощью электронно-лучевого индикатора или с помощью стрелочных приборов, установленных на приборных панелях МН-2. Выход любого из операционных блоков МН-2 соединяется со входом индикатора на коммутационном поле МН-2. Электронно-лучевая трубка индикатора (типа 13Л036) имеет длительное послесвечение (порядка 30—50 сек), что позволяет наблюдать длительные процессы при хорошем затемнении экрана от постороннего света. Стрелочные приборы (вольтметры) подключены к выходам блоков интегри-

рующих усилителей и позволяют с высокой точностью измерять значения переменных. Кроме вышеописанных приборов индикации решения могут быть применены любые другие (шлейфовый осциллограф, самописцы и т. п.). Машина МН-2 приспособлена для подключения названных устройств индикации.

АНАЛОГОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА ТИПА МН-7

7. Назначение установки и ее общие характеристики

Аналоговая вычислительная машина типа МН-7 предназначена для исследования переходных процессов в устройствах автоматического регулирования и управления, описываемых системами обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений до шестого порядка включительно, содержащих в правых частях до четырех нелинейных зависимостей или произведений и нелинейные зависимости, свойственные системам автоматического регулирования и управления (люфт, сухое трение, ограничение и зона нечувствительности). Установка МН-7 является малогабаритной машиной настольного типа невысокой стоимости и предназначена для широкого применения в различных областях техники. Моделирование может производиться как в режиме одноразового решения, так и в режиме автоматического повторения решения. Время моделирования задачи на МН-7 схемой управления не ограничено. Рекомендуемое время решения до 100 сек.

В комплект аналоговой вычислительной машины МН-7 входят:

Основной блок МН-7.

Блок питания ЭСВ-6.

Электронно-лучевой индикатор типа И-5.

Соединительные кабели и коммутационные шнуры.

К машине МН-7 может быть подключен блок постоянного запаздывания типа БПЗ-1.

Операционные блоки машины МН-7 построены на базе типового усилителя постоянного тока с большим коэффициентом усиления, охваченного глубокой отрицательной обратной связью. В основном блоке машины размещено 18 усилителей постоянного тока, 10 конденсаторов, сопротивлений, диоды и сменные блоки функциональных преобразователей и перемножения. Различные сочетания этих элементов и блоков с усилителями постоянного тока дают возможность получать относительно разнообразные схемы соединений операционных блоков, и выполнять следующие математические операции:

1) суммирование с различными коэффициентами передачи по входам;

2) интегрирование с основными постоянными времени 0,1 и 1 сек или со значениями постоянной времени, плавно устанавливаемой в пределах от 0,01 до 1 сек;

3) функциональное преобразование вида $y = f(x)$;

4) перемножение двух переменных;

5) моделирование нелинейных зависимостей, типичных для систем автоматического регулирования и управления.

Соединение усилителей постоянного тока с элементами или блоками производится на коммутационном поле, находящемся на верхней панели машины. На коммутационное поле выведены входы и выходы операционных блоков и гнезда для соединения машины с внешней аппаратурой.

8. Основной блок машины МН-7

В состав основного блока машины входят:

три платы усилителей постоянного тока;

коммутационное поле с элементами входных цепей и цепей обратных связей;

комплект сменных блоков функционального преобразования и перемножения;

система управления, контроля и сигнализации.

Плата усилителей постоянного тока конструктивно объединяет шесть усилителей постоянного тока. На каждой из трех взаимозаменяемых плат усилителей размещено по шесть независимых усилителей постоянного тока. Для выполнения вычислительных операций используются 16 усилителей; два усилителя выполняют специальные функции в схеме управления и контроля машины. В машине МН-7 используется усилитель постоянного тока УПТ-4 (рис. 25). Это трехкаскадный усилитель с потенциометрической связью между каскадами, со схемой катодной стабилизации в первом каскаде и мостовой схемой в третьем каскаде. Усилитель собран на радиолампах 6Н9С, 6Ж8 и 6П6С.

Основные характеристики усилителя:

1. Коэффициент усиления без обратной связи приблизительно 40 тысяч.

2. Дрейф выходного напряжения, приведенный ко входу усилителя, не выше 3 мв за 10 мин.

3. Горизонтальный участок частотной характеристики при работе в режиме перемены знака лежит в пределах от 0 до 100 гц.

4. Выходное напряжение может изменяться в пределах ± 100 в.

5. Минимальное сопротивление нагрузки 25 ком (при подключении к выходному каскаду дополнительного анодного сопротивления — 8 ком).

Коммутационное поле машины МН-7 расположено на верхней панели основного блока. На коммутационном поле выполняются:

- 1) построение схем операционных блоков;
- 2) соединение операционных блоков между собой при составлении структурной схемы для решения задачи;
- 3) составление вспомогательных схем для выполнения операции управления и измерения напряжений.

На коммутационном поле приведено изображение 16-и рабочих усилителей. Первый слева вертикальный ряд операционных усилителей $U_1 — U_4$ предназначен для построения схем

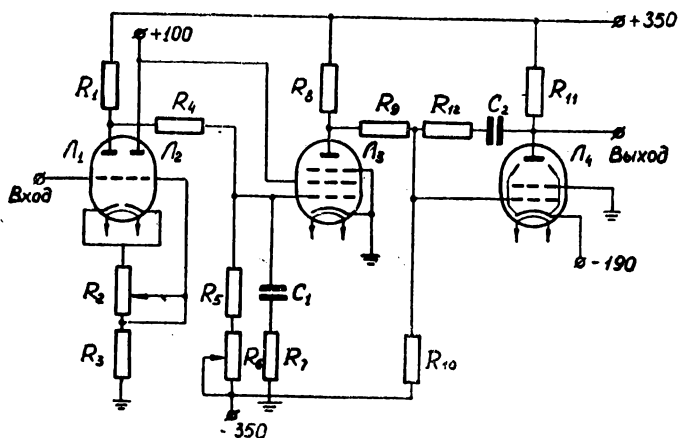


Рис. 25.

суммирования. Вход каждого такого усилителя выведен на шесть параллельно включенных клемм. Каждый из усилителей имеет четыре входных сопротивления (два постоянных и два переменных) и два сопротивления в цепи обратной связи, которые подключаются к сетке усилителя с помощью специальных скоб. К сетке любого усилителя (например, U_1) с помощью коммутационного шнура может быть подключено любое входное сопротивление из набора другого усилителя (например, 16 вход). Второй ряд операционных усилителей $U_5 — U_8$ предназначен для образования схем интегрирования суммы или суммирования входных величин. В цепь обратной связи этой группы усилителей может быть включен конденсатор емкостью 1 мкф или сопротивление величиной в 1 мгом. Третий ряд усилителей $U_9 — U_{12}$ подобен первому ряду усилителей $U_1 — U_4$; усилители этого ряда могут выполнять такие же функции. Четвертый ряд усилителей $U_{13} — U_{16}$ являет-

ся дополнительным. Усилители U_{13} — U_{16} могут использоваться в различных схемах операционных блоков; два из них, например, U_{15} , U_{16} могут использоваться для образования схем интегрирующих усилителей. Усилитель U_{17} используется для образования схемы компенсационного измерения и программного решения, U_{18} — для получения напряжения —100 в. В нижней части коммутационного поля обозначены сменные блоки функционального преобразования и перемножения (Б1—Б4) со входными и выходными клеммами. Для образования блоков специальных функциональных преобразователей (люфт, зона нечувствительности и т. д.) в правой части коммутационного поля помещены нелинейные элементы — восемь диодов и четыре пары потенциометров.

Входы и выходы операционных блоков при наборе задачи соединяются на наборном поле, выделенном в левой части коммутационного поля прямоугольной гравировкой. В центре наборного поля размещены 64 клеммы, соединенные со входными сопротивлениями усилителей. Эта группа клемм обведена прямоугольной рамкой с надписью «Входы». В средней рамке с надписью «Выходы» размещены клеммы, соединенные с выходами 16 рабочих усилителей. Для удобства коммутации эти клеммы повторены четыре раза по сторонам прямоугольника. Во внешней рамке размещено по 4 клеммы входов сменных блоков функционального преобразования ВхБ1 — ВхБ4, клеммы «Вход» и «Выход» блока постоянного запаздывания и 18 клемм «Внешняя аппаратура», которые служат для соединения с внешней аппаратурой или для параллельной работы с другой машиной. Между вертикальными группами усилителей в центральной части коммутационного поля расположено шесть гнезд дополнительных анодных нагрузок для умошнения выходных каскадов усилителей (три гнезда с гравировкой 50 ком и три гнезда с гравировкой 20 ком). Там же расположены соединительные гнезда без гравировки (три гнезда и шесть гнезд) и гнезда А1—А4, которые служат для передачи напряжения на наборное поле (гнезда А1—А4 на коммутационном и наборном поле соединены между собой в соответствии с гравировкой).

Сменные блоки функционального преобразования и перемножения входят в состав основного блока МН-7: четыре блока функционального преобразования и четыре блока перемножения. В основном блоке имеется четыре ячейки, с помощью которых сменные блоки включаются в его схему. Таким образом, в решении задачи одновременно могут участвовать четыре блока функционального преобразования или четыре блока перемножения (или их комбинация при общем числе не более четырех).

Блок функционального преобразования воспроизводит

функцию $y = f(x)$ в соответствии со следующим соотношением:

$$y = f(0) + kx + \sum_{i=1}^{10} \alpha_i (x - x_{i_{нач}}), \quad (28)$$

причем

$$\text{при } x_i < x_{i_{нач}}, \quad \alpha_i = 0,$$

$$\text{при } x \geq x_{i_{нач}}, \quad \alpha_i = c.$$

Таким образом, функция, подлежащая воспроизведению, представляется в виде алгебраической суммы двенадцати линейных отрезков. Схема сменного блока функционального преобразования (рис. 26) состоит из пяти двойных диодных

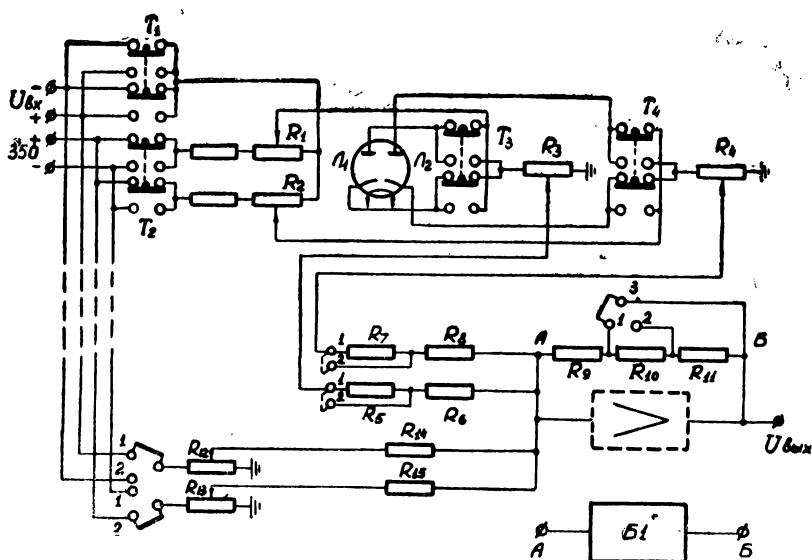
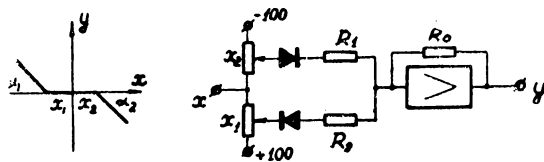


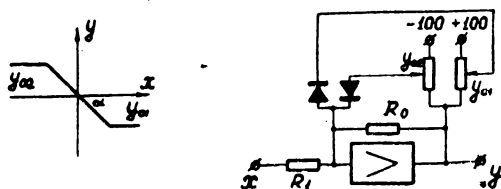
Рис. 26.

ячеек и потенциометров для задания $f(0)$ и kx . Перемещением движка потенциометров $R_1(R_2)$ (ограничение по x) устанавливается $x_{i_{нач}}$. Потенциометром $R_3(R_4)$ (набор $F(x)$ и входными сопротивлениями $(R_5 + R_6)$ и $(R_7 + R_8)$ устанавливается необходимый угол наклона для каждого из отрезков. Для изменения угла наклона всех отрезков применено изменение величины сопротивления обратной связи (R_9, R_{10}, R_{11}) . Изменение положений движков потенциометров и коэффициента передачи производится с помощью ручек, скоб и гнезд, введенных на переднюю панель блока. Тумблеры T_1 и T_2 служат для переключения знака входного и запирающего напря-

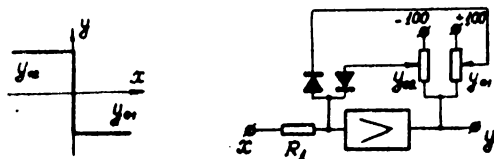
Зона нечувствительности



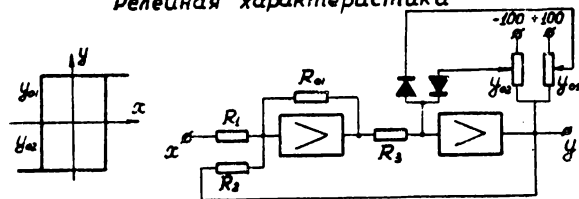
Ограничение по "y"



Момент сухого трения



Релейная характеристика



Характеристика люфта

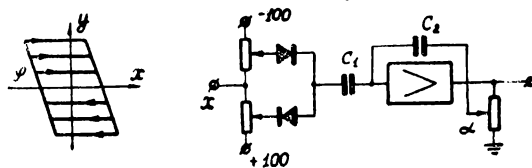


Рис. 27.

жений; тумблеры T_3 и T_4 — для переключения полярности диодов. Все тумблеры находятся на задней панели блока, причем каждый вертикальный ряд (индексы тумблеров сверху вниз) соответствует двойной диодной ячейке. Для включения двойной диодной ячейки в требуемый квадрант, тумблеры T_1 — T_4 устанавливаются в положение, соответствующее гравировке на блоке. На задней панели расположены также гнезда для установки знака $f(0)$ и kx . Для работы блок функционального преобразования должен быть соединен на коммутационном поле с усилителем. При этом соединяются коммутационными шнурами входы и выходы блока и усилителя (точ-

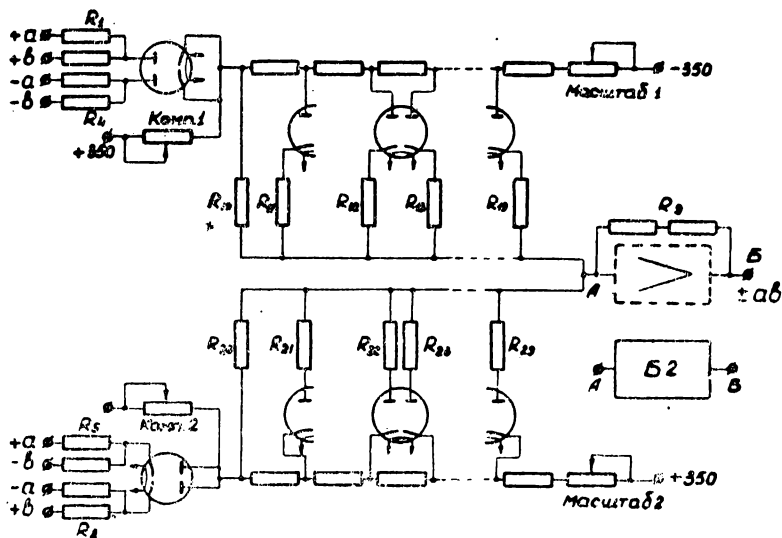


Рис. 28.

ки A и B). При этом в цепь обратной связи усилителя включаются сопротивления $R_9 + R_{10} + R_{11}$, и, следовательно, сопротивление в цепи обратной связи усилителя на коммутационном поле должно быть отключено.

Построение схем специальных функциональных преобразователей для воспроизведения типичных характеристик систем автоматического регулирования и управления производится с помощью диодов и потенциометрических схем. В сочетании с сопротивлениями, конденсаторами и усилителями этими элементами можно моделировать различные характеристики (рис. 27).

Сменный блок перемножения (рис. 28) построен на квадраторах и реализует зависимость:

$$ab = \frac{1}{4} [(a + b)^2 - (a - b)^2]. \quad (29)$$

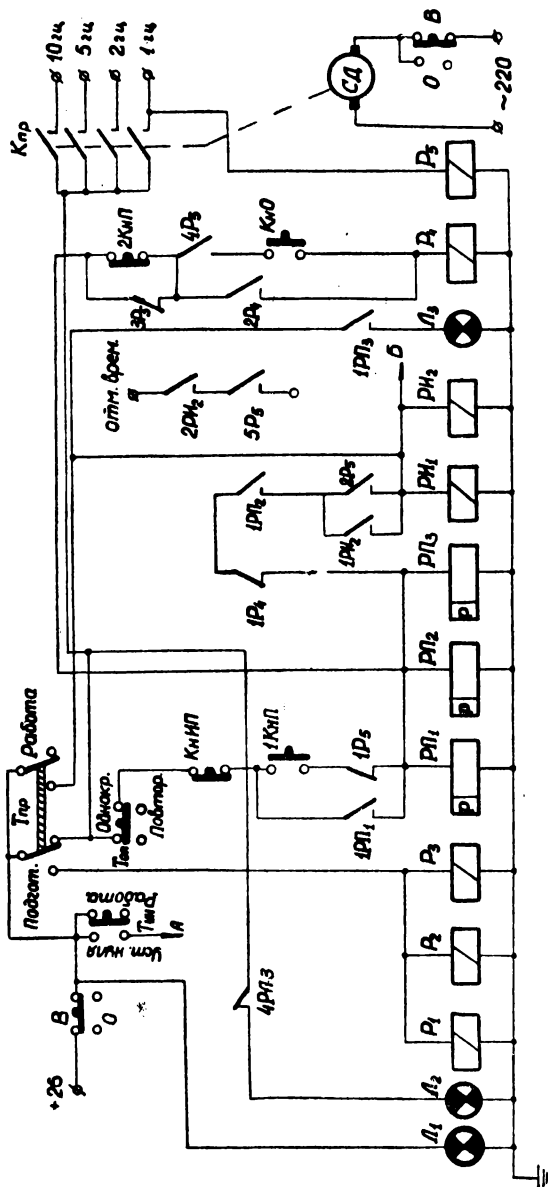
С помощью сопротивлений $R_1—R_4$ и $R_5—R_8$ происходит образование суммы и разности переменных. Две пары коммутирующих диодов служат для выбора знака суммы (положительное) и разности (отрицательное напряжение). Возведение в квадрат производится с помощью диодного квадратора. Выходные токи элементов квадратора суммируются с помощью усилителя. Правила включения сменного блока в схему аналогичны правилам включения блока функционального преобразователя.

9. Система управления, контроля и сигнализации машины МН-7

Система служит для настройки, контроля и управления операционными блоками и усилителями. В нее входят следующие схемы:

- управления;
- настройки нуля и контроля усилителей постоянного тока;
- задания начальных условий и постоянных возмущений;
- компенсационного измерения напряжений;
- программного режима работы.

Схема управления служит для обеспечения следующих режимов работы: «Установка нулей» (усилителей постоянного тока), «Подготовка», «Работа». В режиме «Подготовка» набирается задача, устанавливаются значения коэффициентов передачи и настраиваются функциональные преобразователи. В режиме «Работа» задаются начальные условия, постоянные возмущения, и решается задача. Для выбора режима работы служат тумблеры $T_{ун}$, $T_{пр}$ (рис. 29). В режиме «Установка нуля» тумблер $T_{ун}$ находится в положении «Установка нуля»; при этом по цепи А напряжение подается на обмотки реле Р, находящиеся на платах усилителей. При срабатывании реле Р его контакты, находящиеся в цепи сетки, переводят усилитель в режим масштабного усилителя ($K \approx 0,3$) с заземленным входом. Настройка нуля производится по выходу усилителя. Для перехода в режим «Подготовка» тумблер $T_{ун}$ переводится в положение «Работа», а тумблер $T_{пр}$ — в положение «Подготовка». При этом срабатывают реле $P_1—P_3$, контакты которых разрывают цепи, связывающие выходы усилителей с другими точками схемы. Кроме того, срабатывают реле $РИ_1—РИ_2$, производящие подключение входов к сеткам в схемах интегрирующих усилителей (рис. 30). В режиме «Работа» машина включается переводом тумблера $T_{пр}$ в положение «Работа» ($T_{ун}$ находится также в положении «Работа»). В этом режиме производится задание начальных условий с помощью схемы задания начальных условий и решение задачи. Последовательность работы реле схемы управ-



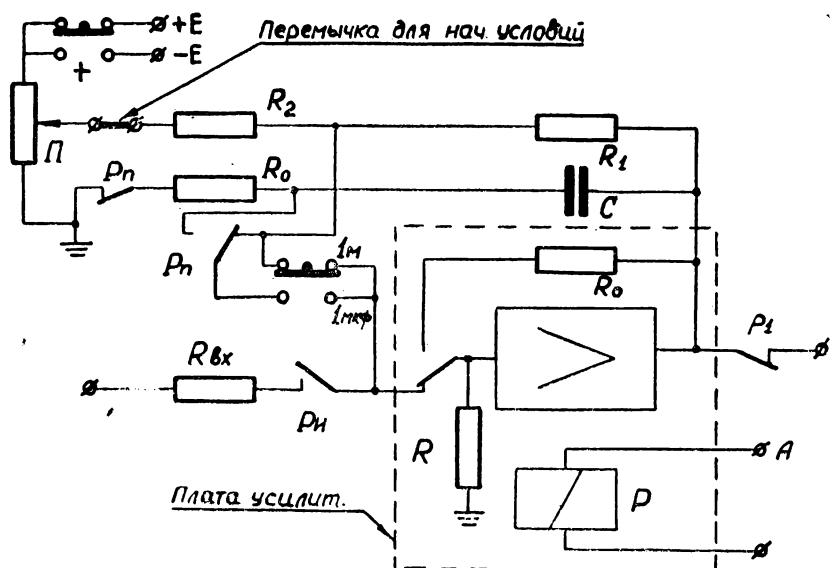


Рис. 30.

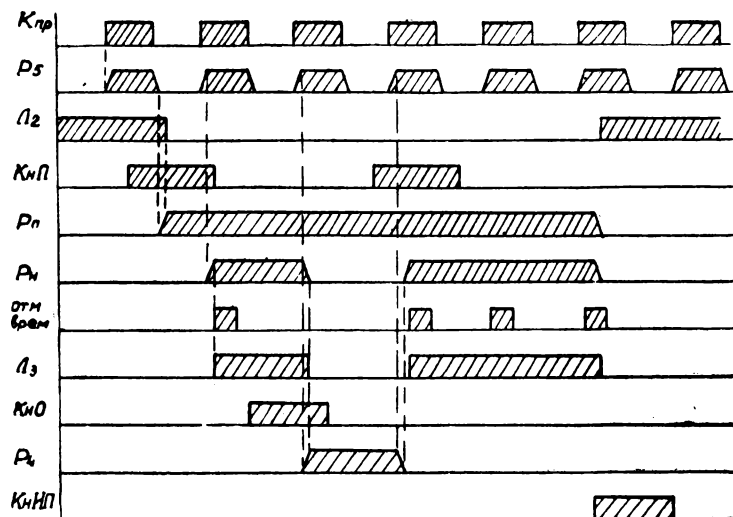


Рис. 31.

ления показана на временной диаграмме (рис. 31). В схеме управления машины МН-7 принята система принудительной синхронизации. С включением тумблера T_{220} включается синхронный двигатель (СД), на валу которого установлены четыре контактные звездочки генератора импульсов, прерывающие напряжение постоянного тока с частотой 1, 2, 5 и 10 гц. От звездочки 1 гц начинает работать реле синхронизации P_5 , замыкая или размыкая с этой частотой свои контакты $1P_5$ — $5P_5$ в цепях схемы управления. При нажатии кнопки «Пуск» (1КнП), в момент паузы, когда контакт $1P_5$ замкнут, срабатывают пусковые реле $РП_1$, $РП_2$, $РП_3$, которые своими контактами P_n переводят интегрирующие усилители из режима задания начальных условий в режим интегрирования (рис. 30). Контакт $1РП_2$ подготавливает цепь включения реле $РИ_1$ и $РИ_2$ интегрирующих усилителей. Эти реле срабатывают при приходе импульса (контакт $2P_5$ замыкается) и блокируются контактом $1РИ_2$. С этого момента начинается решение задачи. Контакты $2РИ_2$ и $5P_5$ образуют цепь отметок времени (на наборном поле гравировки «1 гц»).

При необходимости фиксации решения в какой-либо момент времени нажимается кнопка «Остановка» (КнО). С приходом импульса контакт $4P_5$ замыкается, и срабатывает реле остановки P_4 , контакт которого $1P_4$ отключает реле $РИ_1$, $РИ_2$; интегрирование при этом прекращается. На выходах интегрирующих усилителей сохраняется напряжение, соответствующее моменту остановки. При необходимости продолжения интегрирования снова нажимается кнопка «Пуск», и разрывается контакт $2КнП$ в цепи реле P_4 , которое выключается при приходе импульса, так как размыкается контакт $3P_5$. Контакт $1P_4$ замыкается, срабатывают реле $РИ_1$, $РИ_2$, и интегрирование продолжается.

Возврат схемы в исходное положение осуществляется нажатием кнопки «Исх. положение» (КнИП). При этом отключаются реле $РП_1$, $РП_2$, $РП_3$, $РИ_1$ и $РИ_2$, и схема возвращается в исходное положение.

Рабочие состояния схемы управления отмечаются сигнальными лампами $Л_1$ — напряжение включено, $Л_2$ — исходное положение и $Л_3$ — интегрирование.

При работе машины совместно с электронно-лучевым индикатором И-5М пуск ее схемы может осуществляться как при нажатии кнопки «Пуск» (режим однократного решения), так и от сигнала, поступающего от электронно-лучевого индикатора (режим автоматического повторения решения).

В режиме однократного решения импульс, запускающий схему развертки электронно-лучевого индикатора, поступает от схемы управления по цепи B в момент срабатывания реле $РИ_1$ и $РИ_2$. Тумблер «Однокр. — Повтор.» ($T_{оп}$) на панели должен быть установлен в положение «Однокр.».

В режиме автоматического повторения решения схема развертки индикатора одновременно с пилообразными колебаниями вырабатывает прямоугольные импульсы, поступающие в схему управления машины. Тумблер $T_{оп}$ в этом случае устанавливается в положение «Повтор.», цепь блокировки реле РП₁, РП₂ и РП₃ при этом разрывается.

Схема настройки нуля и контроля усилителей постоянного тока обеспечивает настройку нулей 18 операционных усилителей. Установка нулей выходного напряжения усилителей производится изменением напряжения на сетке второго каскада усилителя. Для контроля нулей усилителей используется стрелочный прибор на три предела измерения. Тумблер T_5 «Измерение — Компенсация», установленный слева от прибора, должен быть включен в положение «Измерение». При этом одна из клемм прибора («—») автоматически заземляется. Вторая клемма прибора соединена с гнездом коммутационного поля V_1^+ . Для настройки выходы всех усилителей последовательно подключаются внешней шнуровой коммутацией к гнезду V_1^+ . Установка нуля производится сначала по шкале прибора 100 в, затем по шкале 2,5 в и уточняется по шкале 0,1 в.

Контроль за выходом усилителей за границы линейной части характеристики осуществляется с помощью неоновых ламп, подключенных через высокоомные делители к выходам усилителей. Потенциометры настраиваются так, чтобы лампы загорелись при напряжении на выходе усилителя ± 105 в.

Схема задания начальных условий и постоянных возмущений содержит шесть потенциометров, на которые подается напряжение 100 в. Знак напряжения устанавливается с помощью тумблеров. Движки потенциометров выведены на гнезда коммутационного поля. Эти гнезда внешними коммутационными шнурами соединяются со входами интегрирующих усилителей, по которым задаются начальные условия (гнезда U_5 , U_6 , U_7 , U_8 , U_{15} и U_{16}).

С помощью схемы задания начальных условий можно подавать и постоянные возмущения на любой из входов операционных блоков. Контроль задания начальных условий и постоянных возмущений производится по стрелочному прибору.

Схема компенсационного измерения напряжений содержит источник эталонного напряжения (усилитель с трехдекадным сопротивлением в цепи обратной связи) и вольтметр V_1 (тумблер T_5 «Измерение — Компенсация» включается при этом в положение «Компенсация»). В схеме используется усилитель U_{17} . Если на вход его подано напряжение плюс или минус 100 в, на выходе его может быть получено любое напряжение от 0 до 100 в, через 0,1 в. Для измерения к гнезду прибора V_1 соответствующего знака подается выходное на-

пряжение усилителя $У_{17}$, а к другому подключается измеряемое напряжение. Усилитель при работе в этом режиме переключается в схему «Эталон. напр.» тумблером на коммутационном поле машины.

Схема программного режима работы выполняет логическую операцию сравнения двух величин (с учетом знаков) или осуществляет воспроизведение характеристики ограничения (рис. 32). Эта схема построена на базе усилителя $У_{17}$, который включается тумблером в схему «Прогр. режим». При

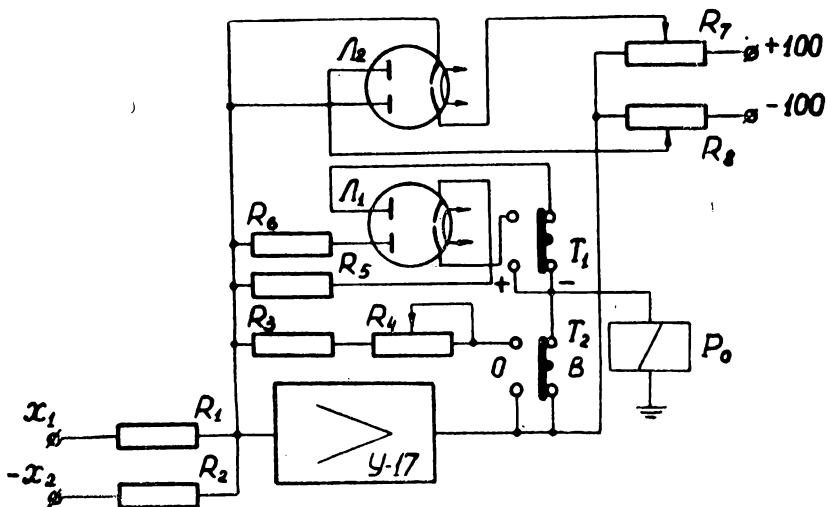


Рис. 32.

выполнении операции сравнения тумблер находится в положении В (включено). При равенстве входных величин x_1 и x_2 включается реле P_0 , контакты которого могут быть использованы для масштабных переключений или для остановки решения (тумблер на коммутационном поле машины в положение «Остановка — Переключение»). Включение реле P_0 может происходить как при переходе разности $(x_1 - x_2)$ из отрицательной области в положительную (тумблер T_1 в положении «—»), так и в противоположном направлении (тумблер T_1 в положении «+»). В случае изменения величины x_1 по линейному закону включения реле P_0 можно производить в зависимости от времени. Момент включения будет определяться величиной x_2 .

При воспроизведении ограничения тумблер T_2 (В — О) должен быть установлен в положение О (отключено). В этом случае в цепь обратной связи усилителя $У_{17}$ оказываются включенными сопротивления R_3 , R_4 , с помощью которых уста-

навливается угол наклона характеристики и диодная ограничительная цепочка из потенциометров R_7 , R_8 и двойного диода $Л_2$.

АНАЛОГОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА ТИПА ИПТ-5

10. Назначение установки и ее общие характеристики

Аналоговая вычислительная машина типа ИПТ-5 является машиной структурного типа и предназначена для исследования динамики регулируемых объектов, описываемых системами линейных дифференциальных уравнений до девятого порядка включительно. Конструктивно машина ИПТ-5 выполнена в виде отдельных блоков. В комплект машины входят:

Блоки операционных усилителей типа БОУ-2	— 18 шт.
Блоки переменных коэффициентов типа СБ-3	— 18 »
Блоки постоянных коэффициентов типа СБ-4	— 18 »
Блок управления машины	— 1 »
Специальный кварцевый генератор СКГ-2	— 1 »
Распределительные колодки	— 5 »
Вспомогательная аппаратура для проверки и наладки блоков машины	— 2 »
Источники питания типа ЭСВ-1М	— 2 »

Блок-схема машины представлена на рис. 33. Коммутация блоков машины производится с помощью гибких шнуров непосредственно между самими блоками в соответствии со

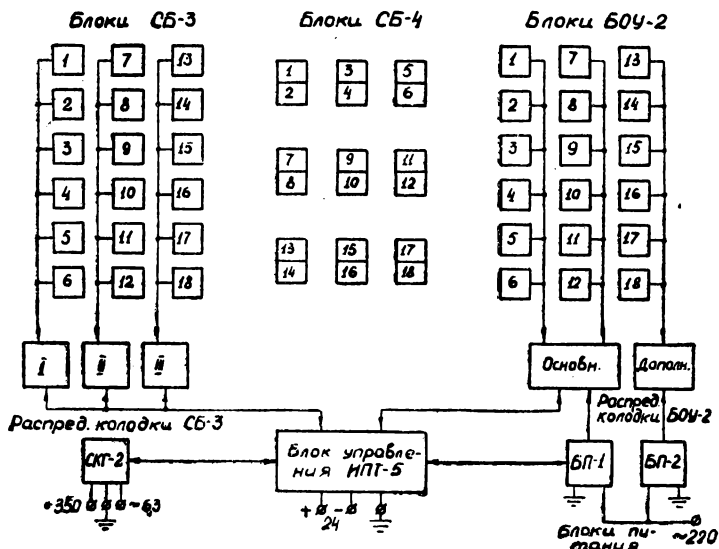


Рис. 33.

структурной схемой, составленной при подготовке задачи к решению. Для этой цели на переднюю панель операционных блоков машины выведены клеммы, соединенные со входами и выходом блока. Время решения задачи на машине ИПТ-5 не должно превышать 100 сек.

11. Операционные блоки машины ИПТ-5

Блок операционного усилителя типа БОУ-2 представляет собой отдельный операционный узел машины, предназначенный для выполнения математических операций суммирования, интегрирования, умножения на постоянный коэффициент и инвертирования.

Схема блока БОУ-2 (рис. 34) выполнена на основе типового усилителя постоянного тока УПТ-4 с набором элементов во входной цепи и в цепи обратной связи. Набор элементов обеспечивает (при соответствующих переключениях на панели блока) выполнение одной из четырех, вышеуказанных математических операций, а также их совмещение при необходимости.

Сопротивления $R_1—R_5$, подключаемые к сетке УПТ-4 тумблерами $T_1—T_4$, образуют три входа блока $Vx1—Vx3$. Для расширения возможностей блока предусмотрено подключение к БОУ-2 съемных колодок с тремя входными сопротивлениями в каждой. Подключение колодки к УПТ-4 производится через специальную клемму на панели блока, соединенную с сеткой усилителя. В цепь обратной связи блока с помощью тумблеров $T_5—T_8$ подключается одно из сопротивлений $R_7—R_9$ и конденсатор C (сопротивления $R_7—R_9$ могут быть включены параллельно). Таким образом, коэффициент передачи блока может быть установлен в пределах от 0,01 до 50, а постоянная времени интегрирования может принимать одно из трех значений: 0,01, 0,1 и 1 сек.

Блок БОУ-2 может работать также в режиме инерционного звена с постоянными времени 0,01, 0,1 и 1 сек. Погрешность выполнения номиналов сопротивлений $R_1—R_9$ и конденсатора C составляет $\pm 0,1\%$. Режимы работы блока БОУ-2 управляют контакты реле, установленные в блоке. Последовательность работы реле определяется системой управления машины.

На рис. 34 контакты реле находятся в исходном положении. Это соответствует в машине ИПТ-5 режиму задания начальных условий (реле системы управления обесточены). Напряжение с движка потенциометра задания начальных условий поступает на сопротивление R_{11} , которое через нормально замкнутые контакты $2P_k$, $2P_y$ и $1P_y$ и $1P_o$ подключено к сетке УПТ-4. Конденсатор C шунтируется сопротивлением R_{10} . Таким образом, конденсатор в цепи обратной связи

От потенциометра
нач. условий

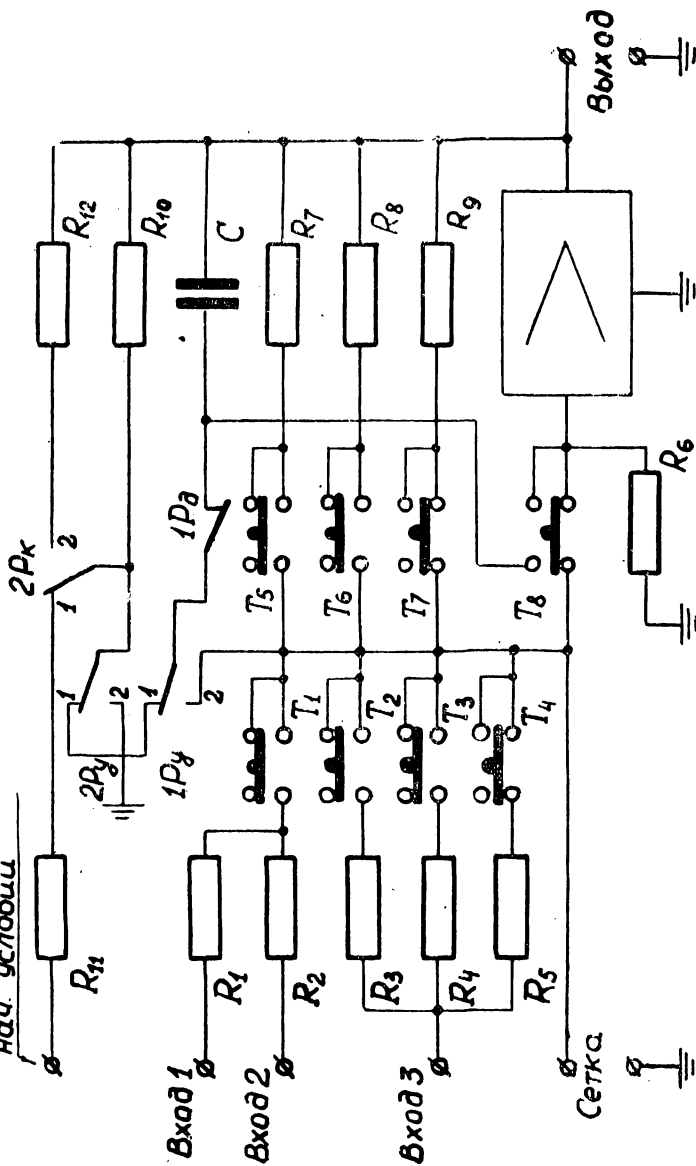


Рис. 34.

заряжается с постоянной времени $\tau = CR_{10}$ до уровня, определяемого отношением сопротивлений R_{10} и R_{11} и величиной напряжения, снимаемого с движка потенциометра.

При нажатии кнопки «Пуск» система управления переключает контакты $2P_u$ и $1P_u$ в положение 2. Этим самым конденсатор C освобождается от шунтирующего действия сопротивления R_{10} , и входные сопротивления $R_1 — R_5$ подключаются к сетке УПТ-4. Блок БОУ-2 переводится в режим интегрирования. Режим фиксации обеспечивается при нажатии кнопки «Остановка». При этом размыкается контакт $1P_d$, отключающий входные сопротивления.

В исходное положение блок БОУ-2 возвращается при нажатии кнопки «Исх. положение» или автоматически от контактов шагового искателя блока управления машины. В обоих случаях для быстрого разряда конденсатора C сопротивление R_{10} шунтируется небольшим сопротивлением R_{12} с помощью контакта $2P_k$ (положение 2). Затем контакт $2P_k$ возвращается в положение 1, что соответствует режиму «Исх. положение».

Система управления машины ИПТ-5 имеет принудительную систему синхронизации, поэтому переключение контактов происходит в строго фиксированные моменты времени, определяемые синхронизирующим реле блока управления машины.

Блок БОУ-2 обеспечивает выполнение математических операций с погрешностью не более 1%. Усилитель УПТ-4 выполнен в виде съемного элемента и сочленяется с блоком БОУ-2 с помощью разъема. Принципиальная схема УПТ-4 приведена на рис. 25 (описание машины МН-7). Его основные характеристики приведены там же.

Блок переменного коэффициента типа СБ-3 в машине ИПТ-5 реализует операцию образования переменного коэффициента во времени, используя два стосекционных делителя напряжения D_1 и D_2 с одновременным умножением на постоянный коэффициент с помощью набора сопротивлений d_1 и d_2 . Постоянный коэффициент может принимать значения: 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0.

Принципиальная схема блока представлена на рис. 35. Ввод переменного коэффициента реализуется методом кусочно-постоянного приближения. Основными элементами блока СБ-3 являются: шаговый искатель типа ШИ50/4 с контактной группой, два стосекционных делителя напряжения D_1 и D_2 , наборное поле «+», на которое выведены все точки делителя D_1 , наборное поле «—» для делителя D_2 и наборное поле, на которое выведены ламели шагового искателя. Развертка переменного коэффициента во времени осуществляется шаговым искателем, на электромагнит которого поступают импульсы от генератора импульсов с частотой 10; 4; 2; $\frac{1}{2}$; 1 или $\frac{1}{3}$ гц. Начало и окончание посылки импульсов опре-

деляется схемой блока управления машины. При использовании делителей D_1 и D_2 величина переменного коэффициента набирается в диапазоне от 0 до ± 1 через $\pm 0,01$. Коммутация заданного переменного коэффициента производится на наборном поле, где отпайки шагового искателя соединяются с отпайками делителей положительного или отрицательного

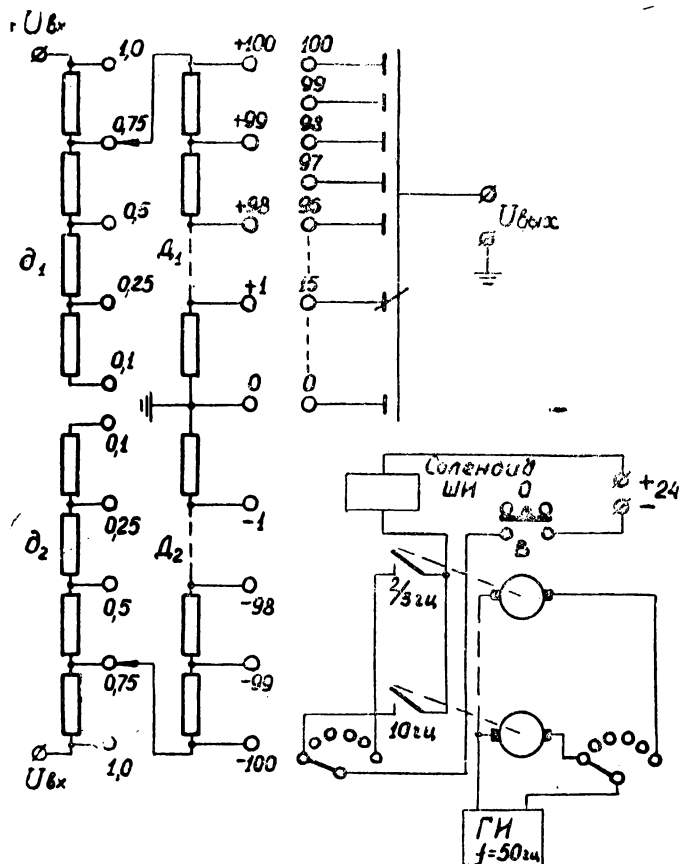


Рис. 35.

знаков, согласно составленной таблице настройки. Длительность одного рабочего цикла блока может составлять 150, 100, 75, 50, 25 и 10 сек в зависимости от выбранной частоты следования импульсов. Перед началом работы щетки шагового искателя блока находятся в исходном положении (на нулевых ламелях). Об этом сигнализирует контрольная лампочка, выведенная на лицевую панель блока, цепь которой замыкается нормально замкнутым контактом головной контактной группы искателя. С началом движения шагового искателя эта лам-

почка гаснет. При нажатии кнопки «Исх. положение» на пульте управления срабатывает реле возврата щеток искателя на нулевую ламель. На лицевую панель блока выводится тумблер, с помощью которого можно остановить щетки иска-

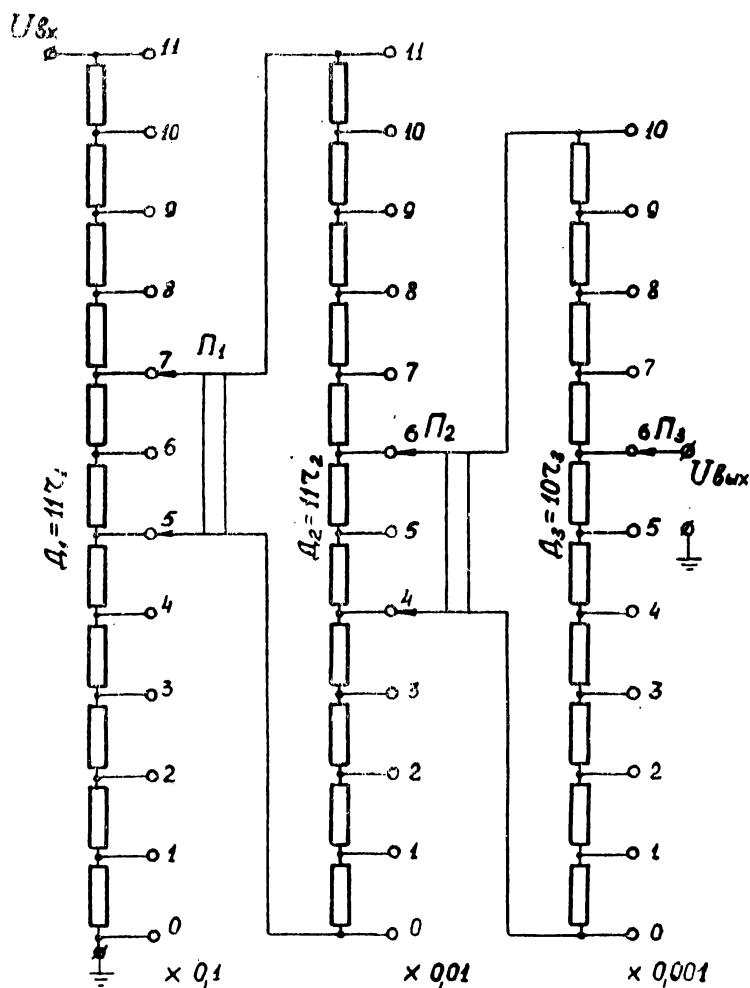


Рис. 36.

теля блока на любой ламели, т. е. превратить при этом переменный коэффициент в постоянный.

Блок постоянного коэффициента типа СБ-4 применяется для умножения переменных на постоянный коэффициент, величина которого может устанавливаться в пределах от 0 до 1 через 0,001 с погрешностью до 0,01%. Принципиальная схема блока показана на рис. 36. Блок типа СБ-4 представ-

ляет собой сдвоенный блок, что позволяет одновременно набирать два постоянных коэффициента. Каждая из двух частей блока представляет собой трехдекадный делитель, составленный из декад D_1 , D_2 и D_3 . Декады D_1 и D_2 состоят из 11 секций (11 проволочных сопротивлений по 3000 Ω и по 600 Ω соответственно), а делитель D_3 — из 10 секций сопротивлением 120 Ω каждая. Схема блока составлена таким образом, что каждый следующий делитель шунтирует две секции предыдущего делителя, причем сопротивление каждого последующего делителя равно сопротивлению двух секций предыдущего делителя. При таком соединении делителей выдерживается условие постоянства входного сопротивления блока СБ-4 при любом положении переключателей, и обеспечивается возможность задания постоянного коэффициента с точностью до трех знаков включительно.

12. Блок управления машины ИПТ-5

Блок управления служит для настройки, контроля и управления работой блоков операционных усилителей и блоков переменных коэффициентов машины. В состав блока входят следующие схемы:

- настройки и контроля нулей усилителей;
- задания начальных условий;
- защиты и сигнализации;
- управления машины.

Схема настройки и контроля нулей усилителей производит установку нулей 12 усилителей, входящих в состав блоков операционных усилителей БОУ-2. Настройка нулей каждого усилителя производится с помощью сдвоенных соосных потенциометров, ручки которых выведены на лицевую панель блока управления. Для контроля установки нулей усилителей служит вольтметр, имеющий 3 шкалы (100, 2,5 и 0,1 в). Контроль нулей усилителей производится в том случае, когда переключатель на лицевой панели находится в позиции «Проверка нуля». При этом выходы каждого усилителя последовательно подключаются к прибору переключателем на 12 положений.

Схема задания начальных условий содержит девять соосных потенциометров, ручки которых вынесены на лицевую панель блока управления. Напряжение на потенциометры подается через переключатель (позиция «Нач. условия»). Соответствующими тумблерами производится изменение знака этого напряжения, так что напряжение, соответствующее начальным условиям, может быть установлено в диапазоне от 0 до $\pm 100 \text{ в}$. Движки потенциометров задания начальных условий подключены к девяти клеммам, расположенным рядом с клеммами, соединенными со входными цепями зада-

ния начальных условий блоков операционных усилителей. Для подготовки цепей задания начальных условий производится коммутация гибкими коммутационными шнурами между клеммами начальных условий и клеммами блоков операционных усилителей. Контроль задания начальных условий производится прибором, который имеет две шкалы (10 и 100 в).

Схемы защиты и сигнализации включают в себя реле-ограничители с добавочными сопротивлениями. Эти реле подключены к выходам усилителей постоянного тока блоков операционных усилителей. Реле-ограничитель срабатывает в тех случаях, когда выходное напряжение усилителя превышает допустимые пределы ($\pm 105 \pm 5$ в); при этом включается цепь сигнального реле, которое своими контактами включает сигнальную лампочку и прекращает интегрирование.

Схема управления машины обеспечивает: синхронное переключение режимов работы блоков БОУ-2, управление работой блоков переменного коэффициента, получение отметок времени, счет числа импульсов. В схеме управления используется принудительная система синхронизации. Для синхронизации работы всех блоков и устройств машины служит генератор импульсов, состоящий из прерывателя и контактора. Прерыватели оформлены в виде трех сменных блоков и включают в себя электродвигатели типа СД-60 с двумя звездочками на валу. Каждая звездочка имеет определенное количество зубцов, что обеспечивает получение на выходе генератора импульсов следующих частот: 10, 4, 2, $\frac{4}{3}$, 1 и $\frac{2}{3}$ гц. Это соответствует следующим шагам во времени для блоков переменного коэффициента: 0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 1 и 1,5 сек. Оперативное управление машиной осуществляется с помощью кнопок «Пуск», «Остановка» и «Исх. положение», расположенных на лицевой панели блока управления.

Глава IV

ЗАДАЧИ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НА МАШИНАХ ИПТ-5, МН-2 и МН-7

1. Линейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений

Задача № 1. Автомобиль, движущийся со скоростью 50 км/час по ледяному полю, резко тормозит. Если коэффициент трения между шинами и льдом равен $k = 0,2$, справедливо дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -kg = -1,96,$$

где S — длина пути в метрах, g — ускорение свободного падения.

Определить длину тормозного пути (в метрах) и время торможения (до полной остановки). Масштаб времени — реальный.

Задача № 2. Реактор работает некоторое время в установившемся режиме и затем внезапно останавливается. Изотопы иода (I^{135}) и ксенона (Xe^{135}) к этому времени создают концентрацию $7,25 \cdot 10^{16}$ и $3,05 \cdot 10^{15}$ атомов в единице объема соответственно. I^{135} превращается в Xe^{135} , который, в свою очередь, превращается в относительно устойчивый цезий Cs^{135} . Этот процесс распада описывается системой уравнений:

$$\frac{dI}{dt} = -0,104 I,$$

$$\frac{dXe}{dt} = -0,075 Xe + 0,104 I.$$

В системе уравнений учтено, что одному часу реального времени соответствует одна секунда машинного времени. Найти концентрации I и Xe как функции времени.

Задача № 3. Небольшой груз подвешен на нерастяжимой нити длиной $l = 100$ см. Если пренебречь сопротивлением

воздуха, поведение этого маятника описывается уравнением:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{g}{l}\varphi = -9,8\varphi.$$

Определить максимальное отклонение маятника, если в положении равновесия ему сообщается тангенциальная скорость 2 см/сек , φ — угол отклонения маятника от положения равновесия (в радианах).

Задача № 4. Загрязненная вода содержит три группы бактерий, имеющих различную степень сопротивляемости убивающему действию дезинфицирующего вещества. Каждая группа имеет экспоненциальную зависимость выживания от предварительной обработки. Во время первой минуты обработки погибает 50% бактерий I группы, 30% — II и 20% — III группы.

Система уравнений, описывающая процесс выживания бактерий, имеет вид:

$$\frac{dx}{dt} = -0,693x,$$

$$\frac{dy}{dt} = -0,358y,$$

$$\frac{dz}{dt} = -0,223z,$$

x , y , z в уравнениях — концентрации бактерий I, II, III групп соответственно. Уравнения учитывают, что одна минута реального времени соответствует одной секунде машинного времени. Определить: 1) концентрацию каждой группы бактерий, как функцию времени, если начальные концентрации всех групп бактерий равны 10^5 в кубическом миллиметре; 2) полное количество выживающих бактерий во времени; 3) время обработки, необходимое для уменьшения количества всех бактерий до 1% от начального.

Задача № 5. Качающаяся дверь возвращается к первоначальному положению пружиной. При определенном моменте инерции двери и определенном демпфирующем моменте трения движение двери, выведенной из состояния равновесия, описывается дифференциальным уравнением:

$$0,52 \frac{d^2\alpha}{dt^2} + 0,2 \frac{d\alpha}{dt} + 18\alpha = 0,$$

где α — угол отклонения двери от положения равновесия (в радианах). Как широко откроется дверь, отклоненная в начальный момент на 10° , если ей сообщается угловая скорость $90^\circ/\text{сек}$? Как долго она будет колебаться? Масштаб времени реальный.

Задача № 6. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = 0,1 y,$$

$$\frac{dy}{dt} = -0,01 x - 0,001 t y.$$

Начальные условия: $x(0) = 1$; $y(0) = 0$.

Максимальные значения переменных: $x_{\max} = 1$, $y_{\max} = 0,2$.

Время решения: $t = 100$ сек.

Задача № 7. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = 0,1 y,$$

$$\frac{dy}{dt} = -0,01 x - 0,001 t y.$$

Начальные условия: $x(0) = 0$; $y(0) = -0,32$.

Максимальные значения переменных: $x_{\max} = 0,8$; $y_{\max} = -0,32$.

Время решения: $t = 100$ сек.

Задача № 8. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = 0,1 y,$$

$$\frac{dy}{dt} = -0,01 x - 0,01 t y.$$

Начальные условия: $x(0) = 1$; $y(0) = -0,32$.

Максимальные значения переменных: $x_{\max} = 1$; $y_{\max} = 0,4$.

Время решения: $t = 100$ сек.

Задача № 9. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = 0,233 y - 0,23 x + 0,1 z,$$

$$\frac{dy}{dt} = 0,814 z - 0,421 y + 0,2 u,$$

$$\frac{dz}{dt} = 0,914 u - 0,151 z + 0,1 x,$$

$$\frac{du}{dt} = 3,804 x - 0,724 y - 1,03 z - 3,046 u.$$

Начальные условия: $x(0) = 0,9$; $y(0) = 0,42$; $z(0) = -0,5$; $u(0) = -0,54$.

Время решения: $t = 20$ сек.

Задача № 10. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv}{dt} = -0,059v + 0,101\alpha - 4,02\gamma,$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = -0,8v - 4,59\alpha - 0,39\gamma + 10\omega,$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 0,861v - 7,16\alpha + 0,126\gamma - 9,66\omega,$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega.$$

Начальные условия: $\alpha(0) = 0,1$; $v(0) = \omega(0) = \gamma(0) = 0$.

Время решения: $t = 10$ сек.

Задача № 11. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = -0,433y - 0,27x + 0,61z,$$

$$\frac{dy}{dt} = 0,51z - 0,666x + 0,457v,$$

$$\frac{dz}{dt} = 0,66v - 0,18z,$$

$$\frac{dv}{dt} = -0,33x - 0,355y - z - 0,517v.$$

Начальные условия: $x(0) = 0,9$; $y(0) = 0,65$; $z(0) = -0,65$; $v(0) = 0,78$.

Время решения: $t = 20$ сек.

Задача № 12. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv}{dt} = -3,9\gamma - 0,045v + 0,22\alpha,$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = 8\omega - 0,76v - 5,8\alpha - 0,343\gamma,$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 0,21\gamma + 0,93v - 0,21\omega - 6,7\alpha,$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = 0,7\omega.$$

Начальные условия: $\alpha(0) = 0,095$; $v(0) = \omega(0) = \gamma(0) = 0$.

Время решения: $t = 20$ сек.

Задача № 13. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = 0,645y - 0,322x + 0,25z,$$

$$\frac{dy}{dt} = 0,845z - 0,458y + 0,1u,$$

$$\frac{dz}{dt} = 0,923 u - 0,625 z + 0,1 x,$$

$$\frac{du}{dt} = -1,336 x - 2,956 y - 1,304 z - 1,364 u.$$

Начальные условия: $x(0) = 0,64$; $y(0) = 0,8$; $z(0) = 0,72$;
 $u(0) = 0,74$.

Время решения: $t = 18$ сек.

Задача № 14. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = 0,45 y - 0,4 x,$$

$$\frac{dy}{dt} = 0,65 z - 0,3 y,$$

$$\frac{dz}{dt} = 0,644 u - 0,2 z,$$

$$\frac{du}{dt} = -0,432 x - 0,851 y - 1,21 z - 1,854 u.$$

Начальные условия: $x(0) = 0,85$; $y(0) = 0,82$; $z(0) = -0,95$;
 $u(0) = -0,68$.

Время решения: $t = 15$ сек.

Задача № 15. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = 0,677 y - 0,333 x + 0,55 z,$$

$$\frac{dy}{dt} = -0,556 x + 0,43 z + 0,36 u,$$

$$\frac{dz}{dt} = -0,412 z + 0,78 u,$$

$$\frac{du}{dt} = -1,36 z - 0,412 y - 0,21 x - 0,73 u.$$

Начальные условия: $x(0) = 0,77$; $y(0) = 0,58$; $z(0) = -0,72$;
 $u(0) = 0,86$.

Время решения: $t = 30$ сек.

Задача № 16. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = 0,55 y - 0,3 x,$$

$$\frac{dy}{dt} = 0,855 z - 0,2 y,$$

$$\frac{dz}{dt} = 0,833 y - 0,1 z,$$

$$\frac{du}{dt} = 0,931 v - 0,5 u,$$

$$\frac{dv}{dt} = 0,303 \omega - 0,25 v,$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} = & -0,578 x - 0,878 y - 2,491 z - 3,101 u - \\ & - 3,827 v - 0,825 \omega. \end{aligned}$$

Начальные условия: $x(0) = 0,903$; $y(0) = 0,573$; $z(0) = -0,383$; $u(0) = -0,668$; $v(0) = 0,598$; $\omega(0) = 0,92$.

Время решения: $t = 20$ сек.

2. Нелинейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений

Задача № 1. Вода вытекает через круглое отверстие диаметром $d = 2,54$ см, сделанное в стенке вертикального цилиндрического сосуда, диаметром $D = 31$ см. Скорость воды в струе равна $\sqrt{2gh}$, где h — высота уровня воды в цилиндре относительно центра отверстия. Сколько времени потребуются, чтобы уровень воды упал с 8,8 м до 2,8 м, если этот процесс описывается уравнением:

$$\frac{dh}{dt} = -\left(\frac{d}{D}\right)^2 \sqrt{2gh} = -\frac{1}{72} \sqrt{h}.$$

Задача № 2. Решить уравнение Ван-дер-Поля:

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

где μ — коэффициент, имеющий величину от 0,1 до 1.

Начальные условия:

$$x(0) = 0; \quad \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = 1.$$

Максимальные значения переменных:

$$x_{\max} = 3; \quad \left(\frac{dx}{dt} \right)_{\max} = 4.$$

Задача № 3. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = x^2 - y^2,$$

$$\frac{dy}{dt} = 2xy.$$

Начальные условия: $x(0) = 0$; $y(0) = 1$.

Задача № 4. Решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = -0,2x + 0,2xy^2 - y,$$

$$\frac{dy}{dt} = x.$$

Начальные условия: $x(0) = 1$; $y(0) = 1$.

Задача № 5. Среди населения численностью 1000 человек имеется 10 носителей заразной болезни; 90 человек выздоровели и имеют иммунитет, а 900 человек подвержены заражению. Каждый больной заражает в среднем 1 здорового, который после 14 дней выздоравливает и приобретает иммунитет.

Найти как функцию времени:

$x(t)$ — число подверженных заражению,

$y(t)$ — число зараженных,

$z(t)$ — число выздоровевших и получивших иммунитет,

$\frac{dx}{dt}$ — эпидемическую кривую, характеризующую появление случаев заболевания.

Уравнения, описывающие эти явления, имеют вид:

$$\frac{dx}{dt} = -0,001 xy,$$

$$\frac{dy}{dt} = 0,001 xy - 0,072 y,$$

$$\frac{dz}{dt} = 0,072 y.$$

Начальные условия: $x(0) = 900$; $y(0) = 10$; $z(0) = 90$.

Перечень рекомендуемой литературы:

1. Курс лекций по аналоговым вычислительным машинам, читаемый в МИФИ.
 2. Б. Я. Коган. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. Физматгиз, М., 1959, 1963.
 3. И. И. Этерман. Математические машины непрерывного действия. Машгиз, М., 1957.
 4. Н. Е. Кобринский. Математические машины непрерывного действия. Гостехиздат, М., 1954.
-

О Г Л А В Л Е Н И Е

Глава I. Основные принципы построения аналоговых вычислительных машин	3
1. Алгебраическое суммирование (3), 2. Масштабное преобразование и инвертирование (4), 3. Интегрирование (4), 4. Умножение на постоянный коэффициент (5), 5. Умножение на переменный коэффициент (6), 6. Перемножение двух переменных (6), 7. Функциональное преобразование (6).	
Глава II. Общая методика решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений на АВМ	8
Порядок подготовки систем дифференциальных уравнений к решению на АВМ 8	
1. Приведение заданной системы уравнений к виду, удобному для моделирования (9), 2. Составление структурной схемы соединений между блоками (9), 3. Расчет масштабов величин и определение коэффициентов передачи операционных усилителей (12), 4. Подготовка функциональных преобразователей к решению (14), 5. Подготовка блоков переменного коэффициента к решению (17), 6. Коммутация блоков машины и особенности коммутации в различных машинах (18).	
Глава III. Описание аналоговых вычислительных машин	21
Аналоговая вычислительная машина типа МН-2 21	
1. Назначение установки и ее общие характеристики (21), 2. Операционные блоки МН-2 (22), 3. Усилители постоянного тока (32), 4. Система питания машины МН-2 (35), 5. Система управления машины МН-2 (35), 6. Некоторые приемы работы на машине МН-2 (аппаратура обслуживания и индикации) (46).	
Аналоговая вычислительная машина типа МН-7 50	
7. Назначение установки и ее общие характеристики (50), 8. Основной блок машины МН-7 (51), 9. Система управления, контроля и сигнализации машины МН-7 (57).	
Аналоговая вычислительная машина типа ИПТ-5, 63	
10. Назначение установки и ее общие характеристики (63), 11. Операционные блоки машины ИПТ-5 (64), 12. Блок управления машины ИПТ-5 (69).	
Глава IV. Задачи, рекомендуемые для решения на машинах ИПТ-5, МН-2, МН-7	71
1. Линейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений (71), 2. Нелинейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений (76).	

**АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ
МАШИНЫ**

Редактор *Т. Н. Артемова*
Техн. редактор *И. М. Суровенков*

Сдано в набор 16/IV 1964 г.

Подписано в печать 2/IX-64 г.

Бумага 60×90/16. Объем 5 п. л.

Л 78633 Тираж 1600 экз. Заказ 525

Цена 35 коп.

Типография МИФИ, М. Пионерская, 12.

Цена 35 коп.