

РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ НА АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Часть первая

СВЕРДЛОВСК
1976

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Уральский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт имени С. М. Кирова

РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ НА АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Часть I

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Решение инженерных задач на аналоговых вычислительных машинах, ч. 1. Учебное пособие. Свердловск, изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1976, с. 38.

Изложены устройство и принцип действия аналоговых вычислительных машин (АВМ). Описаны основные типовые блоки. Приведена методика решения задач на АВМ. Рассмотрены три уровня разработки схем моделей.

Пособие предназначено для студентов очного, заочного и вечернего обучения всех факультетов и специальностей втузов и может быть рекомендовано аспирантам и инженерам.

Рис. 18. Библ. 10 назв.

Авторы:

**А. В. Виноградов, В. М. Кирпичников,
В. В. Ковалев, А. Н. Ковшов**

Под общей редакцией М. Г. ЖУК

Рецензенты:

зав. каф. АПП УЛТИ, доц. канд. техн. наук **Б. В. Ковылов**,
ст. препод. каф. АПП УЛТИ **Ю. В. Новоселов**, ст. препод. каф.
ЭАП УПИ **А. Д. Гильдебранд**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие «Решение инженерных задач на аналоговых вычислительных машинах, ч. 1» начинает выпуск новой серии учебных пособий для вузов по курсам «Основы вычислительной техники», «Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах».

Первая часть пособия посвящена устройству и принципам действия АВМ. В ней рассмотрены режимы работы усилителей постоянного тока, блоки постоянных и переменных коэффициентов, блоки функциональный и перемножения. Приведено коммутационное поле широко распространенной малой АВМ типа МН-7. Рассмотрена методика решения задач на АВМ. Введено понятие о дифференциальных уравнениях постоянной структуры. Изложены масштабирование и приведение уравнений к виду, удобному для моделирования. Описаны приемы разработки схем моделей для решения линейных дифференциальных уравнений.

Глава 1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АВМ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При решении инженерно-технических задач в последнее время широко используется метод математического моделирования. Математическое моделирование предполагает возможность описания объекта исследования математически — системой уравнений или неравенств, которые называют математической моделью. Математическая модель может быть реализована («проиграна») с помощью цифровой вычислительной машины (ЦВМ) или электронной моделирующей установки (ЭМУ). Реальные свойства объекта исследования определяются по поведению соответствующих переменных величин в ЭМУ.

Сущность реализации математической модели на ЭМУ сводится к следующему:

1. Создается математическое описание объекта.

2. В ЭМУ строится электронная схема, которая описывается такими же уравнениями, как и объект. При этом процессы, происходящие в электронной схеме моделирующей установки, протекают так же, как в реальном объекте, но по своей физической природе отличаются от них.

3. Результаты исследования на ЭМУ могут быть непосредственно перенесены на реальный объект.

В большинстве моделирующих установок реальные величины заменяются непрерывно меняющимся напряжением постоянного тока. Поэтому такие машины иногда называют машинами непрерывного действия. Так как процесс в ЭМУ происходит аналогично реальному, то ЭМУ называют аналоговыми вычислительными машинами (АВМ).

По характеру решения задач АВМ делятся на универсальные и специализированные установки. На специализированных АВМ решают ограниченный класс задач.

Универсальные АВМ предназначены для решения различных математических задач. Они выполняют арифметические действия (сложение, вычитание, умножение, деление), а также операции дифференцирования и интегрирования. Поэтому на АВМ этого типа часто решают задачи, математическое описание которых представляет систему алгебраических, обыкновенных дифференциальных линейных и нелинейных уравнений или систему уравнений в частных производных.

По сравнению с ЦВМ аналоговые вычислительные машины имеют ряд преимуществ. Трудоемкость решения задач на АВМ в ряде случаев невелика. АВМ значительно проще в конструкции и дешевле. Стоимость машинного времени АВМ мала.

В качестве недостатков аналоговых вычислительных машин можно назвать недостаточную (по сравнению с ЦВМ) точность решения задач, ограниченное количество операций, выполняемое машиной за один набор задачи.

Основную трудность математического моделирования составляет разработка математического описания объекта. Известен ряд технологических процессов, которые трудно описать математически. В таких случаях используют статистико-вероятностные описания, реализация которых вызывает дополнительные затруднения [1].

Точность решения математической задачи на АВМ зависит от точности и стабильности параметров электронной схемы (активных сопротивлений, емкостей, характеристик радиоламп, транзисторов и т. п.). При оценке относительных погрешностей решения задачи на АВМ в первом приближении полагают, что она соответствует общему порядку системы уравнений, например, 5% для системы уравнений пятого порядка.

В АВМ независимой переменной является время. Решение может выполняться в натуральном, замедленном или ускоренном темпе времени.

Результаты решения регистрируются при помощи электронных осциллографов с фотоприставками, светолучевых осциллографов, самопишущих приборов, цифропечатающих вольтметров или отсчитываются по стрелочному вольтметру.

По техническому устройству АВМ делятся на машины матричного и структурного типов.

Матричные АВМ имеют жесткую электрическую схему. Они могут решать уравнения, приведенные к определенной стандартной матричной форме. Такие АВМ просты по устройству, но в силу жесткой конструкции решают слишком ограниченный класс задач. К этому типу машин относятся АВМ МЛ-2 — модель линейная, предназначенная для решения системы линейных алгебраических или дифференциальных уравнений до двенадцатого порядка.

Структурные АВМ состоят из отдельных блоков, каждый из которых выполняет определенные операции. В зависимости от математического описания задачи используются только необходимые блоки. Комплект блоков при помощи гибких проводников соединяется в одну схему, которая является аналогом решаемой задачи. Набор отдельных блоков позволяет собрать достаточно сложную по математическому описанию схему. На структурных АВМ решается широкий класс задач, который описывается системами алгебраических уравнений, одним дифференциальным уравнением (линейным или нелинейным) высокого порядка, систе-

мой обыкновенных дифференциальных уравнений. На структурных АВМ можно моделировать систему автоматического регулирования, в некоторых случаях возможно решение задачи, не имеющей достаточно полного математического описания.

К этому типу относятся серийно выпускаемые структурные АВМ МН-7, МН-10, МН-14, МН-17, МН-18, ЭМУ-10 [2, 3].

Блок-схема АВМ структурного типа приведена на рис. 1. В нее входит комплект решающих блоков (КРБ), пульт управления машиной (ПУ), коммутационная панель (КП) для соединения блоков в единую схему, регистрирующий блок (РБ) и источник питания (ИП).

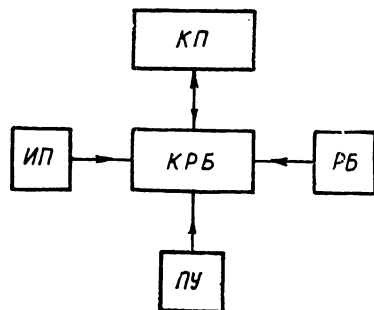


Рис. 1. Блок-схема АВМ структурного типа.

В комплект решающих блоков входят операционные усилители, блоки постоянных и переменных коэффициентов, функциональные блоки, блоки перемножения и деления, блоки постоянного и регулируемого запаздывания и другие специальные устройства.

1.2 РЕЖИМЫ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Основным счетно-решающим элементом АВМ структурного типа является операционный усилитель постоянного тока (УПТ). Он представляет в большинстве случаев устройство, выполненное на электронных лампах или транзисторах, и является усилителем постоянного тока. Чтобы работа усилителя была устойчивой, его охватывают глубокой отрицательной обратной связью. В зависимости от включения на вход усилителя и в обратную связь емкости или активного сопротивления работа его описывается различными математическими уравнениями. Операционный усилитель с обратной связью выполняет операции алгебраического сложения, умножения на постоянный множитель, интегрирования и дифференцирования по времени.

На рис. 2, а показано условное обозначение операционного усилителя с обратной связью. Введены следующие обозначения: $U_{вх}$, $U_{вых}$ — входное и выходное напряжение усилителя с обратной связью;

Z_0 — сопротивление обратной связи;

Z_1 — сопротивление на входе усилителя;

i — ток, протекающий через сопротивление Z_1 ;

e — ЭДС на входе операционного усилителя без обратной связи.

На этом и последующих рисунках второй (заземленный) провод опущен.

РЕШАЮЩИЕ ФУНКЦИИ УСИЛИТЕЛЯ

1. Умножение на постоянный множитель. Если входное сопротивление и сопротивление обратной связи являются активными ($Z_0=R_0$, $Z_1=R_1$), то электрическая схема, представленная на рис. 2, а, производит умножение входного сопротивления на по-

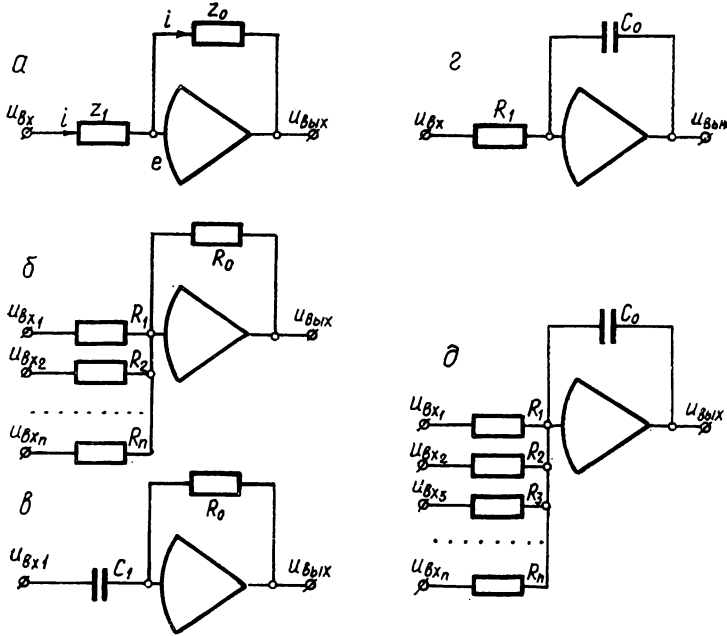


Рис. 2. Режимы работы УПТ.

стоянный коэффициент R_0/R_1 с изменением знака на противоположный. Покажем это, рассмотрев электрические процессы в этой схеме.

Запишем уравнения электрического равновесия схемы:

$$e = U_{вх} - iR_1;$$

$$U_{вых} = e - iR_2;$$

$$U_{вых} = -ke,$$

здесь k — коэффициент усилителя без обратной связи.

Решение приведенной системы

$$U_{вых} = -\frac{U_{вых}}{k} - \frac{R_0}{R_1} \left(U_{вх} + \frac{U_{вых}}{k} \right)$$

при $k=3 \cdot 10^4 - 10^6$ с точностью до трех-четырех значащих цифр можно упростить:

$$U_{\text{вых}} = - \frac{R_0}{R_1} U_{\text{вх}}.$$

2. *Инвертирование (смена знака).* При $Z_0=Z_1=R_1$ коэффициент передачи равен -1 , т. е. $U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}}$.

3. *Суммирование.* На вход усилителя (см. рис. 2, б) подключаются сопротивления R_1, R_2, \dots, R_n , к которым присоединяются источники напряжений.

(Выразим величину тока через обратное сопротивление алгебраической суммой токов, протекающих через входные сопротивления:

$$\frac{e - U_{\text{вых}}}{R_0} = \frac{U_{\text{вх}1} - e}{R_1} + \frac{U_{\text{вх}2} - e}{R_2} + \dots + \frac{U_{\text{вх}n} - e}{R_n},$$

где $e = \frac{U_{\text{вых}}}{k} \approx 0$.

(Подставив значение $e=0$, получаем

$$U_{\text{вых}} = - \frac{R_0}{R_1} U_{\text{вх}1} - \frac{R_0}{R_2} U_{\text{вх}2} - \dots - \frac{R_0}{R_n} U_{\text{вх}n}.$$

Таким образом, выходное напряжение равно алгебраической сумме входных напряжений с умножением на постоянные множители и изменением знака:

$$U_{\text{вых}} = -R_0 \sum_{i=1}^n \frac{U_{\text{вх}i}}{R_i}.$$

4. *Интегрирование.* На вход усилителя включено активное сопротивление R_1 , а в цепь обратной связи — емкость C_0 (см. рис. 2, г).

(Поскольку величина заряда конденсатора Q прямо пропорциональна емкости конденсатора C и напряжению, приложенному к конденсатору, а электрический ток есть скорость изменения количества электричества

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

то протекающий через конденсатор ток

$$i_c = \frac{dQ}{dt} = C_0 \frac{d(e - U_{\text{вых}})}{dt}.$$

Запишем уравнение токов через напряжения:

$$\frac{U_{\text{вх}} - e}{R_1} = C_0 \frac{d(e - U_{\text{вых}})}{dt}.$$

Подставив значение $e=0$, получаем дифференциальное уравнение относительно $U_{\text{вых}}(t)$:

$$\frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_0} U_{\text{вх}}(t).$$

Перепишем последнее уравнение в эквивалентной интегральной форме:

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{R_1 C_0} \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt + U_0,$$

здесь U_0 — постоянная интегрирования.

Таким образом, схема рис. 2, *г* производит интегрирование входной переменной по переменной t (время).

Математически постоянная интегрирования U_0 является значением переменной $U_{\text{вых}}(t)$ в момент времени, равный нулю. Появление на выходе усилителя конечного напряжения в момент $t=0$ физически означает, что конденсатор был заряжен.

5. *Интегрирование суммы.* Если на вход усилителя с емкостью C_0 подается несколько напряжений $U_{\text{вх1}}, U_{\text{вх2}}, U_{\text{вх3}}, \dots, U_{\text{вхn}}$ через входные сопротивления R_1, R_2, \dots, R_n (см. рис. 2, *д*), то выходное напряжение равно сумме интегралов входных напряжений по времени с умножением их на постоянные множители. Знак суммы изменяется на противоположный

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{C_0} \int_0^t \sum_{i=1}^n \frac{U_{\text{вх}i}}{R_i} dt.$$

6. *Дифференцирование.* Для схемы рис. 2, *в*, где $Z_0=R_0$, $Z_1=C_1$, при нулевых начальных условиях

$$U_{\text{вых}} = -R_0 C_1 \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}.$$

Усилитель, включенный таким образом, выполняет операцию дифференцирования с одновременным умножением на постоянный коэффициент.

1.3. БЛОК ПОСТОЯННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Коэффициент передачи операционного усилителя определяется отношением R_0/R_1 . Подключая на вход и в обратную связь усилителя различные постоянные сопротивления R_0 и R_1 , можно получить умножение входного напряжения на постоянный множитель. В машинах структурного типа значения сопротивлений выражены в килоомах и мегаомах. Обычны номинальные значения сопротивлений 0,01 мОм, 0,02; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 и др., которые, как правило, имеют одну значащую цифру. Для установки коэффициентов, имеющих две-три значащие цифры, используются переменные входные сопротивления и делители

напряжения. На делителе напряжения значение коэффициента устанавливается с помощью ручек-указателей с точностью настройки коэффициента до трех-четырех значащих цифр. С делителя снимается часть подаваемого на него напряжения, поэтому с его помощью можно установить масштабный множитель $0 \leq \mu \leq 1$.

При помощи переменных входных сопротивлений можно также плавно изменять масштабный множитель, но точность их настройки меньше, чем для делителя. Условное обозначение делителя дано в приложении.

Для повышения точности набора масштабного множителя при помощи постоянных сопротивлений собирают схему с ближайшим большим коэффициентом усиления и делителем уменьшают его до требуемой величины. В качестве примера рассмотрим установку коэффициента усиления 4,75 на АВМ типа МН-7

(рис. 3, а). Для этого выбираем $R_0=1$, $R_1=0,1$ мОм и получаем схему с коэффициентом усиления 10. Для снижения его до величины 4,75 последовательно со входным сопротивлением включаем делитель, на котором устанавливаем $\mu_1=0,475$. Аналогично для установки коэффициента усиления схемы, равного 0,75, выбираем $R_0=R_1=1$ мОм, а с помощью делителя настраиваем $\mu_2=0,75$ (см. рис. 3, б).

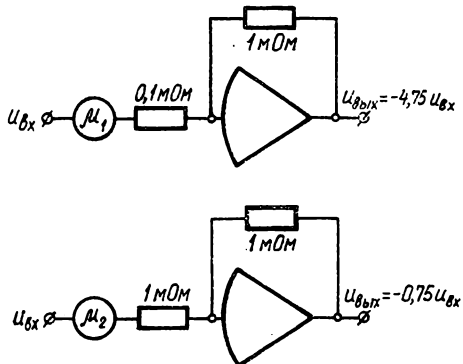


Рис. 3. Схема набора коэффициентов 4,75 и 0,75.

1.4. БЛОК ПЕРЕМЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Блок применяется при решении уравнений, в которых коэффициенты являются функцией времени:

$$a_1(t) \frac{d^n x}{dt^n} + a_2(t) \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n(t) x = b_1(t) \frac{d^m y}{dt^m} + b_2(t) \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_m(t) y + c(t), \quad m \leq n.$$

С его помощью воспроизводятся слагаемые типа $c(t)$ и произведение переменного во времени коэффициента на производную внешнего возмущения или искомой переменной.

При медленном изменении коэффициентов уравнения применяют электромеханические устройства. Среди них наиболее рас-

пространены кулачковый, с проволочным профилем, с профильным реостатом, с фотоследящим устройством [4], с шаговым искателем. В состав АВМ типов МНБ-1, ЛМУ-1, МН-14, МН-17 входят блоки с шаговыми искателями. Упрощенное устройство блока приведено на рис. 4. Основой блока служат делитель напряжения, имеющий 201 отвод [5], и шаговый искатель возвратного

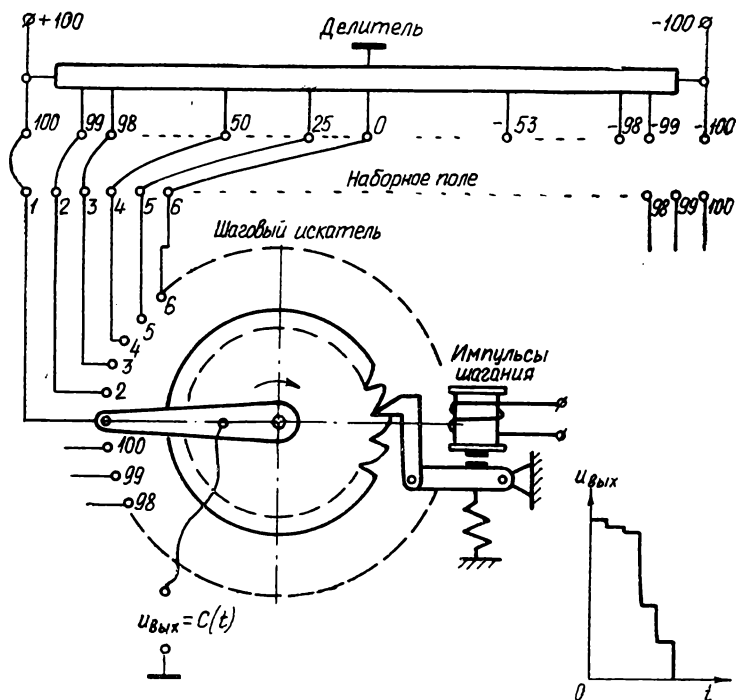


Рис. 4. Электромеханический блок переменных коэффициентов.

типа на 100 положений. Одно из его полей с блок-контактом применяется для возврата на нуль. Время переключения задается моторным реле времени с синхронным микродвигателем. Длительность каждого шага может составлять 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5 с, но в процессе решения шаг постояен. В средних АВМ (например, МН-14) время переключения задается электронным счетчиком с интервалами 0,1; 0,2; 1; 2; 10 с. Воспроизведение коэффициента в таких АВМ выполняется с переменным шагом по времени.

Делитель на 200 ступеней с 201-м отводом включается либо на напряжения $+100$ В с заземленной средней точкой (воспроизведение $c(t)$), либо на напряжение $\pm U_{\text{вх}}$. В последнем случае получается произведение коэффициента на переменную.

Для подготовки блока переменных коэффициентов к работе задаваемую функцию времени вычерчивают на бумаге и заменяют ступенчатой зависимостью с шагами по времени, воспроизводимыми в применяемой АВМ. В соответствии с полученным графиком с погрешностями не менее 1% наборное поле шагового искателя соединяется с отводами делителя. Для малых АВМ соединения в схеме припаиваются, для средних предусмотрена шнуровая коммутация на наборных полях. Во время работы блока подвижные контакты шагового искателя поочередно подключаются к гнездам наборного поля и воспроизводят набранную функцию. Условное обозначение блока дано в приложении.

1.5. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК

Если требуется решать дифференциальное уравнение вида

$$a_1(x) \frac{d^n x}{dt^n} + a_2(x) \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n(x) x = \\ = b_1(y) \frac{d^m y}{dt^{m-1}} + b_2(y) \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_m(y) y + C(y)$$

или любое другое с коэффициентами, зависящими от невременного аргумента, то применение блоков переменных коэффициентов становится невозможным. В этих случаях нелинейные коэффициенты воспроизводят при помощи функциональных блоков.

Различают три вида приближения функций, используемых в электронном моделировании: естественное, степенным рядом и кусочно-линейная аппроксимация. Естественное приближение использует элементы с нелинейными характеристиками (электронные лампы, тиритовые и карборундовые сопротивления, термосопротивления и термисторы). Приближение функции степенным рядом основано на решении дифференциальных уравнений определенного вида. Наибольшее распространение получила кусочно-линейная аппроксимация, выполненная на электронных диодных схемах с последовательными и параллельными звеньями на отпирание и запираение.

Если заданная функция $F(x)$ однозначна и непрерывна на рассматриваемом интервале, то она может быть аппроксимирована (приближенно представлена) с помощью отрезков прямых. Используя уравнение полупрямой линии

$$F(x) = F_0 + k_i(x - x_i) \operatorname{sg}(x - x_i),$$

можно записать

$$F(x) = F_0 + kx + \sum_{i=1}^n k_i(x - x_i) \operatorname{sg}(x - x_i),$$

где

$$\text{sg}(x - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \geq x_i; \\ 0 & \text{при } x < x_i; \end{cases}$$

x_i — абсцисса начала полупрямой.

Рассмотрим получение одной полупрямой, представленной уравнением

$$F(x) = k_i(x - x_i) \text{sg}(x - x_i).$$

Электрическая схема и график зависимости представлены на рис. 5. На делитель напряжения R_1 — R_2 слева поступает напряжение x , справа — опорное напряжение $+e_{\text{оп}}$. Если $x < e_{\text{оп}}R_1/R_2$, то диод D находится в закрытом состоянии и $F(x) = 0$.

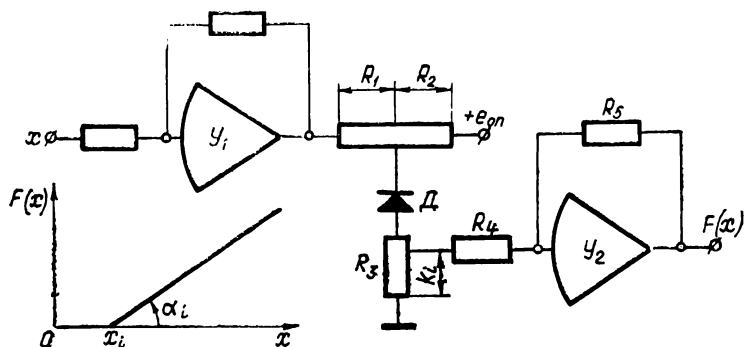


Рис. 5. Электрическая схема диодного элемента и его характеристика.

При $x = x_i = e_{\text{оп}}R_1/R_2$ диод открывается. Чем больше x , тем больше $F(x)$. Пренебрегая потерями в диоде, получаем зависимость $F(x)$, показанную на рис. 5. Начало полупрямой x_i регулируется отношением R_1/R_2 . Коэффициент $k_i = \text{tg} \alpha_i$ устанавливают движком сопротивления R_3 . Для расширения диапазона настроек сопротивления R_4, R_5 имеют ступенчатое переключение. Изменяя знаки величин $x, e_{\text{оп}}$ и полярность диода, можно получить полупрямые во втором, третьем и четвертом квадрантах.

Универсальные функциональные блоки разных АВМ позволяют набрать постоянную составляющую F_0 , одну прямую kx и 10—40 полупрямых, аппроксимирующих функцию. На рис. 6 показана кусочно-линейная функция и схема ее аппроксимации. Для простоты переключатели не указаны. Перед решением задачи нелинейная зависимость вычерчивается на бумаге и заменяется ломаной линией. Для настройки блока необходимо знать расположение полупрямых в квадрантах и координаты точек излома. Начальное значение F_0 устанавливается при помощи делителя, подключаемого к источнику $\pm e_{\text{оп}}$. Значение F_0 принимаем в качестве новой оси абсцисс. Первый линейный отрезок

повернут на угол α против часовой стрелки и располагается в первом квадранте. Второй отрезок начинается в точке (F_1, x_1) . Выбирая за новое направление оси абсцисс предыдущий отрезок, устанавливаем, что второй отрезок повернут на угол α_1 против

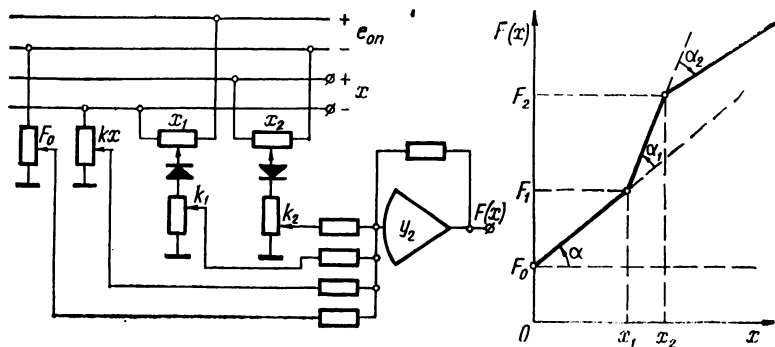


Рис. 6. Упрощенная схема функционального блока и набранная на нем характеристика.

часовой стрелки. Значит, он набирается тоже в первом квадранте. Угол α_2 направлен по часовой стрелке, поэтому третий отрезок набирается в четвертом квадранте. Уравнение набранной функции имеет вид:

$$F(x) = F_0 + kx + k_1(x - x_1) \operatorname{sg}(x - x_1) - k_2(x - x_2) \operatorname{sg}(x - x_2),$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha = k; \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = k_1; \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = k_2.$$

Следует отметить, что в малых АВМ усилители Y_1, Y_2 не входят в состав функционального блока и подсоединяются к нему извне. В средних АВМ усилитель Y_2 входит в состав блока. При настройке блока обычно составляют таблицу. Последовательность настройки изложена в [6]. Условное обозначение функционального блока дано в приложении.

Из нелинейных зависимостей большое значение имеет квадратичная зависимость. Блок ее воспроизведения $F(x) = x^2$ называется квадратом.

1.6. БЛОК ПЕРЕМНОЖЕНИЯ

Для перемножения величин в АВМ применяются самые разнообразные устройства. По способу выполнения действия множительные устройства можно подразделить на устройства прямого и косвенного действия. Устройства прямого действия используют электронные лампы, электронно-лучевые трубки.

Устройства косвенного типа используют аналитические зави-

симости тригонометрического, логарифмического, интегрального вида:

$$xy = \frac{1}{2} [\cos(a - b) - \cos(a + b)],$$

при

$$x = \sin a, \quad y = \sin b;$$

$$xy = a^{(\lg_a x + \lg_a y)},$$

$$xy = \int x dy + \int y dx.$$

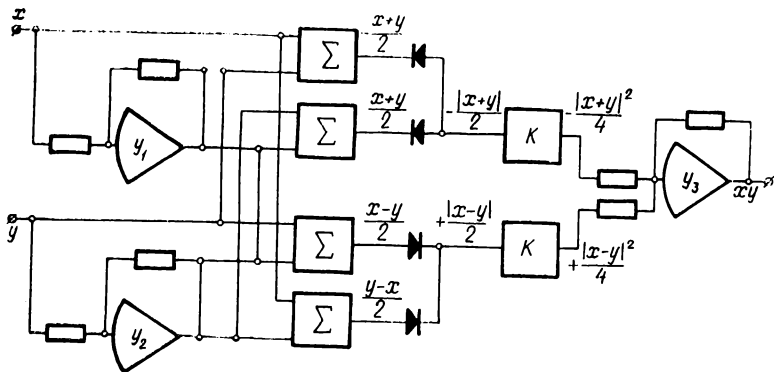


Рис. 7. Упрощенная схема блока перемножения (K — квадратор).

Наибольшее распространение получил блок, использующий формулу:

$$xy = \frac{1}{4} [(x + y)^2 - (x - y)^2].$$

Структурная схема блока перемножения изображена на рис. 7. Работа блока протекает следующим образом. На вход блока подаются перемножаемые величины x , y со своим и обратным знаками. Они поступают в суммирующие устройства, с выхода которых снимаются величины $\pm(x+y)/2$ и $\pm(x-y)/2$. Диоды в схеме включены так, что формируются суммы

$$-\frac{1}{2}|x+y| \text{ и } +\frac{1}{2}|x+y|.$$

Отрицательная сумма и положительная разность поступают каждая в отдельный квадратор. Знаки суммы и разности при возведении в квадрат сохраняются. Технически квадратор обычно выполняется в виде диодного функционального преобразователя [6]. Полученные квадраты величин складываются на выходном усилителе. При этом знак суммы меняется. Работа описанной схемы рассчитана таким образом, что при $x=y=100$ В вы-

ходное напряжение $x_2 = 100$ В. Таким образом, величина 100 В принимается за условную единицу. Это обстоятельство следует учитывать при масштабировании задач. Квадраторы малых АВМ настраиваются на заводе-изготовителе и нуждаются в ежедневной подстройке. Квадраторы средних АВМ регулируются при профилактических ремонтах. Усилители $У_1$, $У_2$, $У_3$ в состав блока малых АВМ не входят. В блоках средних АВМ отсутствует усилитель $У_2$. Условное обозначение блока дано в приложении.

1.7. БЛОК ДЕЛЕНИЯ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ КВАДРАТНОГО КОРНЯ

В некоторых малых и большинстве средних АВМ предусмотрена возможность переключения (включения) блока перемножения в схемы деления и извлечения квадратного корня. Для

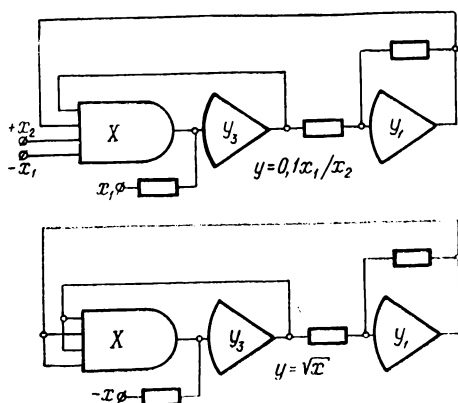


Рис. 8. Схемы деления и извлечения квадратного корня.

этих целей пассивный блок включается в цепь обратной связи усилителя $У_3$ [4, 5] (рис. 8).

Для схемы деления

$$y = k(yx_2 + 0,1x_1),$$

откуда

$$y = \frac{0,1x_1}{\frac{1}{k} - x_2} \approx -0,1 \frac{x_1}{x_2}.$$

Здесь и далее x_1 , x_2 , y выражаются в относительных единицах: 1 о.е. = 100 В. Выражение справедливо при $k \gg 1$ для усилителя $У_3$, поэтому применен усилитель без обратной связи. При изменении делимого x_1 в пределах от -1 до $+1$ делитель x_2 может принимать значения от 0,1 до 1.

Аналогично для схемы извлечения квадратного корня

$$y = k(y^2 - x),$$

откуда

$$y = \frac{1}{2k} + \sqrt{\frac{1}{4k^2} + x} \approx \sqrt{x}.$$

Применение обычных УПТ позволяет выполнять описанные операции с точностью до трех-четырех значащих цифр. При обращении x_2 или x в нуль схемы обычно самовозбуждаются. Для восстановления работоспособности схем следует ввести x_2 и x в допустимый диапазон и кратковременно переключить схему на другой режим работы. В малых АВМ усилители $У_1, У_3$ обычно не входят в состав блока деления и извлечения квадратного корня (см. 1.6.).

1.8. КОММУТАЦИОННОЕ ПОЛЕ МН-7

Наибольшее распространение для учебных целей и решения простых инженерных задач получили АВМ типа МН-7. Набор

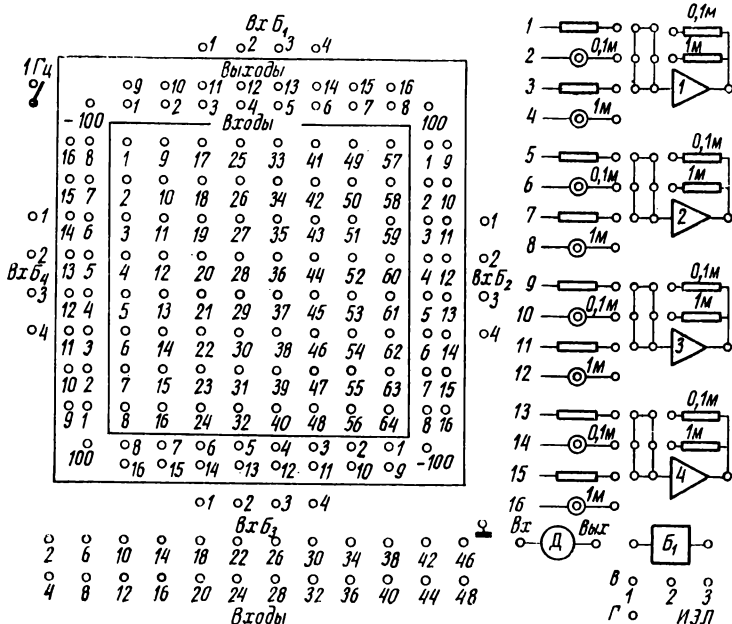


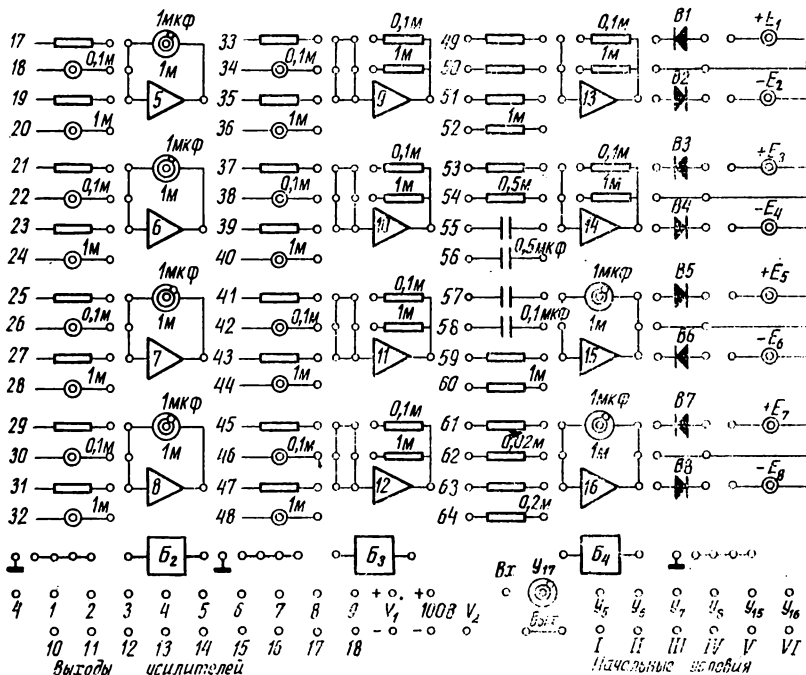
Рис. 9. Коммутационное поле

схемы модели производится на коммутационном поле (рис. 9). Подробное описание машины приведено в [7].

Коммутационное поле содержит набор гнезд для сборки схемы, изображения усилителей, постоянных и переменных сопро-

тивлений, емкостей, диодов, нелинейных блоков, источников опорного напряжения и начальных условий.

В левой части поля в рамке с надписью «Входы» расположены входы постоянных сопротивлений, блоков постоянных сопротивлений и четырех конденсаторов. Выходы сопротивлений и конденсаторов расположены около сеточных входов УПТ. Выходы УПТ расположены в левой части поля в рамке с надписью «Выходы». Усилители $У_5, У_6, У_7, У_8, У_{15}, У_{16}$ тумблерами включаются в режимы интегрирования или суммирования. В нижней части поля расположены гнезда нелинейных блоков $Б_1, Б_2, Б_3, Б_4$ для подсоединения их к выходному усилителю. Входы в блоки выведены в левой части около выходов УПТ. В правой части поля размещены элементы для сборки специальных нелинейных схем (подробно будет описано в 4.2.). К гнездам правой нижней части поля подключены входы интегрирующих усилителей для задания начальных условий и источники начальных условий. Внизу слева по кромке даны специальные входы регулируемых сопротивлений для настройки числовых значений коэффициентов. Внизу посередине имеются дополнительные выходы УПТ для



поле АВМ типа МН-7.

подключения к ним вольтметров V_1, V_2 и индикатора электронно-лучевого (ИЭЛ). Входные гнезда этих приборов расположены здесь же. Подробное знакомство с АВМ МН-7 производится в лабораторных условиях.

Глава 2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА АВМ

2.1. ОБЫКНОВЕННЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Как отмечалось выше, АВМ наиболее часто применяются для решения обыкновенных дифференциальных уравнений, которые делятся на линейные и нелинейные. В линейных уравнениях переменные и их производные могут быть только в первой степени, а коэффициенты или постоянны, или являются функциями независимой переменной t . Приведем несколько типичных примеров линейных и нелинейных уравнений.

Линейные уравнения:

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

$$\frac{dx}{dt} - x \ln t = 30;$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 3 \frac{dx}{dt} - 2x = 0.$$

Нелинейные уравнения:

$$\frac{dx}{dt} + \sqrt{|x|} = 0;$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + x = \operatorname{tg} t;$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{t} \cdot \frac{dx}{dt} + \sin x = 0.$$

Линейные и нелинейные дифференциальные уравнения могут иметь постоянную и переменную структуру. Уравнения, коэффициенты которых постоянны или изменяются непрерывно в функции времени или произвольного аргумента, будем называть уравнениями постоянной структуры. Например,

$$\begin{aligned} a_n(t) \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + \\ + a_1(t) \frac{dx}{dt} + a_0(t) x = b_0. \end{aligned}$$

Уравнения, коэффициенты которых имеют разрывы первого рода, отнесем к уравнениям переменной структуры. С их помощью описываются переходные процессы в объектах, протекающих в несколько этапов.

Известны три разновидности написания уравнений переменной структуры: дифференциально-табличные (с применением функций переключения); с использованием гибридной логики; с введением во временную область логических функций, симметричных и несимметричных пороговых функций [8]. В соответствии с рекомендациями [8] в данной работе применена третья разновидность.

В 1.5. было введено определение несимметричной пороговой функции sg . Дополним его отрицанием пороговой функции

$$\overline{sg} x = \begin{cases} 0 & \text{при } x \geq 0 \\ 1 & \text{при } x < 0 \end{cases}$$

и симметричной пороговой функции

$$\text{sign } x = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0 \\ 0 & \text{при } x = 0. \\ -1 & \text{при } x < 0 \end{cases}$$

Приведем пример дифференциального уравнения переменной структуры

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} sg \frac{dx}{dt} + \dots + a_1 \text{sign} \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_0.$$

2.2. ПРИВЕДЕНИЕ УРАВНЕНИЙ К ВИДУ, УДОБНОМУ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Решение задачи на АВМ состоит из программирования и подготовки АВМ к расчетам.

Программирование задачи для АВМ выполняется в несколько этапов [9]:

- подготовка системы уравнений и ее предварительный анализ;
- приведение уравнений к виду, удобному для аналогового моделирования;
- расчет масштабов и коэффициентов передачи блоков;
- составление таблиц для настройки функциональных преобразователей;
- составление структурной схемы модели;
- подготовка данных для контроля правильности решения задачи;
- корректировка масштабов и схем соединений по результатам пробных решений.

При предварительном анализе задачи составляется задание на программирование, включающее следующие положения: систему дифференциальных уравнений; n начальных условий при n -м порядке системы уравнений; коэффициенты, графики, таблицы функций и рекомендации по их аппроксимации; временной интервал решения задачи; ориентировочные значения предельных значений переменных для расчета масштабов; перечень выходных переменных, возможный их частотный диапазон и желаемый способ регистрации.

В процессе подготовки уравнений к решению производится замена реальных переменных на машинные с введением масштабов по переменным и времени [5].

Если в исходных уравнениях сделать замену переменных вида $U_x = m_x x$, то получатся уравнения, в которых переменная x в масштабе m_x заменена машинной переменной U_x . Величину m_x называют масштабным множителем. Машинные переменные целесообразно измерять в относительных единицах (1 о.е. = 100 В). Так как переменная U_x в АВМ будет представлена в относительных единицах, то максимальное значение m_x определяется соотношением $1/|x_{\max}|$. При выборе наибольших значений масштабных множителей повышается точность решения задачи.

Решение в АВМ протекает в машинном времени, которое может быть больше или меньше времени протекания процесса в исследуемом объекте. Следует иметь в виду, что при введении масштаба времени практически исключается возможность сопряжения АВМ с реальной аппаратурой.

Возьмем новую переменную $\tau = m_t t$. При $m_t > 1$ процесс в модели происходит медленнее, чем в объекте, при $m_t < 1$ — быстрее. Величина m_t называется масштабом времени.

В общем случае исходная система дифференциальных уравнений

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

после замены переменных принимает вид

$$\frac{m_t}{m_{x_i}} \cdot \frac{dU_{x_i}}{d\tau} = f_i \left(\frac{U_{x_1}}{m_{x_1}}, \frac{U_{x_2}}{m_{x_2}}, \dots, \frac{U_{x_n}}{m_{x_n}}, \frac{\tau}{m_t} \right).$$

В качестве примера возьмем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{10} \\ \frac{dy}{dt} &= a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{20} \\ \frac{dz}{dt} &= a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{30} \end{aligned} \right\}$$

Введя масштабные множители $m_x = 1/|x_{\max}|$, $m_y = 1/|y_{\max}|$, $m_z = 1/|z_{\max}|$, $m_t = \tau/t$, получим систему машинных уравнений

$$\frac{m_t}{m_x} \frac{U_x}{dt} = \frac{a_{11}}{m_x} U_x + \frac{a_{12}}{m_y} U_y + \frac{a_{13}}{m_z} U_z + a_{10};$$

$$\frac{m_t}{m_y} \frac{U_y}{dt} = \frac{a_{21}}{m_x} U_x + \frac{a_{22}}{m_y} U_y + \frac{a_{23}}{m_z} U_z + a_{20};$$

$$\frac{m_t}{m_z} \frac{U_z}{dt} = \frac{a_{31}}{m_x} U_x + \frac{a_{32}}{m_y} U_y + \frac{a_{33}}{m_z} U_z + a_{30}.$$

Подбирая m_i с учетом соотношения $m_x = 1/|x_{\max}|$ и аппаратурных ограничений $k_{i\min} \leq k_i \leq k_{i\max}$ (например, для МН-7 $k_{i\min} = 0,05$; $k_{i\max} = 10$), можно получить удобную для набора на АВМ систему уравнений. Точное решение задачи оптимизации масштабных множителей производится методами линейного и нелинейного программирования и пока не получило широкого распространения из-за сложности расчетов, выполняемых на ЦВМ [10].

После масштабирования уравнения приводятся к форме, облегчающей составление схемы аналоговой модели через преобразование к канонической (нормальной) форме; преобразования, имеющие целью увеличение точности расчетов, уменьшение объема оборудования и т. п.; преобразование к структурному виду; преобразование нелинейных функций и их аппроксимацию; составление таблиц для настройки функциональных блоков.

2.3. СОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ МОДЕЛЕЙ ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

После того, как введены масштабы и дифференциальные уравнения приведены к виду, удобному для моделирования, составляется структурная схема модели. Структурная схема составляется из решающих элементов АВМ, условные обозначения которых даны в приложении.

Структурная схема дифференциального уравнения первой степени, например, такого как

$$\frac{dx}{dt} = 0,5,$$

составляется довольно просто.

Как было сказано в 1.2., если на вход интегратора подать напряжение, пропорциональное производной dx/dt , то на выходе получим напряжение, пропорциональное самой переменной. Согласно заданному уравнению производная постоянна и равна 0,5. Следовательно, подав на вход интегратора напряжение, пропорциональное 0,5 (50 В), получим на выходе искомое решение $x(t)$ для нулевых начальных условий.

Если начальные условия отличны от нулевых, то на интегратор необходимо перед началом решения подать напряжение, пропорциональное начальному условию. Таким образом, структурная схема модели имеет вид, показанный на рис. 10.

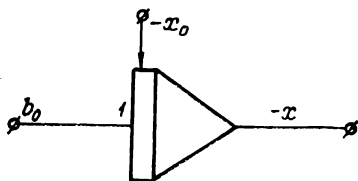


Рис. 10. Структурная схема решения уравнения первого порядка.

При составлении структурной схемы решения необходимо помнить, что все решающие усилители изменяют знак входной функции на противоположный.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Рассмотрим случай составления структурной схемы модели решения дифференциального уравнения второго порядка

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x = b_0.$$

В качестве первого шага разрешим уравнение относительно производной высшего порядка

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -a_1 \frac{dx}{dt} - a_0x + b_0.$$

Учитывая, что каждый интегратор понижает порядок производной на единицу, соединим последовательно достаточное число интегрирующих усилителей для получения производной нулевого порядка (рис. 11). Таким образом, можно получить все

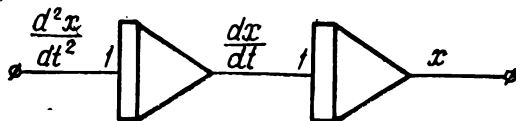


Рис. 11. Структурная схема получения производной нулевого порядка.

производные и переменную x , которые входят в правую часть преобразованного уравнения.

На следующем шаге сконструируем из решающих элементов А.В.М. схему, соответствующую правой части преобразованного уравнения, путем умножения каждой из этих производных и переменной x на соответствующие коэффициенты с добавлением

напряжения, пропорционального b_0 . В результате получим схему, изображенную на рис. 12.

На выходе усилителя 5 получается значение второй производной, которое должно быть подано на вход интегратора 1. Следова-

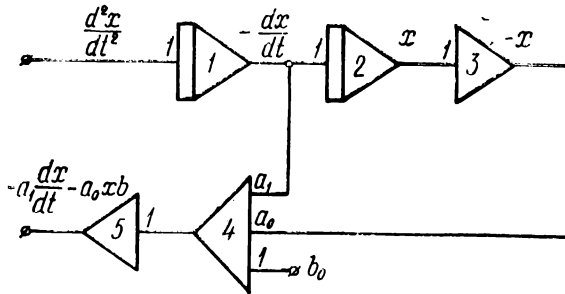


Рис. 12. Структурная схема формирования правой части преобразованного дифференциального уравнения второго порядка.

тельно, если соединить эти точки, получится схема для решения уравнения. Чтобы закончить составление схемы модели, необходимо задать начальные условия на интеграторы 1 и 2. Окон-

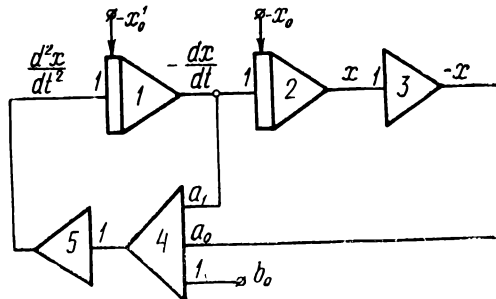


Рис. 13. Структурная схема решения дифференциального уравнения второго порядка.

чательный вид структурной схемы модели решения исходного дифференциального уравнения второго порядка показан на рис. 13.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Рассмотрим пример составления структурной схемы для решения системы линейных дифференциальных уравнений второго порядка

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + b_0 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -a_{21}x_1 - a_{22}x_2 \end{aligned} \right\}$$

Так как оба уравнения уже разрешены относительно старших производных dx_1/dt и dx_2/dt , приступаем сразу ко второму шагу. Если предположить, что мы имеем обе производные, то с помощью интеграторов можно найти зависимые переменные x_1 и x_2 , которые входят в правые части системы уравнений (рис. 14).

На следующем шаге умножим каждую из этих переменных на соответствующие коэффициенты, затем сложим полученные результаты и для первого уравнения добавим постоянную b_0 . В результате получим схему расчета правых частей, то есть про-

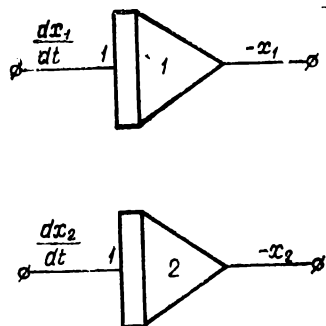


Рис. 14. Структурная схема получения производных нулевого порядка.

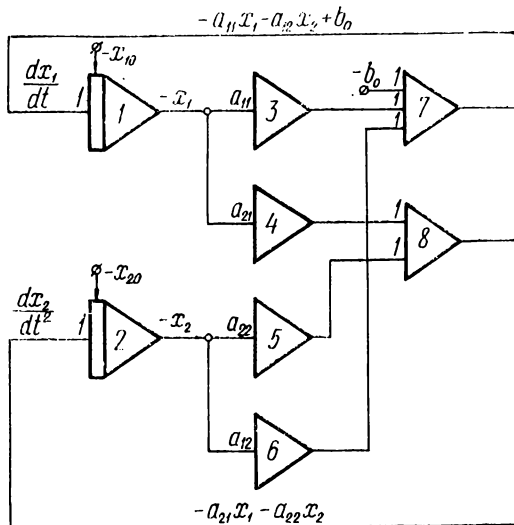


Рис. 15. Структурная схема решения системы дифференциальных уравнений второго порядка.

изводных dx_1/dt и dx_2/dt . На следующем шаге на интеграторы задаются начальные условия, если они не равны нулю.

Структурная схема модели решения системы дифференциальных уравнений второго порядка приведена на рис. 15.

Аналогичным образом составляются структурные схемы моделей для любых дифференциальных уравнений n -го порядка:

1. Каждое уравнение разрешается относительно производных высшего порядка.

2. На структурной схеме в соответствии с уравнениями изображается несколько цепочек последовательно соединенных интеграторов, общее число которых равно n -суммарному порядку дифференциальных уравнений.

3. Допустим, что мы располагаем производными высшего порядка и подаем их на входы первых интеграторов. Тогда на выходах интеграторов мы будем иметь зависимые переменные и их $(n-1)$ -е производные.

4. Из выходных величин этих интеграторов и напряжения, пропорционального внешнему возмущению, образуются выражения, равные производным высшего порядка.

5. Контур замыкается путем подачи этих величин на входы первых интеграторов.

6. На соответствующие интеграторы задаются начальные условия.

Рассмотрим применение этой методикки к составлению структурной схемы решения уравнения третьего порядка:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{d^2x_2}{dt^2} + \sin t \frac{dx_2}{dt} + e^{-t}x_1 &= b_0 \end{aligned} \right\}.$$

Шаг 1. Разрешаем уравнение относительно старшей производной

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{d^2x_2}{dt^2} &= -\sin t \frac{dx_2}{dt} - e^{-t}x_1 + b_0 \end{aligned} \right\}.$$

Шаг 2. Рисуем структурную схему из двух цепочек: один интегратор для первого уравнения и два последовательно соединенных интегратора для второго уравнения.

Шаг 3. Предположим, что на вход интеграторов 1 и 2 подаются величины dx_1/dt и d^2x_2/dt^2 , обозначим выходы интеграторов соответствующим образом.

Шаг 4. Образует члены правых частей преобразованных уравнений. Считаем, что мы уже имеем напряжения, изменяющиеся по законам $\sin t$ и e^{-t} (моделирование таких функций будет рассмотрено позднее).

Шаг 5. Задаем начальные условия.

Структурная схема модели расчета системы уравнений показана на рис. 16.

Часто при написании сложных структурных схем пользуются строчным видом записи. На рис. 17 показана строчная структурная схема, соответствующая схеме предыдущего рисунка, причем входы первых в строке решающих блоков обозначены цифровыми индексами тех усилителей, с которыми они электрически соединены.

При строчной записи структурных схем теряется наглядность взаимосвязей отдельных блоков, однако схема становится более удобной для набора и проверки ее функционирования на АВМ.

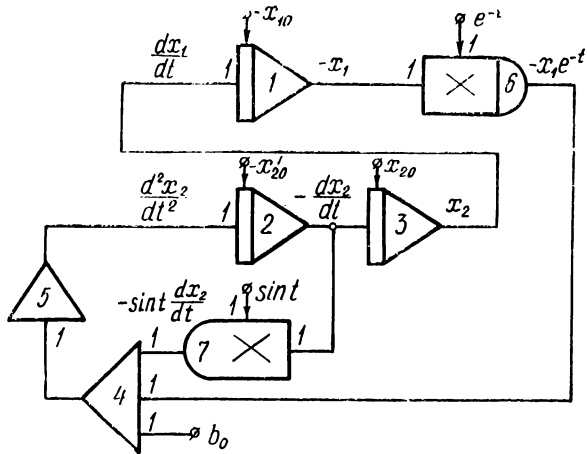


Рис. 16. Структурная схема решения системы дифференциальных уравнений третьего порядка.

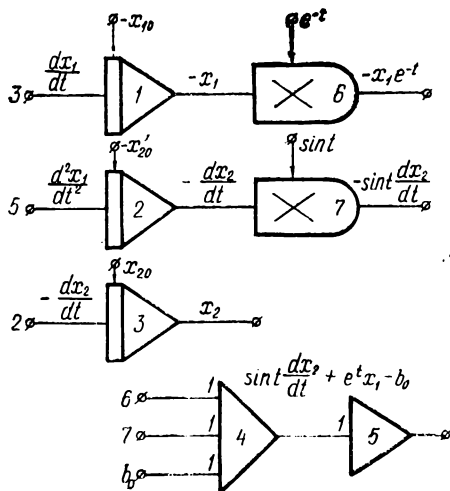


Рис. 17. Строчная запись структурной схемы решения системы дифференциальных уравнений третьего порядка.

2.4. УРОВНИ РАЗРАБОТКИ СХЕМ МОДЕЛЕЙ

При моделировании уравнений на АВМ обычно используются три уровня разработки схем моделей: функциональный, структурный, принципиальный, отличающиеся степенью детализации информации об аналоговой модели.

Общепринятые условные обозначения отдельных блоков моделей на различных уровнях даны в приложении.

Для иллюстрации представим на различных уровнях модели решения дифференциального уравнения

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -a_1 \frac{dx}{dt} - a_0x + b_0$$

с начальными условиями $x(0) = x_0$ и $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = x'_0$.

На рис. 18, а показана функциональная схема модели решения. Она отражает только взаимосвязь между отдельными операциями. Обычно функциональными схемами пользуются при моделировании сложных уравнений, когда основное внимание уделяется правильному конструированию взаимосвязей.

На рис. 18, б показана схема той же задачи, но уже в структурном представлении. Структурная схема, как и ранее рассмотренная функциональная, не ориентирована на какую-либо конкретную АВМ. Она детализируется до отдельных операционных блоков абстрактной АВМ с учетом того, что каждый решающий усилитель изменяет знак функции на противоположный.

На структурном уровне обычно осуществляются преобразования схем с целью получения наилучшей структурной схемы. В понятие «наилучшая структурная схема» может вкладываться разноеобразный смысл в зависимости от решаемой задачи и типа АВМ, на которой производится решение. Но все же всегда при оценке качества структурной схемы предпочтение отдается той схеме, которая при прочих равных условиях требует наименьших затрат труда и времени на подготовку АВМ к решению. Обычно такая схема содержит наименьшее количество операционных блоков. Кроме того, уменьшение числа операционных блоков повышает точность расчетов, так как каждый решающий усилитель работает с погрешностью.

Схема рис. 18, б может быть преобразована с учетом возможности одновременного суммирования и интегрирования напряжений интегратором 1, изображенным на рис. 18, в. Единственным недостатком такой замены является отсутствие возможности наблюдать вторую производную. Она в этом случае не будет выходом ни одного из решающих блоков. Поэтому при уменьшении количества операционных блоков происходит потеря информации, объем которой должен соответствовать нуждам задуманного исследования.

На структурном уровне разработки модели производится исследование устойчивости исходной системы дифференциальных уравнений. Характерной особенностью устойчивых систем

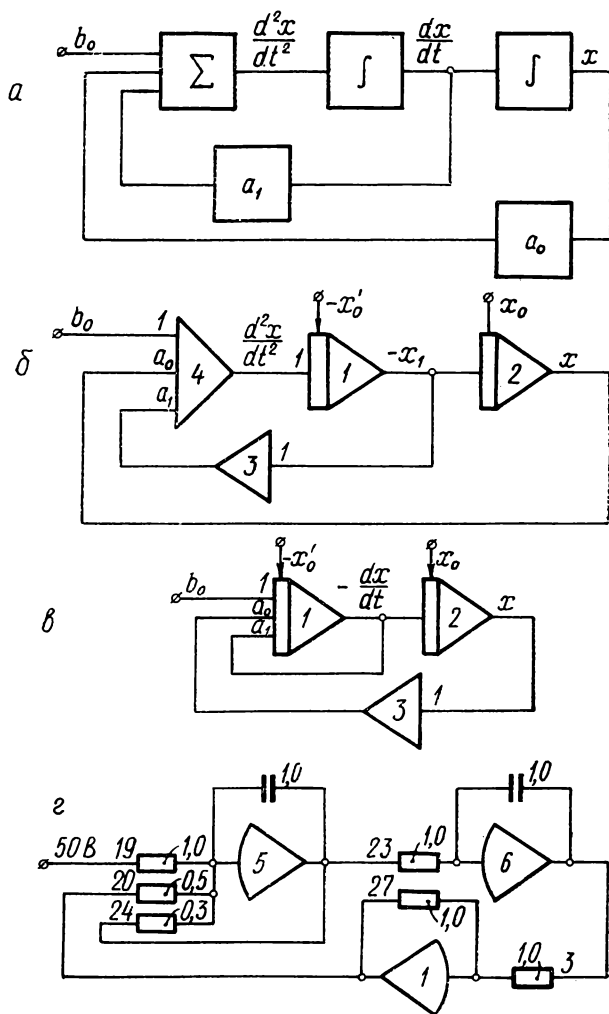


Рис. 18. Представление схемы решения на функциональном (а), структурном (б, в), принципиальном (г) уровнях.

является наличие нечетного числа решающих усилителей в любом замкнутом контуре. Например, решение дифференциального уравнения устойчиво (см. схему рис. 18, б), так как существует два замкнутых контура с тремя решающими усилителями


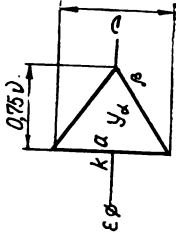
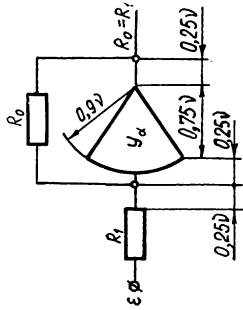
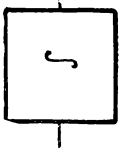
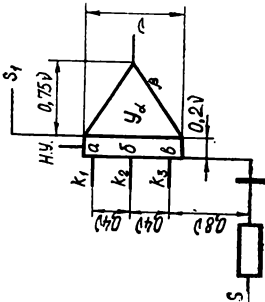
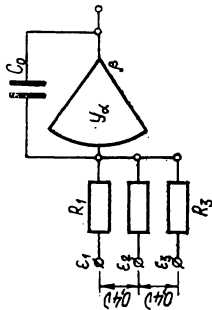
(4—1—3 и 4—1—2). Любые правильно проведенные преобразования структурной схемы не нарушают это условие (см. рис. 18, в), поскольку свойство устойчивости присуще самому дифференциальному уравнению. В то же время система дифференциальных уравнений со схемой, изображенной на рис. 14, неустойчива, так как есть контур с четным числом решающих усилителей (1—4—8—2—6—7). Следовательно, эта система дифференциальных уравнений не имеет единственного решения. Если набрать на аналоговой модели эту схему, то после пуска напряжения на усилителях превысят номинальное, и усилители «уйдут в режим перегрузки».

На рис. 18, г показана принципиальная схема модели, которая ориентирована на АВМ МН-7. Эта схема отражает специфические особенности соединения блоков, присущие АВМ данного типа. На этих схемах проставлены номера использованных входов блоков в соответствии с наборным полем конкретной АВМ, переменные представлены в виде машинных переменных — электрических напряжений. На принципиальных схемах проставляются числовые значения коэффициентов передачи операционных блоков и потенциометров с учетом выбранных масштабов. Линии принципиальной схемы соответствуют электрическим проводникам.

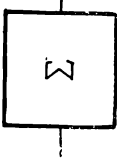
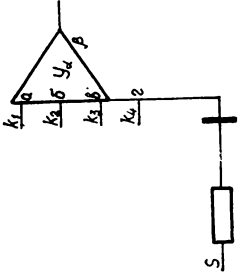
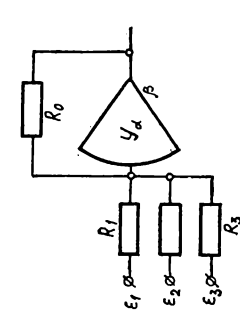
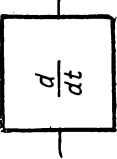
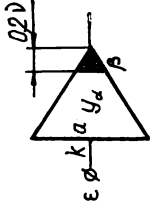
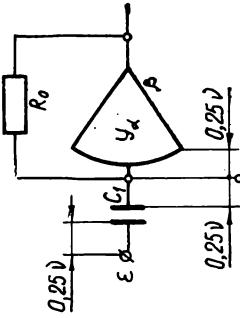


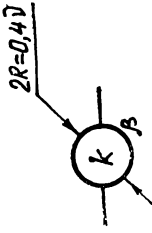
ЛИТЕРАТУРА

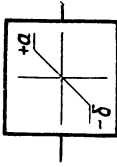
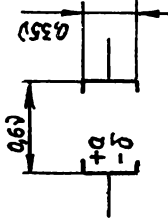
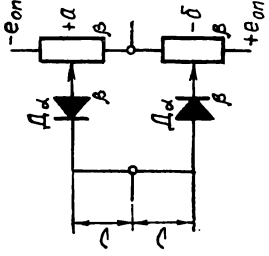
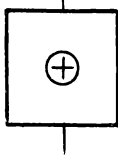
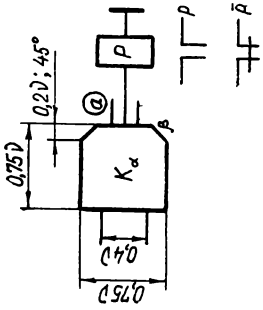
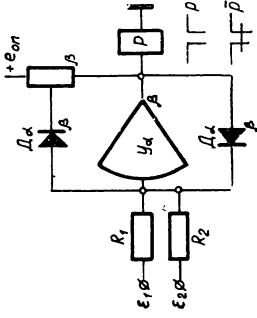
1. **Роткоп Л. Л.** Статистические методы исследования на электронных моделях. М., «Энергия», 1967.
 2. **Изделия радиопромышленности**, т. IV. М., изд. НИИЭИ, 1966.
 3. **Грубов В. И., Кирдак В. С.** Электронные вычислительные машины и моделирующие устройства. Киев, «Наукова Думка», 1969.
 4. **Ушаков В. Б., Петров Г. М. и др.** Электронная нелинейная аналоговая вычислительная машина МН-14. М., «Машиностроение», 1965.
 5. **Гаряева А. А., Горшков А. Ф. и др.** Математические машины и программирование, ч. 1. Свердловск, изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1965.
 6. **Прагер И. Л.** Электронные аналоговые вычислительные машины. М., «Машиностроение», 1971.
 7. **Лабораторные работы по курсу «Вычислительные машины непрерывного действия».** Под ред. А. Н. Лебедева, В. Б. Смолова. М., «Высшая школа», 1965
 8. **Ananiev G. I., Zhuk M. G. et. al.** Application of analogue digital and hybrid computes to investigation of dynamical performance of the electro-mechanical systems with variable structure including thyristor controlled induction motors and elastic members. Symposium AICA «Sumulation of complex systems». Tokyo, 1971.
 9. **Витенберг И. М., Варюха А. М. и др.** Методические рекомендации по программированию АВМ. М., изд. НИИСчетмаш, 1968.
 10. **Бабушкин Ф. М.** — «Автоматика и телемеханика», 1971, № 5.
-

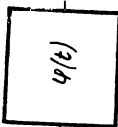
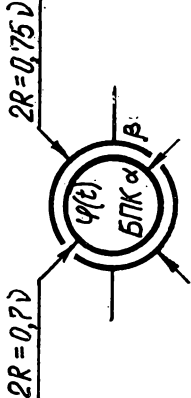
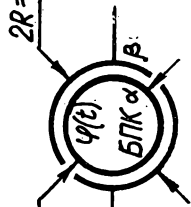
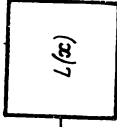
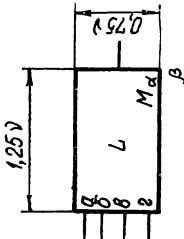
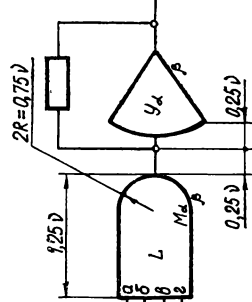
Условные обозначения для АВМ

Уровни моделирования		Принятые обозначения	
Наименование	Функциональный		Структурный
Масштабный усилитель			
Интегратор			

v — базовый размер (на пример, 2 см);
 ϵ — номер зажима;
 k — коэффициент передачи;
 a — номер входа;
 α — порядковый номер блока;
 β — идентификатор блока в АВМ;
 s — дополнительный вход;
 s_1 — вывод сетки базы усилителя;
 n, y — обозначение начального значения переменной;

Уровни моделирования				
Наименование	Функциональный	Структурный	Принципиальный	
Сумматор				<p>Принятые обозначения</p> <p>Σ — символ суммирования;</p> <p>$\frac{d}{dt}$ — символ дифференцирования;</p>
Дифференцирующий усилитель				
Блок постоянного коэффициента эффциента				

Уровни моделирования		Принятые обозначения		
Наименование	Функциональный		Структурный	Принципальный
Схема ограничения				<p>a, b—напряжения ус- тановки схемы ограни- чения с соответст- вующими знаками, В; $e_{оп}$—опорное напряже- ние, В;</p>
Компаратор (операционное реле)				<p>P—катушка реле; p, \bar{p}—нормально от- крытые и нормально закрытые контакты; a—основание системы счисления (в дан- ном случае $a : \equiv 1$).</p>

Наименование	Уровни моделирования			Принятые обозначения
	Функциональный	Структурный	Принципиальный	
Блок переменного коэффициента				$\varphi(t)$ — идентификатор программной функции времени;
Блок нелинейной функции				L — идентификатор операции (например, $L : = \cos x$); M — идентификатор операции в кодах АВМ (например, $M : = \text{БП}$);

Примечание: Выбор величины v должен быть согласован с выбором сопротивлений и конденсаторов (ГОСТ 7624—67); при малой величине v допускается в виде: ,534 вместо 0,534.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Глава 1. Устройство и принцип действия АВМ	5
1.1. Основные положения	5
1.2. Режимы работы операционного усилителя	7
1.3. Блок постоянных коэффициентов	10
1.4. Блок переменных коэффициентов	11
1.5. Функциональный блок	13
1.6. Блок перемножения	15
1.7. Блок деления и извлечения квадратного корня	17
1.8. Коммутационное поле МН-7	18
Глава 2. Методика решения задач на АВМ	20
2.1. Обыкновенные дифференциальные уравнения	20
2.2. Приведение уравнений к виду, удобному для моделирования	21
2.3. Составление структурных схем моделей линейных дифференциальных уравнений	23
2.4. Уровни разработки схем моделей	29
Литература	32
Приложение. Условные обозначения для АВМ	33

*Анатолий Всеволодович ВИНОГРАДОВ
Виктор Михайлович КИРПИЧНИКОВ
Владимир Владимирович КОВАЛЕВ
Александр Николаевич КОВШОВ*

РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ НА АНАЛОГОВЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Часть 1

Учебное пособие

Научный редактор доц. канд. техн. наук **В. Е. Катюхин**

Редактор издательства *Д. И. Макрушина*

Технический редактор *Н. М. Олерская*

Корректор *И. К. Андриевских*

620002, Свердловск, УПИ им. С. М. Кирова,
главный учебный корпус,
редакционно-издательский отдел

НС16435	Сдано в набор 8/IV 1976 г.	Подписано к печати 8/IV 1976 г.
Формат 60×90 ¹ / ₁₆	Печ. л. 2,5	Уч.-изд. л. 2,958
Цена 21 коп.	Тираж 1500	Заказ 172

Цех № 1 объединения «Полиграфист», г. Свердловск, ул. М.-Сибиряка, 145

Цена 21 коп.