

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

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

А. Д. БОЙКОВ, В. Д. ЗАКАБЛУКОВСКИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МОДЕЛИРУЮЩИХ МАШИН**

Учебное пособие по курсу
„Теория автоматического управления“

Под общей редакцией доцента, кандидата технических наук
А. Д. Бойкова

Пособие предназначено для студентов, изучающих теорию автоматического управления, а также может быть использовано специалистами, работающими в области проектирования и исследования систем управления.

Составление структурной схемы по дифференциальному уравнению процесса позволяет использовать некоторые особенности структурного представления систем автоматического управления (САУ) при выборе масштаба времени и при масштабировании переменных величин, что в отдельных случаях значительно упрощает исследование многих физических процессов.

В книге рассматриваются вопросы анализа САУ методом ортогональных разложений, исследование САУ методом логарифмических частотных характеристик, коррекция систем. Рассмотрены вопросы исследования САУ на электронных моделирующих машинах (ЭММ) в комплексе с реальной аппаратурой и получения передаточных функций сложных систем методом графов.

Приводятся краткие технические данные некоторых наиболее распространенных ЭММ и описание работы на них по составлению аналоговых схем и снятию решений.

*Бойков Александр Дмитриевич,
Закаблукowski Виктор Дмитриевич*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРУЮЩИХ МАШИН

Учебное пособие

Отв. редактор инж. *С. А. Озерная*
Редактор *И. С. Кольшова*
Технический редактор *Н. М. Каленюк*
Корректор *Н. П. Гордеева*

Сдано в набор 7/IX 1971 г. Подп. в печ. 31/XII 1971 г.
ЕО00461. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Объем 5,5 печ. л.
Тираж 2000 экз. Цена 30 коп.

Куйбышевский авиационный институт им. С. П. Королева,
г. Куйбышев, обл., ул. Молодогвардейская, 151.

Областная тип. им. Мяги, г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.
Заказ № 5460.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время при проектировании и исследовании систем автоматического управления (САУ) широко используется аналоговая и дискретная вычислительная техника.

Правильное сочетание графоаналитических методов исследования САУ и анализа систем с помощью электронных моделирующих машин (ЭММ) и электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ) позволяет провести исследование САУ с необходимым качеством и требуемой точностью. При этом необходимо учитывать особенности исследования САУ на ЭММ и ЭЦВМ.

Принципы построения аналоговых схем и исследование САУ с помощью ЭММ основаны на соответствии дифференциальных уравнений исследуемой САУ и аналоговой схемы другой физической природы, набираемой на ЭММ. При исследовании САУ на ЭММ моделируется явление (или подобный ему процесс); исследование САУ на ЭЦВМ сводится к численному решению дифференциального уравнения САУ, то есть процесс подмещается некоторой искусственной схемой, с определенной точностью описывающей процесс. Постановка задачи исследования САУ на ЭЦВМ предусматривает наличие ошибки; кроме того, заменяя непрерывный процесс действиями с дискретными числами, можно судить только о дискретных значениях физических величин в определенные моменты. О характере же изменения между этими моментами можно судить по соответствующим аппроксимациям. Исследование САУ на ЭММ принципиально свободно от указанных недостатков. Но при практическом исследовании недостатки анализа САУ с использованием ЭЦВМ можно свести к минимуму за счет большого быстродействия современных цифровых машин. С другой стороны, на современных ЭММ трудно воспроизвести физическое явление в чистом виде без влияния побочных факторов. При необходимости получения результата на ЭММ в его количественных выражениях неизбежны ошибки измерения. Исследование САУ на ЭММ имеет вполне определенную для данной моделирующей установки погрешность. За счет увеличения времени расчета при исследовании САУ на любой ЭЦВМ можно получить результат с заданной степенью точности.

При анализе САУ с использованием ЭММ накладывается ограничение на порядок дифференциального уравнения САУ в соответствии с количеством решающих элементов конкретной ЭММ, используемых для составления аналоговой схемы. Исследования на ЭЦВМ систем автоматического управления, описываемых уравнениями высоких порядков, требует лишь большего времени расчета.

Проведению исследования САУ на ЭММ и ЭЦВМ должен предшествовать анализ системы по логарифмическим частотным характеристикам (ЛЧХ) или другими методами с целью определения устойчивости САУ, ориентировочных значений параметров коррекции и выбора масштаба времени для расчета коэффициентов аналоговой схемы на ЭММ.

Вторым этапом исследования является составление аналоговой схемы САУ и окончательный выбор параметров коррекции системы на ЭММ. При недостаточном количестве решающих элементов данной моделирующей машины возможно соединение нескольких ЭММ с тем, чтобы общее количество решающих элементов позволило собрать аналоговую схему САУ. Применение ЭММ позволяет проанализировать САУ в комплексе с реально изготовленными элементами.

Для более точного анализа САУ с выбранными параметрами, а также для анализа САУ высокого порядка, если невозможно составить аналоговую схему на имеющихся ЭММ, целесообразно использовать ЭЦВМ.

Учебное пособие состоит из четырех глав и трех приложений. В каждой главе соблюдается своя нумерация параграфов и рисунков, например, § 4. 1 относится к главе IV, рис. 1—19 помещен в главе 1, а рис. ПЗ—13 — в приложении 3.

Глава I. СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ САУ

§ 1.1. Метод структурных преобразований

Структурные преобразования САУ производятся при построении логарифмических частотных характеристик системы с целью привести все соединения элементов в системе к трем типовым формам связи (последовательному, встречно-параллельному и согласно-параллельному соединениям), для которых в § 2.2. рассматривается построение ЛЧХ с использованием номограмм.

Для составления аналоговой схемы набора САУ на ЭММ по структурной схеме системы необходимо при помощи эквивалентных структурных преобразований сгруппировать дифференцирующие и форсирующие звенья с инерционными элементами САУ таким образом, чтобы преобразованная САУ представляла соединения звеньев, для которых имеются типовые схемы набора, приведенные в табл. 3—1.

Существуют определенные правила эквивалентных структурных преобразований. Исходная САУ и преобразованная система будут эквивалентны относительно входной и выходной величины в том случае, если математические зависимости выходной и входной величин обеих систем выражаются одними и теми же уравнениями. То же самое можно сказать о преобразовании отдельных участков САУ, если рассмотреть математические зависимости переменных, являющихся для данного участка системы входом и выходом.

Структурную схему можно рассматривать как форму записи системы дифференциальных уравнений САУ. Соответственно, структурные преобразования производятся согласно правилам преобразований системы дифференциальных уравнений. Между дифференциальными уравнениями (математическая запись САУ) и передаточными функциями (представление САУ в виде структурной схемы) существует однозначная зависимость. Критерием эквивалентности структурных преобразований системы или отдельного участка САУ является сохранение неизменной передаточной функции системы или преобразуемого участка САУ.

Рассмотрим последовательное соединение элементов (рис. 1—1). В качестве звеньев, входящих в такое соединение, могут быть как простые типовые элементы, так и сложные участки цепи, состоящие

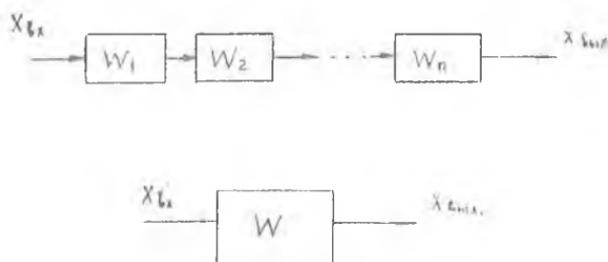


Рис. 1—1. Последовательное соединение элементов

из многих звеньев. Обозначим через W_1, W_2, \dots, W_n передаточные функции входящих в соединение элементов или сложных участков цепи. Такое соединение можно заменить одним звеном [2], передаточная функция которого определится как

$$W = W_1 W_2 \dots W_n.$$

Из этого выражения видно, что отдельные звенья или участки цепи последовательного соединения можно менять местами. Можно группировать отдельные участки последовательного соединения между собой (рис. 1—2). При этом характер зависимости выходной вели-

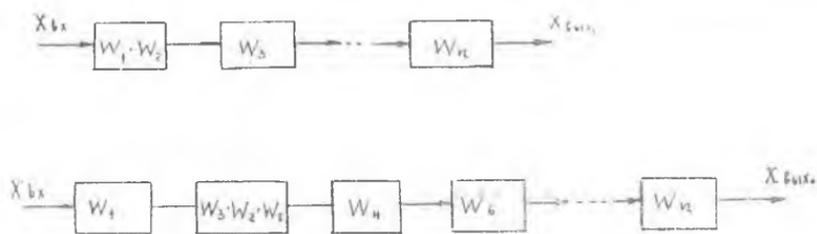


Рис. 1—2. Структурные преобразования при последовательном соединении элементов

чины соединения от входной не изменится. Промежуточные переменные могут измениться.

Встречно-параллельное соединение звеньев или участков цепи (рис. 1—3) можно привести к одному звену [2] с передаточной функцией

$$W = \frac{W_1}{1 + W_1 W_2}.$$

Для встречно-параллельного соединения с положительной обратной связью

$$W = \frac{W_1}{1 - W_1 W_2}$$

Если выходная величина непосредственно подается на элемент сравнения (рис. 1—4), то

$$W = \frac{W_1}{1 + W_1}$$

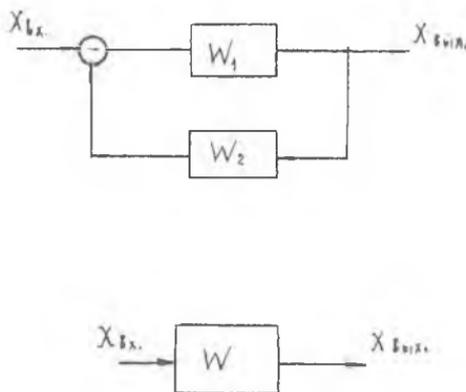


Рис. 1—3. Встречно-параллельное соединение элементов

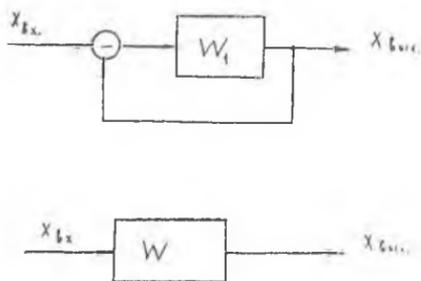


Рис. 1—4. Встречно-параллельное соединение элементов с единичной обратной связью

Любой замкнутый контур можно привести к виду, показанному на рис. 1—4, и последовательно соединенным звеньям.

Рассмотрим соединение двух звеньев (рис. 1—3)

$$W = \frac{W_1}{1 + W_1 W_2} = \frac{1}{W_2} \cdot \frac{W_1 W_2}{1 + W_1 W_2} = \frac{1}{W_2} \cdot \frac{W_3}{1 + W_3}$$

Эквивалентным преобразованием этого соединения будет соединение, показанное на рис. 1—5.

Согласно-параллельное соединение звеньев или участков цепи (рис. 1—6) приводится к одному звену [2] с передаточной функцией

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n$$

Рассмотрим согласно-параллельное соединение двух звеньев (рис. 1—7)

$$W = W_1 + W_2,$$

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_1 + W_2} = \frac{1}{W_2} \cdot \frac{W_2}{1 + \frac{W_2}{W_1}}$$

Из этого выражения видно, что обратной передаточной функцией согласно-параллельного соединения двух звеньев будет описываться система, изображенная на рис. 1—7. В результате последовательного суммирования по два звена согласно-параллельное соеди-

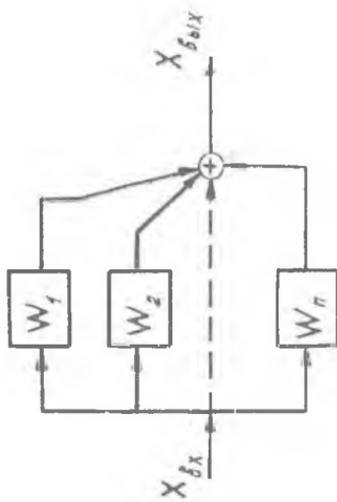
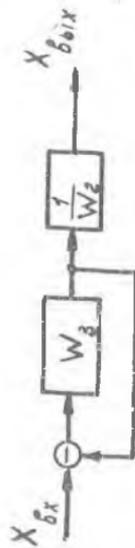
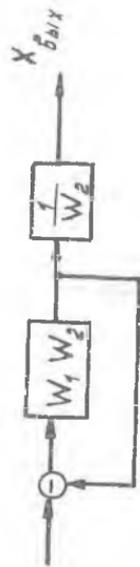
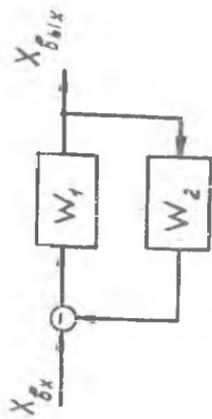


Рис. 1—5. Приведение к соединению с единичной обратной связью

Рис. 1—6. Согласно-параллельное соединение элементов

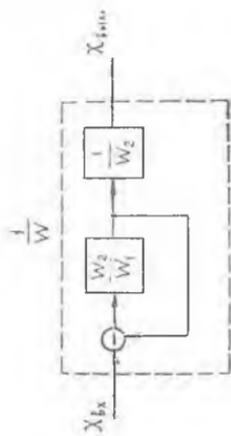
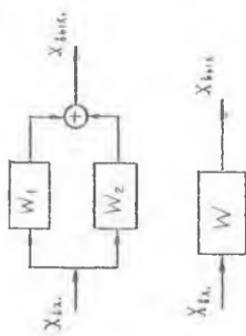


Рис. 1—7. Преобразование согласно параллельного соединения

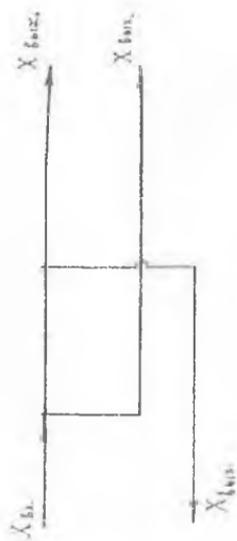


Рис. 1—8. Перестановка узла разветвления через другой узел разветвления

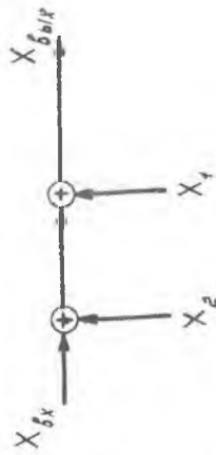
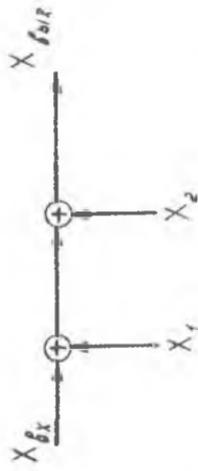


Рис. 1—19. Перестановка элемента сумматора через сумматор

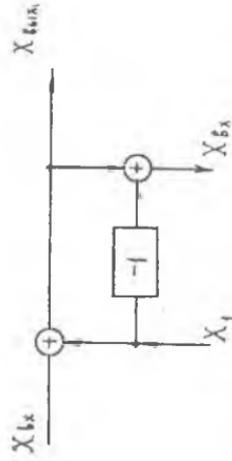
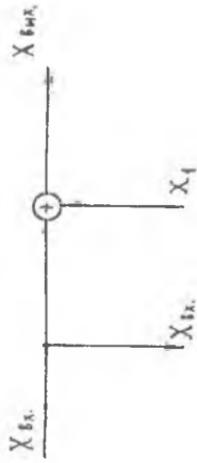


Рис. 1—10. Перестановка узла разветвления через сумматор

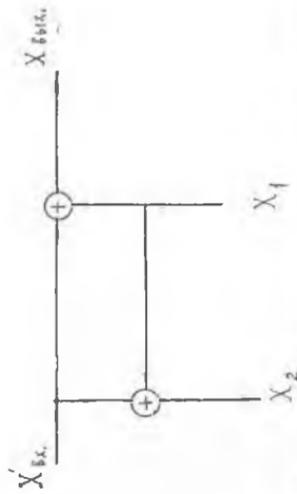
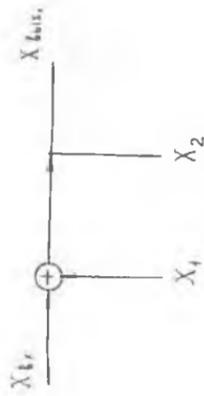


Рис. 1—11. Перестановка сумматора через узел разветвления

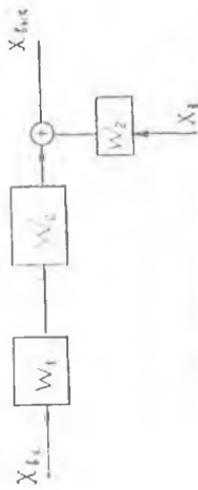
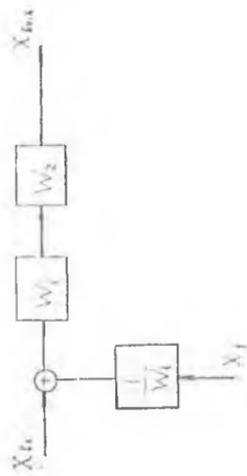
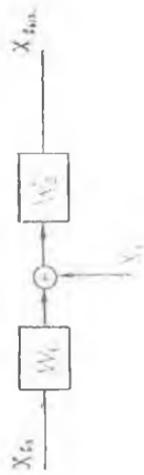


Рис. 1—12. Перестановка сумматора через элемент по ходу сигнала и против хода сигнала

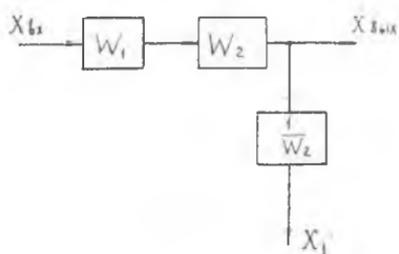
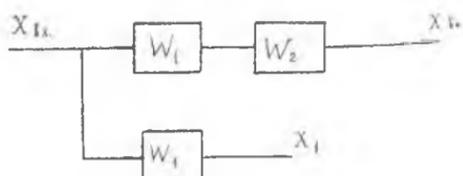
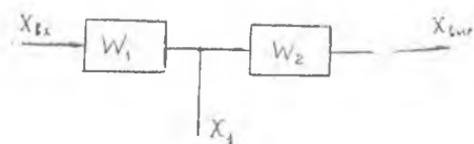


Рис. 1—13. Перестановка узла разветвления через элемент по ходу сигнала и против хода сигнала

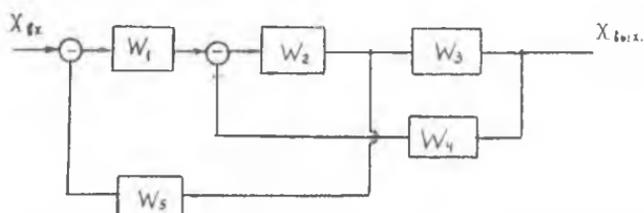


Рис. 1—14. Структурная схема с перекрестными обратными связями

любого количества звеньев можно свести к соединению двух звеньев или к одному звену.

Указанные выше преобразования имеют место при построении САУ систем автоматического управления и использовании номограмм.

В отдельных случаях при эквивалентных структурных преобразованиях необходимо избавиться от перекрестных обратных связей. Перестановка узла разветвления через другой узел разветвления,

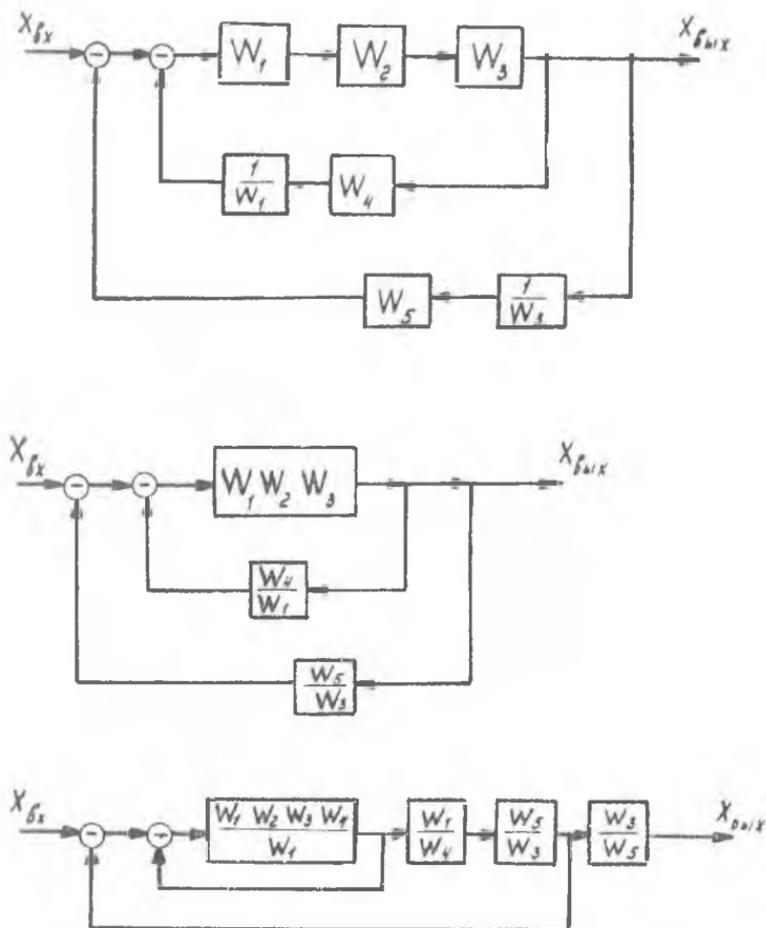


Рис. 1—15. Последовательность структурных преобразований САУ

перестановка элемента сумматора через сумматор, перестановка узла разветвления через сумматор, перестановка сумматора через узел разветвления, перестановка сумматора через элемент по ходу сигнала и против хода сигнала, перестановка узла разветвления через элемент по ходу сигнала и против хода сигнала показаны соответственно на рис. 1—8 :- 1—13.

В качестве примера рассмотрим САУ, изображенную на рис. 1—14. Система имеет перекрестные обратные связи. Последовательность структурных преобразований такой системы показана на рис. 1—15. Внутренний контур можно представить в виде звена с передаточной функцией

$$W_6 = \frac{W_2 W_3 W_4}{1 + W_2 W_3 W_4}.$$

Дальнейшие преобразования показаны на рис. 1—16.

$$W_{\text{раз}} = W_6 \frac{W_1 W_5}{W_4 W_3} = \frac{W_2 W_3 W_4 W_1 W_5}{(1 + W_2 W_3 W_4) W_4 W_3},$$

$$W_{\text{зам}} = \frac{W_{\text{раз}}}{1 + W_{\text{раз}}} \frac{W_3}{W_5}.$$

Общее правило свертывания структурной схемы заключается в следующем. Первоначально освобождаются от перекрестных свя-

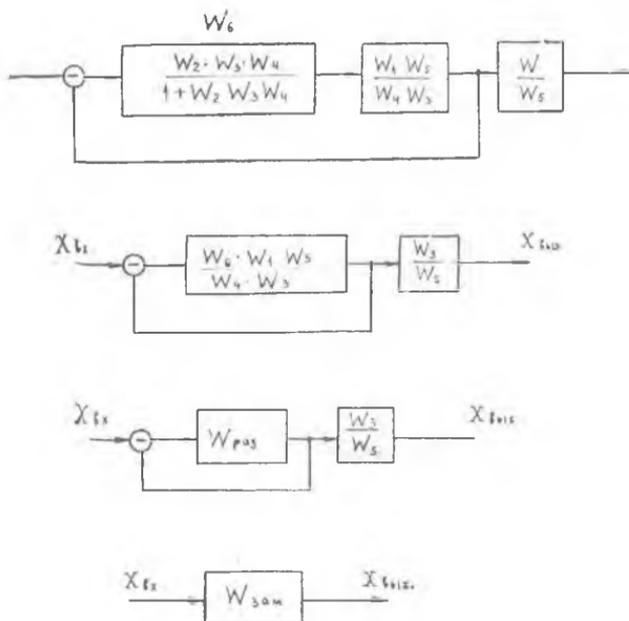
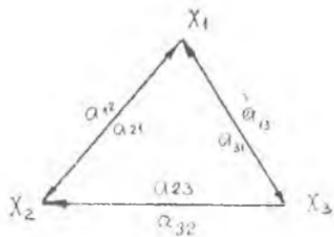
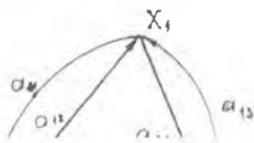


Рис. 1—16. Структурные преобразования САУ

зей. В результате этой операции контуры встречно- и согласно-параллельного соединений элементов последовательно охватывают друг друга. Затем, начиная с первого внутреннего контура, применяется правило свертывания структурной схемы при типовых связях между элементами.



яснения к методу графов

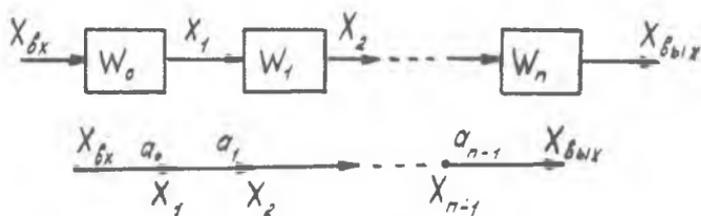


Рис. 1—18. Последовательное соединение элементов

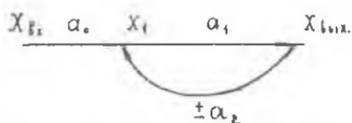
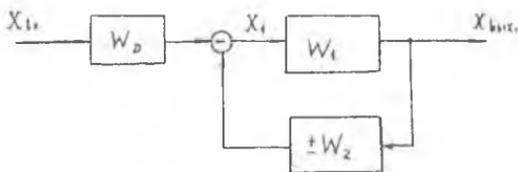


Рис. 1—19. Встречно-параллельное соединение элементов

§ 1. 2. Метод графов

Структурные преобразования с целью получения передаточных функций сложных многоконтурных многомерных систем управления удобнее производить методом графов. Сущность метода заключается в формализованном графическом изображении взаимосвязи сигналов САУ. Стрелками показывается направление воздействия, характер воздействия или влияния отражается через некоторый параметр a_{ij} , где j — индекс сигнала, оказывающего воздействие на сигнал i . В качестве параметра a_{ij} может быть представлен какой-либо постоянный или переменный коэффициент, а также определенная связь в операторной или дифференциальной форме (передаточная функция, импульсная переходная функция). Если связь сигналов X_1, X_2, X_3 можно выразить через параметры a_{ij}

$$X_1 = a_{12}X_2 + a_{13}X_3;$$

$$X_2 = a_{21}X_1 + a_{23}X_3;$$

$$X_3 = a_{31}X_1 + a_{32}X_2,$$

причем уравнения, выражающие эту связь, разрешены относительно X_1, X_2, X_3 , то графически это можно представить в виде графов, изображенных на рис. 1—17.

Рассмотрим основные правила графов, согласно которым будут производиться все дальнейшие преобразования. На рис. 1—18 показано последовательное соединение элементов САУ. Если представить передаточные функции в виде некоторых параметров, то есть

$$W_0 = \frac{X_1(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = a_0,$$

$$W_1 = \frac{X_2(p)}{X_1(p)} = a_1,$$

$$\dots$$

$$W_{\text{вых}} = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{n-1}(p)} = a_{n-1},$$

то такую зависимость можно представить в графическом виде (рис. 1—18), по которому чисто формально можно получить передаточную функцию соединения

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = X_{\text{вх}} a_0, \\ X_2 = X_1 a_1, \\ \dots \\ X_{\text{вых}} = X_{n-1} a_{n-1} \end{array} \right.$$

$$\frac{X_{\text{вых}}}{X_{\text{вх}}} = a_0 \prod_{i=1}^{n-1} a_i; \quad W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = W_0 \prod_{i=1}^{n-1} W_i.$$

На рис. 1—19 показано встречно-параллельное соединение элементов. На этом же рисунке показана графическая интерпретация такого рода зависимости сигналов, где под параметрами a_0, a_1, a_2 понимаются зависимости сигналов через передаточные функции. Передаточная функция соединения имеет вид:

$$\begin{cases} X_1 = a_0 X_{\text{вх}} \pm X_{\text{вых}} a_2, \\ X_{\text{вых}} = a_1 X_1, \end{cases}$$

$$\frac{X_{\text{вых}}}{X_{\text{вх}}} = \frac{a_0 a_1}{1 \mp a_1 a_2}, \quad W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = \frac{W_0 W_1}{1 \mp W_1 W_2}.$$

Для согласно-параллельного соединения элементов структурная схема и графическое изображение показано на рис. 1—20.

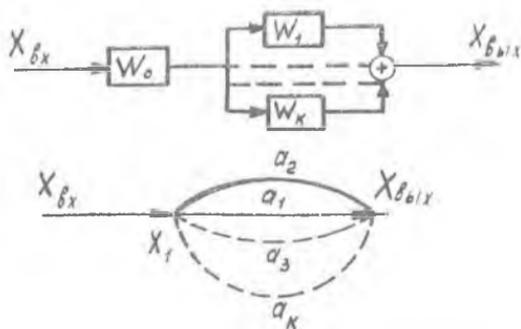


Рис. 1—20. Согласно-параллельное соединение элементов

$$\frac{X_{\text{вых}}}{X_{\text{вх}}} = a_0 \sum_{i=1}^k a_i, \quad W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = W_0 \sum_{i=1}^k W_i.$$

Рассмотренные правила позволяют чисто формально через графическое изображение взаимодействий сигналов непосредственно получить передаточные функции для любых сигналов, не производя структурных преобразований.

В качестве примера рассмотрим двухканальную систему (рис. 1—21). Если требуется получить передаточную функцию

$$W(p) = \frac{X_1(p)}{Y_1(p)} \quad \text{при } Y_2 = 0,$$

то, пользуясь методом структурных преобразований, необходимо последовательно преобразовать систему (рис. 1—22, 1—23). Метод графов позволяет значительно упростить получение передаточной функции. По исходной структурной схеме (рис. 1—21) составляется непосредственно графическое изображение взаимодействия сигналов в системе (рис. 1—24). Затем, чисто формально, пользуясь вы-

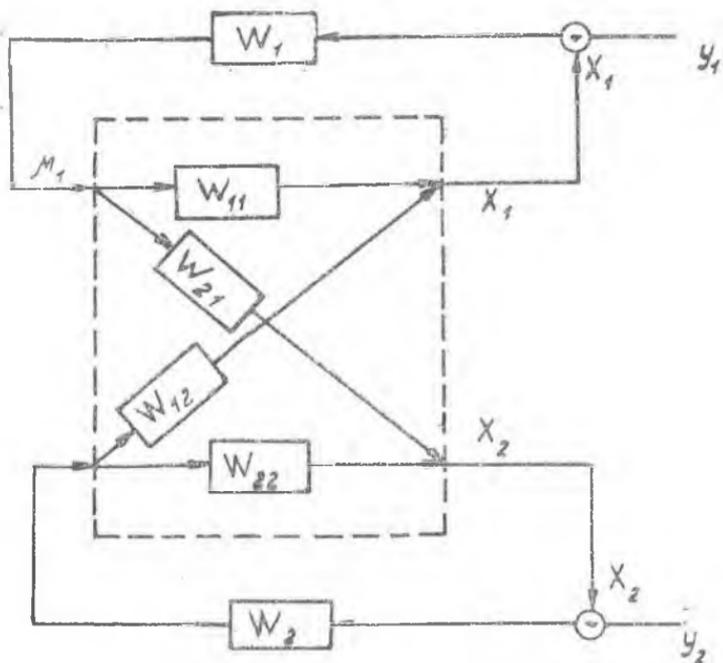


Рис. 1—21. Двухканальная система автоматического управления

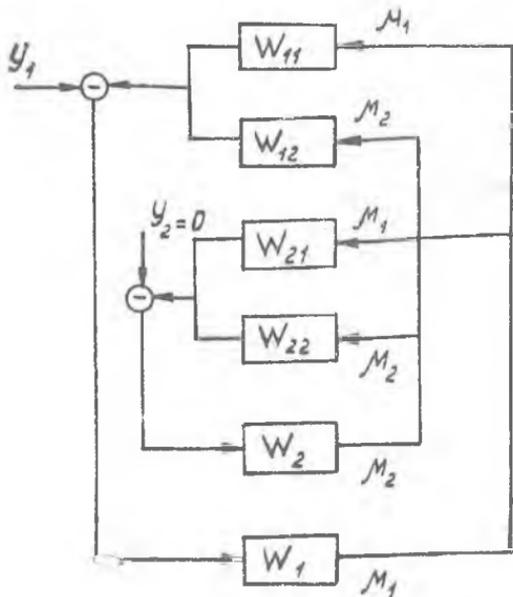


Рис. 1—22. Структурное преобразование двухканальной САУ

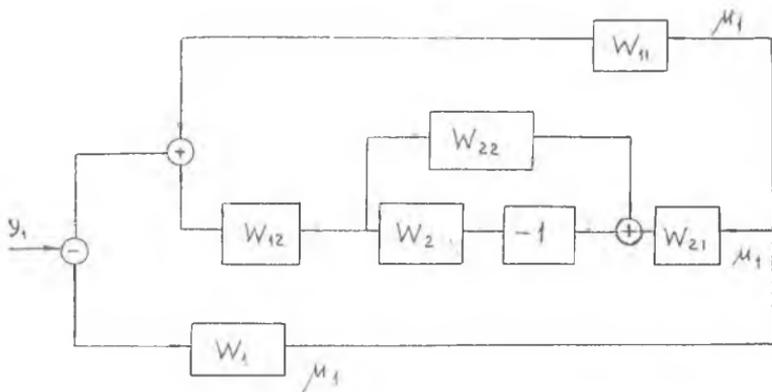


Рис. 1—23. Преобразование двухканальной САУ

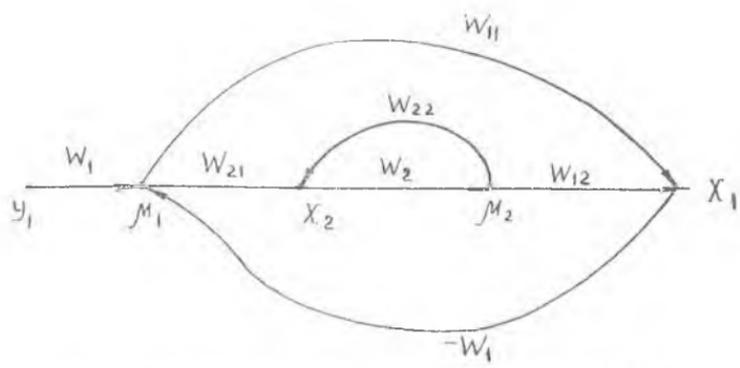


Рис. 1—24. Метод графов для преобразования САУ

веденными правилами, можно получить передаточную функцию, связывающую сигналы Y_1 и X_2 в разомкнутой системе (связь « W_1 » разорвана) по рис. 1—24

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{X_1(p)}{Y_1(p)} = W_{11} - \frac{W_{21}W_{12}W_2}{(1 + W_{22}W_2)}$$

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p) \cdot W_1(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p) W_1(p)}$$

Метод графов значительно облегчает работу по получению передаточных функций для многомерных САУ, исключая многочисленные структурные преобразования, необходимые при обычном методе.

§ 2.1. Анализ САУ методом ортогональных разложений

При проектировании и исследовании САУ в качестве исходной информации необходимо иметь динамические характеристики в виде передаточных функций для всех функциональных элементов, входящих в систему. Для определения передаточных функций объектов (идентификация объектов) применяются различные методы. К ним можно отнести составление дифференциального уравнения, отражающего связь входной и выходной величин объекта. В большинстве случаев трудно описать математически процессы в объекте с учетом взаимных влияний между объектом и остальными элементами системы. На практике идентификацию объектов часто осуществляют по экспериментальным данным. Существуют методы определения динамических характеристик по статистическим данным для объектов, находящихся в режиме нормальной эксплуатации. При этом используются реализации входного и выходного сигналов объекта на достаточно большом интервале времени [23, 24]. М. П. Симою разработал метод определения коэффициентов передаточной функции объекта по временным характеристикам объекта. При использовании этого метода необходимо иметь изменение сигналов объекта на входе и выходе от нуля до нового установившегося значения, что в конечном счете требует использования при эксперименте сигналов специальной формы.

Метод Симою (метод площадей) достаточно подробно описан в литературе [20], [21].

В настоящее время находит широкое применение ортогональный метод определения динамических характеристик объектов. Этот метод позволяет получить хорошие результаты идентификации по реализациям входной и выходной величин объекта на ограниченном интервале времени, соизмеримом с периодом собственных колебаний объекта. Ортогональный метод позволяет проводить идентификацию многомерных объектов управления. Для определения передаточной функции объекта

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)}$$

по временным характеристикам входа и выхода объекта отыскиваются аналитические выражения $x_{\text{вх}}(t)$ и $x_{\text{вых}}(t)$. Передаточная функция может быть найдена как отношение изображений по Лапласу выходного и входного сигналов при нулевых начальных условиях. Аналитические выражения сигналов находятся с помощью ортонормированной на интервале $0 < t < T$ с весом $\omega(t)$ системы функций $\{\varphi_i(t)\}$:

$$\int_0^T \varphi_i(t) \varphi_j(t) \omega(t) dt = 0; \quad \text{при } i \neq j$$

$$\int_0^T \varphi_i^2(t) \omega(t) dt = 1 \quad \text{при } i = j.$$

При этом аналитическое выражение для сигнала $x(t)$ находится как сумма конечного числа членов

$$x(t) \approx f(t) = \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(t).$$

Если определять коэффициенты c_i из условия минимума среднеквадратичной взвешенной ошибки

$$E = \int_0^T |x(t) - f(t)|^2 \omega(t) dt = \min,$$

то коэффициенты c_i будут коэффициентами Фурье функции $x(t)$ в системе функций $\{S_i(t)\}$:

$$c_i = \int_0^T \varphi_i(t) x(t) \omega(t) dt.$$

Для вычисления коэффициентов c_i можно использовать как моделирующие, так и цифровые вычислительные машины. На рис. 2—1 показана структурная схема такого устройства.

Задачу по идентификации объектов с использованием вычислительной техники удобно решать ортогональным методом моментов.

Передаточная функция объекта определяется как:

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = \frac{\int_0^{\infty} x_{\text{вых}}(t) e^{-pt} dt}{\int_0^{\infty} x_{\text{вх}}(t) e^{-pt} dt};$$

Удобно рассматривать изображение Лапласа как функцию моментов

$$W(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} k(t) \omega(t) dt = \frac{\int_0^{\infty} x_{\text{вых}}(t) e^{-pt} \omega(t) dt}{\int_0^{\infty} x_{\text{вх}}(t) e^{-pt} \omega(t) dt}.$$

В качестве весовой функции $\omega(t)$ можно взять $\omega(t) = e^{-ct}$

$$[W(p)]_{p=c} = \frac{\int_0^{\infty} x_{\text{ВЫХ}}(t) e^{-ct} dt}{\int_0^{\infty} x_{\text{ВХ}}(t) e^{-ct} dt}$$

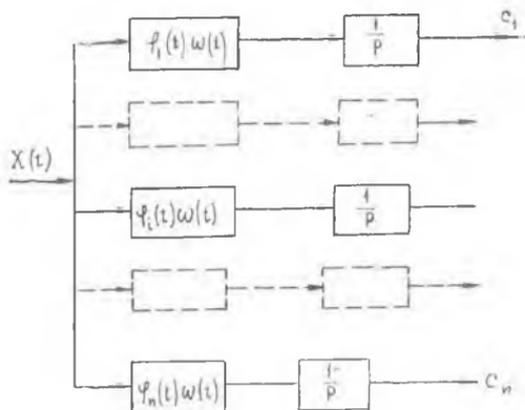


Рис. 2—1. Структурная схема анализатора спектра

С другой стороны, задаваясь видом передаточной функции, можно составить систему алгебраических уравнений, в результате решения которой можно определить коэффициенты передаточной функции

$$[W(p)]_{p=c_1} = \frac{b_m c_1^m + \dots + b_1 c_1 + b_0}{a_n c_1^n + \dots + a_1 c_1 + a_0} = \frac{\int_0^{\infty} x_{\text{ВЫХ}}(t) e^{-c_1 t} dt}{\int_0^{\infty} x_{\text{ВХ}}(t) e^{-c_1 t} dt}$$

$$[W(p)]_{p=c_i} = \frac{b_m c_i^m + \dots + b_1 c_i + b_0}{a_n c_i^n + \dots + a_1 c_i + a_0} = \frac{\int_0^{\infty} x_{\text{ВЫХ}}(t) e^{-c_i t} dt}{\int_0^{\infty} x_{\text{ВХ}}(t) e^{-c_i t} dt}$$

$$[W(p)]_{p=c_k} = \frac{b_m c_k^m + \dots + b_1 c_k + b_0}{a_n c_k^n + \dots + a_1 c_k + a_0} = \frac{\int_0^{\infty} x_{\text{ВЫХ}}(t) e^{-c_k t} dt}{\int_0^{\infty} x_{\text{ВХ}}(t) e^{-c_k t} dt}$$

Число уравнений должно быть не меньше $(m + n + 1)$.

Если выбрать значения коэффициентов $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_k$ таким образом, чтобы заведомо выполнялось условие $e^{c_i t} \approx 0$ при $t \geq T$, то верхний бесконечный предел интегрирования можно заменить на конечный T . При выборе коэффициентов функции веса необходимо учитывать, что при малых значениях c_i для получения заданной точности необходимо увеличивать предел интегрирования T , а следовательно и интервал наблюдения входного и выходного сигналов объекта. При больших значениях c_i весовая функция подчеркивает ошибки начального участка процесса, где ошибка из-за небольшой величины сигнала (процесс имеет нулевые начальные условия), может быть соизмерима или даже превышать полезный сигнал.

Структурная схема устройства для определения передаточной функции объекта приведена на рис. 2—2.

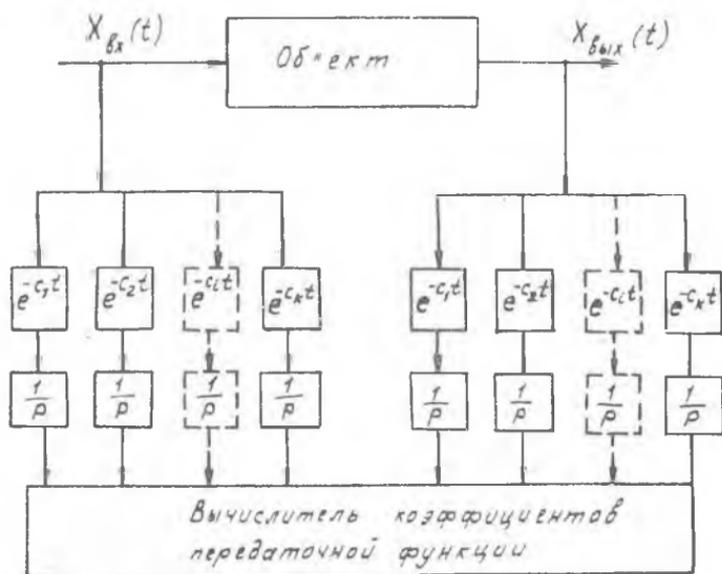


Рис. 2—2. Структурная схема устройства для определения передаточной функции

Для идентификации многомерного объекта с n входами необходимо провести n экспериментов по снятию входных и выходных сигналов. При этом можно рассматривать последовательно один какой-либо выход и n входов, затем другой выход и те же n входов и т. д. (рис. 2—3). Номер входа обозначен индексом q , а номер эксперимента p .

Системы интегральных уравнений во временной области

$$\left\{ \left\{ \sum_{q=1}^n \int_0^{\infty} k_{pq}(\tau) x_{qp}(t-\tau) d\tau = y_p(t), \quad (p = 1, 2, \dots, n), \right. \right.$$

где $y(t)$ — выходной сигнал,
 $x(t)$ — входной сигнал.

Они сводятся к системам алгебраических уравнений в комплексной области:

$$\left\{ \left\{ \sum_{q=1}^n W_q(p) x_{qp}(p) = y_p(p) \quad (p=1, 2, \dots, n). \right. \right.$$

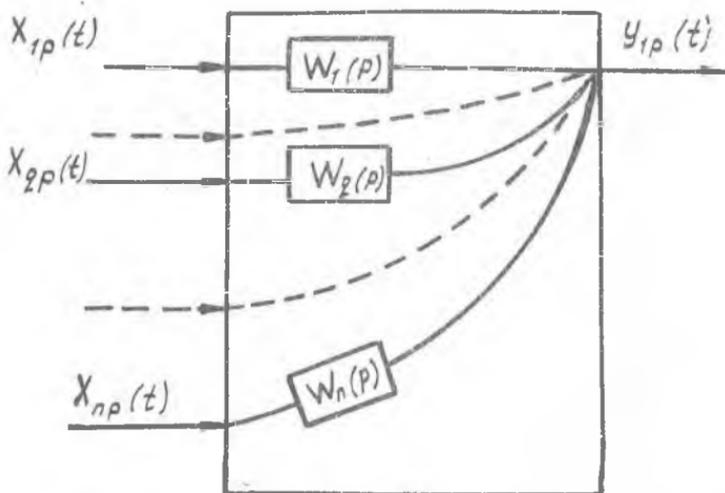


Рис. 2—3. Многомерная система автоматического управления

$$\left\{ \left\{ \sum_{q=1}^n W_q(p) \int_0^{\infty} x_{qp}(t) e^{-pt} \omega(t) dt = \int_0^{\infty} y_p(t) e^{-pt} \omega(t) dt \right. \right. \\ (p=1, 2, \dots, n).$$

В качестве весовой функции $\omega(t)$ можно выбрать e^{-ct} . С использованием моментных преобразований Лапласа системы уравнений принимают вид:

$$\left\{ \left\{ \sum_{q=1}^n [W_q(p)]_{i=c_i} \int_0^{\infty} x_{qp}(t) e^{-c_i t} dt = \int_0^{\infty} y_p(t) e^{-c_i t} dt, \right. \right. \\ (p=1, 2, \dots, n), \\ (i=1, 2, \dots, m+n+1).$$

В результате решения $(m+n+1)$ независимых систем уравнений получаем значения

$$W_1(c_1), W_1(c_2), \dots, W_1(c_{m+n+1}), W_2(c_1), W_2(c_2), \dots, W_2(c_{m+n+1}), \\ \dots, W_q(c_1), \dots, W_q(c_{m+n+1}), \dots, W_n(c_1), \dots, W_n(c_{m+n+1}).$$

Для определения коэффициентов передаточных функций заданного вида по каждому входу объекта необходимо составить и решить n независимых систем алгебраических уравнений

$$W_q(c_1) = \frac{b_m c_1^m + \dots + b_1 c_1 + b_0}{a_n c_1^n + \dots + a_1 c_1 + a_0},$$

$$W_q(c_2) = \frac{b_m c_2^m + \dots + b_1 c_2 + b_0}{a_n c_2^n + \dots + a_1 c_2 + a_0},$$

.....

$$W_q(c_{m+n+1}) = \frac{b_m c_{m+n+1}^m + \dots + b_0}{a_n c_{m+n+1}^n + \dots + a_0},$$

($q = 1, 2, \dots, n$).

Выбор коэффициентов функции веса c_i производится из тех же соображений, что и для идентификации одномерных объектов.

Исследования, которые проводились на одномерных и двумерных объектах второго порядка, показали, что по реализациям временных характеристик на интервалах времени, равных периоду собственных колебаний объекта, ошибка определения коэффициентов передаточных функций не превышает 5%. В качестве входных сигналов подавались экспоненциальные сигналы и синусоидные сигналы с периодом колебаний, соизмеримым с периодом собственных колебаний объекта. Идентификация производилась при нулевых начальных условиях.

§ 2. 2. Построение логарифмических частотных характеристик разомкнутой САУ

Как уже было показано выше, САУ, для которой известны передаточные функции всех элементов, при помощи эквивалентных структурных преобразований можно привести к виду, представленному на рис. 1—4.

Построение логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) разомкнутой САУ, то есть системы, у которой разомкнута главная обратная связь, можно производить по аналитическому выражению передаточной функции разомкнутой системы $W_p(p)$. Для этого подставляя в выражение передаточной функции $p = i\omega$, можно получить частотную функцию разомкнутой системы $W_p(i\omega)$ [12], которую как комплексную функцию можно представить в следующем виде:

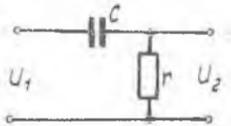
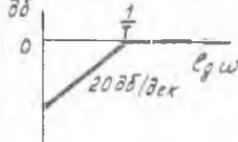
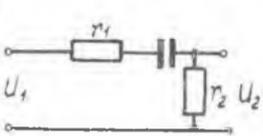
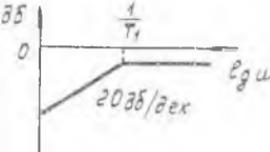
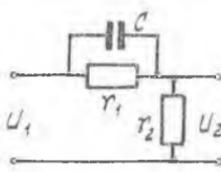
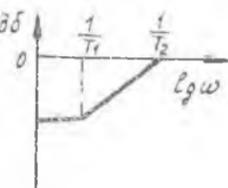
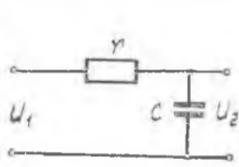
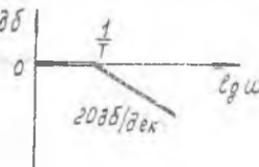
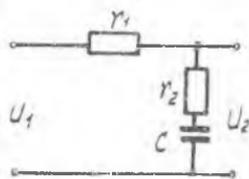
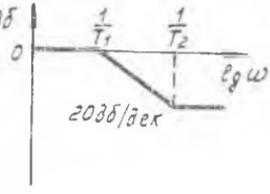
$$W(i\omega) = P(\omega) + iQ(\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)},$$

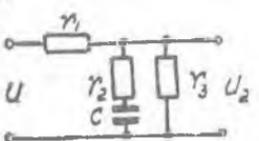
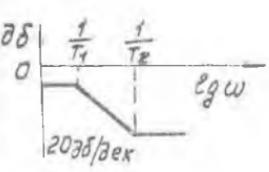
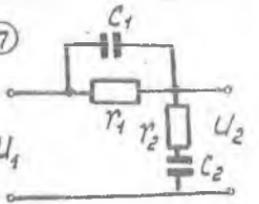
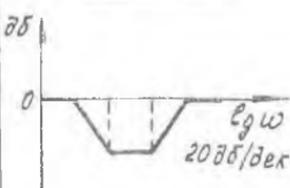
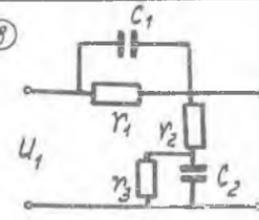
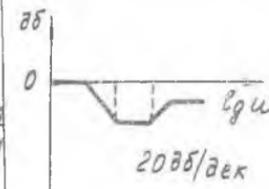
$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$ — амплитудная частотная характеристика,
 $\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}$ — фазовая частотная характеристика.

Аналитическое построение частотных характеристик требует большого объема вычислительной работы, поэтому указанные выше аналитические преобразования и расчеты типовых форм связей между элементами сведены к графическим номограммам.

В практике инженерных расчетов широко применяется построение ЛЧХ по заданной структурной схеме САУ. Предполагая, что по своей структуре САУ представляет собой различные (последовательные, встречно-параллельные и согласно-параллельные) соединения типовых звеньев, для построения логарифмических частотных

Таблица 2-1

Схема корректирующего пассивного контура	Передающая функция	Логарифмическая амплитудная асимптотическая характеристика
<p>①</p> 	$W(p) = \frac{T_p}{T_p + 1}$	
<p>②</p> 	$W(p) = \frac{T_2 p}{T_1 p + 1}$	
<p>③</p> 	$W(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1} K$	
<p>④</p> 	$W(p) = \frac{1}{1 + T p}$	
<p>⑤</p> 	$W(p) = \frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1}$	

<p>⑥</p> 	$W(p) = \frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1} \cdot K$	
<p>⑦</p> 	$W(p) = \frac{T_1^2 p^2 + 2C_1 T_1 p + 1}{T_2^2 p^2 + 2C_2 T_2 p + 1}$	
<p>⑧</p> 	$W(p) = K \frac{T_1^2 p^2 + 2C_1 T_1 p + 1}{T_2^2 p^2 + 2C_2 T_2 p + 1}$	

характеристик САУ строятся ЛЧХ отдельных звеньев системы. Вид ЛЧХ типовых звеньев представлен на рис. 2—4 и в табл. 2—1.

Для точного построения ЛЧХ можно воспользоваться номограммами, таблицами поправок и фазовых характеристик [2].

§2. 3. Исследование САУ на устойчивость и качество переходного процесса по ЛЧХ

Анализ САУ удобно проводить по ЛЧХ разомкнутой системы. Для этого внешний контур разрывается у элемента сравнения, а имеющиеся внутренние контура и согласные-параллельные цепочки замыкаются с использованием номограммы. На рис. 2—5 приведены ЛЧХ разомкнутой САУ. Если система минимально-фазовая, то есть разомкнутая САУ устойчива (передаточная функция разомкнутой системы не содержит нулей и полюсов с положительной вещественной частью).

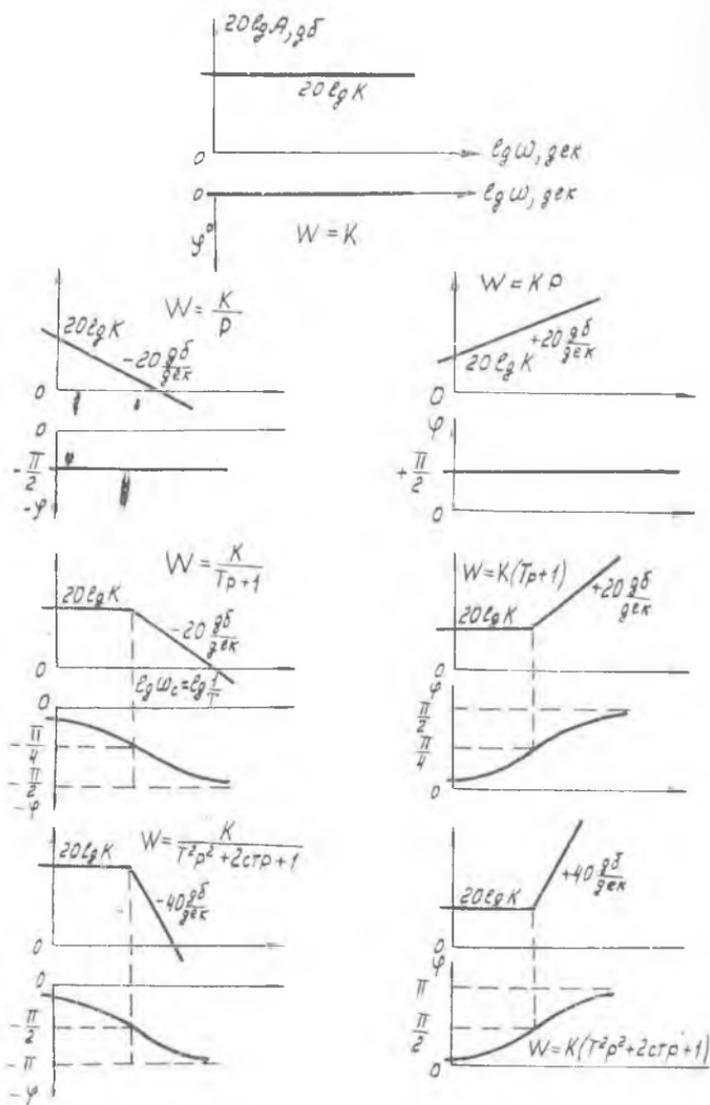


Рис. 2—4. ЛЧХ некоторых типовых звеньев

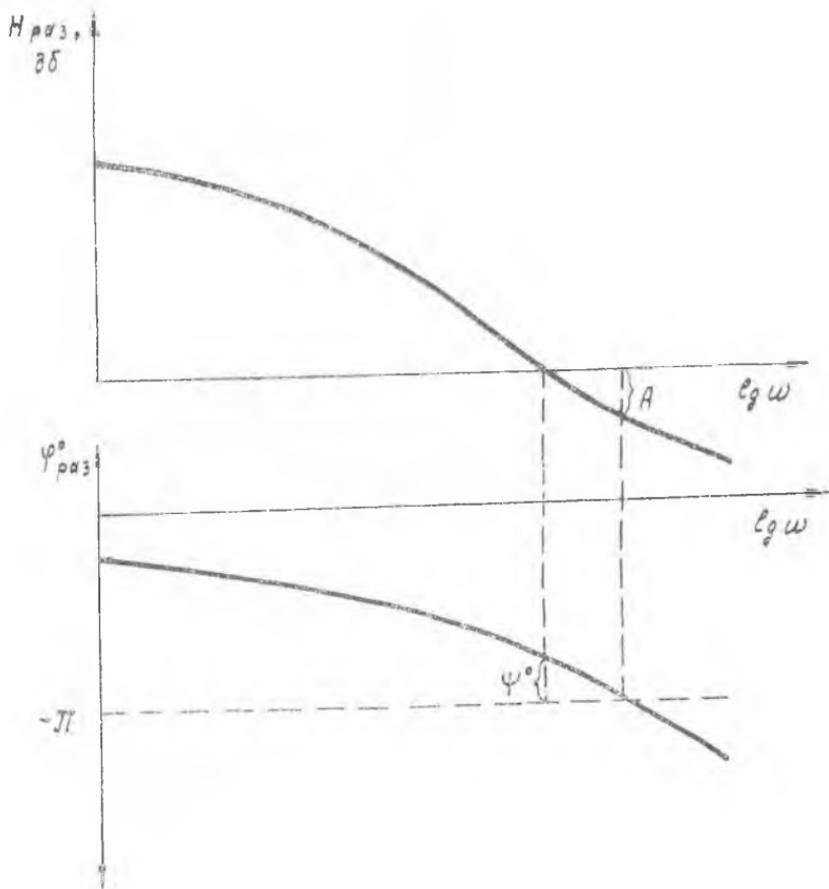


Рис. 2—5. Определение устойчивости и запасов устойчивости по ЛЧХ разомкнутой САУ.

ственной частью), то для устойчивости САУ в замкнутом состоянии необходимо и достаточно, чтобы логарифмическая амплитудная частотная характеристика разомкнутой системы пересекла ось частот раньше, чем фазовая характеристика значение -180° . Соответственно (рис. 2—5), определяются запасы устойчивости по амплитуде $A_{дб}$ и по фазе φ° .

Анализ качества переходного процесса САУ производится по логарифмической амплитудной частотной характеристике разомкнутой системы. На рис. 2—6 приведена типовая ЛЧХ. Можно выделить четыре области: низкочастотную АВ с наклоном (-20 дБ/дек) , средне-частотную СД с наклоном (-20 дБ/дек) , отрезок ВС с углом наклона (-20 дБ/дек) , (-40 дБ/дек) или (-60 дБ/дек) и высокочастотную ДЕ с наклоном (-20 дБ/дек) , (-40 дБ/дек) или (-60 дБ/дек) .

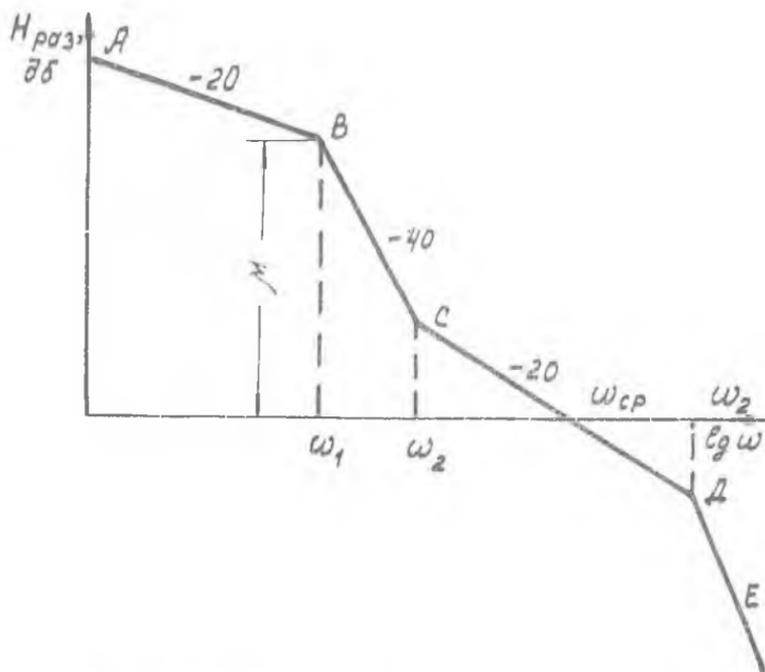


Рис. 2—6. ЛЧХ системы автоматического управления

При исследовании САУ на ЭММ для выбора масштаба времени необходимо ориентировочно определить время регулирования, которое зависит от значения частоты $\omega_{ср}$

$$t_p \approx \frac{2\pi}{\omega_{ср}}$$

Характер переходного процесса зависит от наклона участка ВС. Если выше оси частот нет угла наклона амплитудной характеристики больше, чем (-20 дБ/дек) , то есть $\omega_1 = \omega_2$, то переходный процесс САУ будет монотонным. Остальные показатели качества переходного процесса (максимальное перерегулирование, показатель колебательности, круговая частота колебаний и др.), а также время регулирования с большей точностью можно определить в зависимости от соотношений

$$\mu, \frac{\omega_1}{\omega_{ср}}, \frac{\omega_3}{\omega_{ср}}$$

по специальным номограммам [2].

§ 2. 4. Коррекция САУ

Коррекция САУ производится с целью обеспечения заданных требований по точности, устойчивости и качеству переходного процесса. Коррекцию САУ можно осуществить за счет изменения ко-

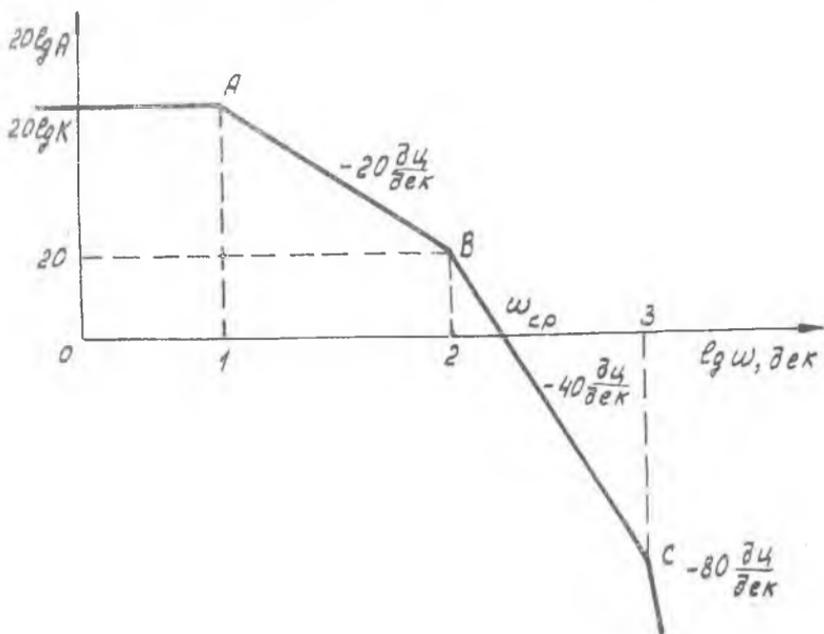
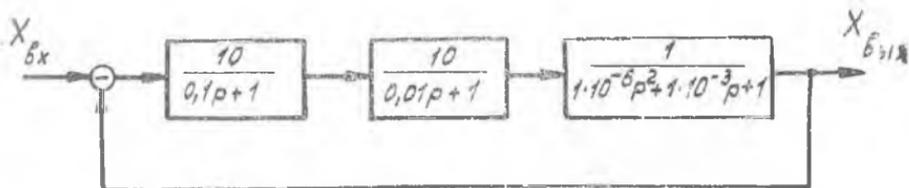


Рис. 2—7. Пример коррекции САУ

эффекта усиления разомкнутой САУ, а также путем введения в систему специальных корректирующих элементов. Корректирующие элементы могут вводиться последовательно с элементами САУ или же в цепь обратных связей. Ориентировочный выбор корректирующих элементов производится по логарифмической амплитудной частотной характеристике разомкнутой САУ в зависимости от предъявляемых к САУ требований. Уточнение параметров корректирующих элементов производится на ЭММ.

Наиболее простым видом коррекции является коррекция системы за счет изменения коэффициента усиления разомкнутой САУ. Изменение коэффициента усиления вызывает перемещение ЛАЧХ параллельно самой себе вверх или вниз на величину

$$20 \lg k^* [\text{дБ}]$$

где k^* — коэффициент, показывающий, во сколько раз изменялся коэффициент усиления разомкнутой САУ.

Рассмотрим коррекцию САУ, ЛАЧХ которой приведена на рис. 2—7.

Если к системе предъявляется требование монотонности переходного процесса, то выше оси частот ЛАЧХ не должна иметь наклон, больше чем (-20 дб/дек) .

Следовательно, необходимо изменить коэффициент усиления таким образом, чтобы точка В оказалась ниже оси частот (рис. 2—8)

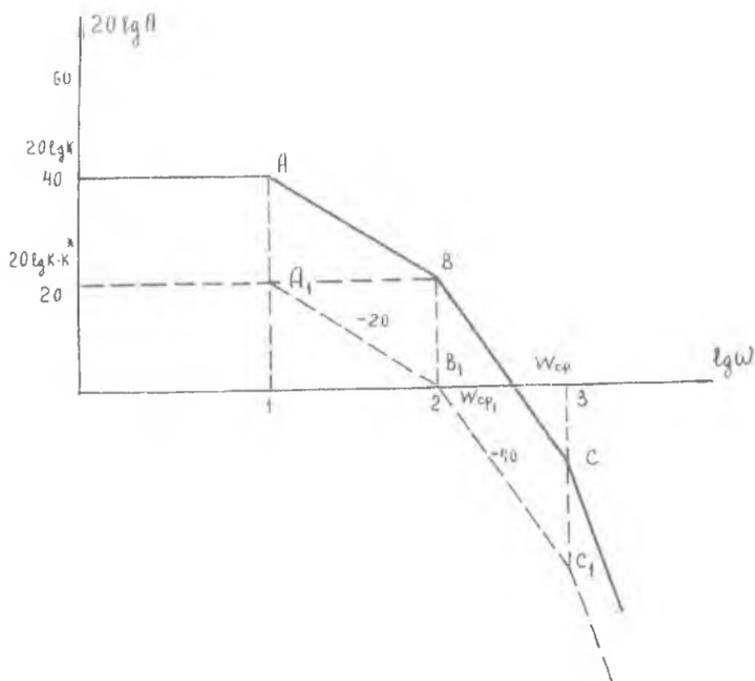


Рис. 2—8. Коррекция САУ

При этом ЛАЧХ должна переместиться вниз не менее, чем на 20 дб. , то есть:

$$20 \lg k^* = -20 \text{ дб, } k^* = 0,1.$$

Для монотонности переходного процесса САУ, приведенной на рис. 2—7, необходимо уменьшить в десять раз коэффициент усиления разомкнутой системы. Но при этом ухудшается быстродействие системы

$$t_p \approx \frac{2\pi}{\omega_{cp}}.$$

При улучшении одних показателей системы (характер переходного процесса, запасы устойчивости) за счет изменения коэффициента усиления неизбежно ухудшаются другие (быстродействие системы).

Значительно больше возможностей дает применение последовательных корректирующих элементов. На рис. 2—9 приведена та же система АУ с включенным корректирующим элементом. Передаточная функция разомкнутой системы равна произведению переда-

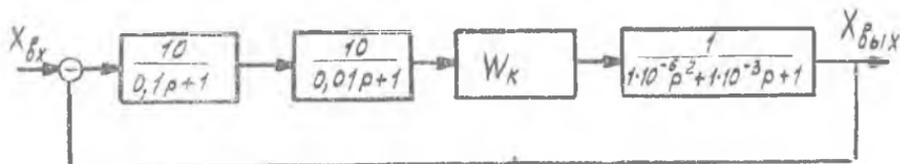


Рис. 2—9. Коррекция САУ последовательным корректирующим элементом

точных функций элементов САУ и корректирующего звена. Соответственно ЛАЧХ разомкнутой скорректированной САУ равна сумме ЛАЧХ исходной системы и ЛАЧХ корректирующего звена [2]. Коррекция последовательным корректирующим элементом производится в три этапа.

1. По заданным требованиям к САУ строится желаемая ЛАЧХ скорректированной САУ.

2. Из желаемой ЛАЧХ вычитается ЛАЧХ исходной САУ, в результате чего находится ЛАЧХ корректирующего элемента.

3. По ЛАЧХ корректирующего элемента находится передаточная функция корректирующего элемента, способ реализации и место его включения.

Для построения желаемой ЛАЧХ наводятся в соответствии с заданными требованиями качества некоторые характеристики в тех полосах частот, которые существенно влияют на показатели качества. Остальные части ЛАЧХ добавляются так, чтобы конструктивное выполнение корректирующего звена было по возможности простым. Рассмотрим САУ, структурная схема которой приведена на рис. 2—9. Допустим, к системе предъявляется требование монотонности переходного процесса, причем, время регулирования не должно превышать 0,006 сек. Ориентировочно частоту среза желаемой ЛАЧХ можно определить из выражения

$$\omega_{\text{ср}} \approx \frac{2\pi}{t_p} = \frac{2\pi}{0,006 \text{ сек}} \approx 10^3 \frac{1}{\text{сек}}$$

$$\lg \omega_{\text{ср}} = 3 \text{ дек.}$$

Переходный процесс будет монотонным в том случае, если выше оси частот ЛАЧХ будет иметь наклон не больше, чем (-20 дб/дек) . Для построения желаемой ЛАЧХ из точки на оси частот, соответствующей частоте среза желаемой ЛАЧХ равной $\omega_{\text{ср}} = 3 \text{ дек}$, проводится линия под углом (-20 дб/дек) . Горизонтальный участок желаемой ЛАЧХ проводится так же, как и у

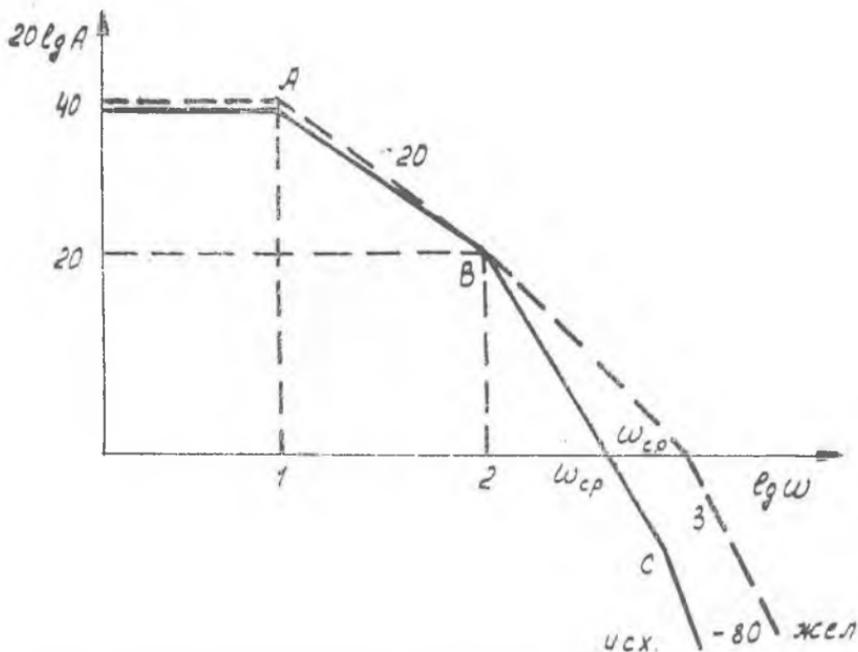


Рис. 2—10. Коррекция системы автоматического управления

ЛАЧХ исходной САУ на расстоянии 40 дБ от оси частот для простоты реализации корректирующего звена. На рис. 2—10 штриховой линией показана желаемая ЛАЧХ, а сплошной линией — ЛАЧХ исходной САУ.

ЛАЧХ корректирующего звена находится путем вычитания из желаемой ЛАЧХ характеристики исходной САУ. Из этой характеристики видно, что корректирующий контур представляет собой последовательное соединение форсирующего звена первого порядка и апериодического звена

$$W_k = \frac{0,01p + 1}{0,001p + 1}$$

Реализовать такое звено для случая электрических сигналов можно при помощи двух сопротивлений и емкости или же при помощи специального трансформатора (рис. 2—11).

В табл. 2—1 приведены ЛАЧХ, передаточные функции и схемы реализации наиболее типичных корректирующих звеньев. К основным недостаткам коррекции последовательным корректирующим звеном можно отнести увеличение чувствительности к помехам, использование в интегрирующих звеньях громоздких конденсаторов.

Широкое распространение получила коррекция САУ за счет включения параллельных корректирующих контуров, шунтирую-

щих отдельные звенья или участки САУ. В практических схемах применяют отрицательные обратные связи, хотя могут иметь место и положительные связи. Применяются также и прямые параллель-

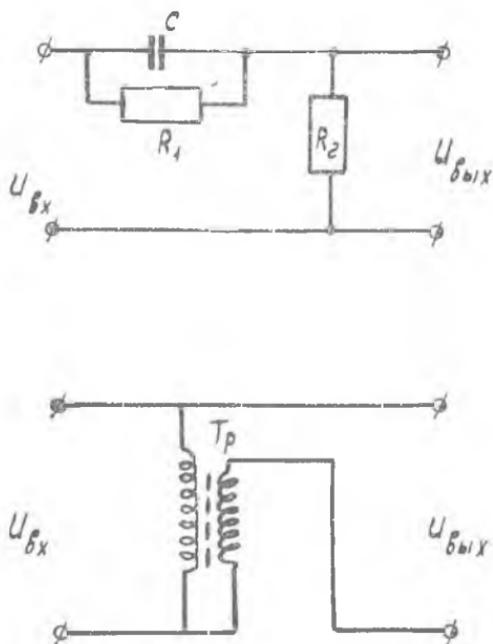


Рис. 2—11. Реализация корректирующего контура

ные цепи для компенсации ошибок. Недостатком последних является необходимость достаточно мощного управляющего воздействия, в то время как применение обратных связей основано на использовании выходных сигналов, которые, как правило, достаточно мощны для питания корректирующих цепей. Наличие параллельных корректирующих цепей делают систему более устойчивой к шумам и помехам, к нелинейностям характеристик звеньев, к нестабильности их параметров во времени. Корректирующие обратные связи могут быть жесткими, когда в обратной связи имеется статическое звено, и гибкими, когда в обратную связь включено дифференцирующее звено, то есть в статике сигнал обратной связи отсутствует. Гибкая обратная связь действует только в динамике процесса.

Рассмотрим действие жесткой обратной связи. Идеальная жесткая обратная связь имеет передаточную функцию $W_{oc} = k_{oc}$.

Если охватить такой обратной связью (рис. 2—12) аperiodическое звено

$$W_0 = \frac{k_0}{T_0 p + 1},$$

то передаточная функция этого участка цепи примет вид:

$$W = \frac{W_0}{1 + W_0 W_{oc}} = \frac{k_0}{T_0 p + 1 + k_0 k_{oc}}$$

или

$$W = \frac{k}{T p + 1},$$

где

$$k = \frac{k_0}{1 + k_0 k_{oc}}; \quad T = \frac{T_0}{1 + k_0 k_{oc}}$$

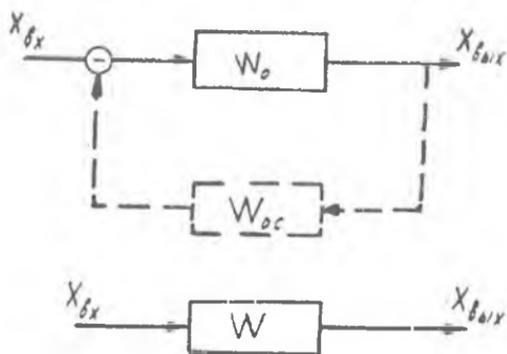


Рис. 2—12. Коррекция введенной обратной связи

В результате охвата жесткой обратной связью постоянная времени и коэффициент передачи изменяются. В случае отрицательной корректирующей обратной связи они уменьшаются, инерционность охватываемых звеньев или участков цепи уменьшается. При охвате колебательного звена инерционность его уменьшается, но колебательность может увеличиваться. Рассмотрим охват жесткой обратной связью интегрирующего звена (рис. 2—12).

$$W_0 = \frac{k_0}{p},$$

$$W = \frac{\frac{k_0}{p}}{1 + \frac{k_0 k_{oc}}{p}} = \frac{k_0}{p + k_0 k_{oc}} = \frac{k}{T p + 1},$$

где

$$k = \frac{1}{k_{oc}}, \quad T = \frac{1}{k_0 k_{oc}}$$

При охвате интегрирующего звена жесткой обратной связью, оно превращается в апериодическое звено, что может иметь место при снижении порядка астатизма системы и соответственно для улучшения устойчивости и качества переходного процесса. С этой целью часто охватывают жесткой обратной связью электрические

двигатели, используемые для перемещения органов управления, так как без обратной связи они представляли бы интегрирующие звенья, если выходной величиной является угол поворота.

Применение жестких обратных связей, обладающих инерционностью, например,

$$W_{oc} = \frac{k_{oc}}{T_{oc}p + 1},$$

способствует увеличению быстродействия охватываемого участка цепи за счет замедления роста сигнала обратной связи.

Рассмотрим влияние гибкой обратной связи. Идеальная гибкая обратная связь имеет место, когда в обратной связи включено идеальное дифференцирующее звено

$$W_{oc} = k_{oc}p.$$

Такую связь называют обратной связью по скорости. Если охватить идеальной гибкой обратной связью апериодическое звено (рис. 2—12).

$$W_0 = \frac{k_0}{T_0 p + 1},$$

то передаточная функция этого участка равна

$$W = \frac{W_0}{1 + W_0 W_{oc}} = \frac{k_0}{(T_0 + k_0 k_{oc}) p + 1}.$$

Постоянная времени в случае отрицательной обратной связи увеличивается, в случае положительной обратной связи уменьшается, причем без снижения коэффициента передачи звена. Охват гибкой отрицательной обратной связью колебательного звена является эффективным средством уменьшения колебательности звена. Инерционность гибкой обратной связи в случае отрицательной обратной связи повышает быстродействие, а при положительной — снижает его.

Широкое распространение получила инерционная гибкая обратная связь вокруг интегрирующего звена, которая называется издромной обратной связью

$$W_{oc} = \frac{k_{oc}p}{T_{oc}p + 1}.$$

При резком изменении входного сигнала скорость изменения входного и выходного сигналов велика. При этом единицей в знаменателе можно пренебречь и считать обратную связь жесткой

$$W_{oc} \approx \frac{k_{oc}}{T_{oc}}.$$

Можно рассматривать при этом участок цепи как апериодическое звено

$$W = \frac{\frac{k_0}{p}}{1 + \frac{k_0 k_{oc}}{p T_{oc}}} = \frac{k}{T p + 1},$$

где

$$k = \frac{T_{oc}}{k_{oc}}; \quad T = \frac{T_{oc}}{k_0 k_{oc}}.$$

Увеличивается коэффициент передачи системы и тем самым повышается быстродействие в начале переходного процесса. По мере уменьшения скорости изменения выходного сигнала сигнал обратной связи уменьшается до нуля, и интегрирующее звено ведет себя как обычное интегрирующее звено без обратной связи, обеспечивая астатизм системы, устраняя установившуюся ошибку.

Рассмотрим охват обратной связью усилительного звена с большим коэффициентом усиления

$$W = \frac{k_0}{1 + k_0 W_{oc}} = \frac{1}{\frac{1}{k_0} + W_{oc}} \approx \frac{1}{W_{oc}},$$

так как $k_0 \gg 1$

С помощью дифференцирующего звена, включенного в обратную связь, можно получить интегрирующее звено, что находит применение в ЭММ.

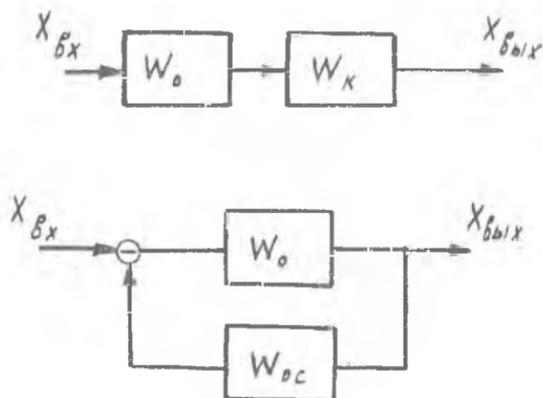


Рис. 2—13. Коррекция последовательным и параллельным корректирующим элементом

В линейных САУ коррекции последовательным звеном и параллельным контуром эквивалентны. На рис. 2—13 показаны два типа коррекции. В случае их эквивалентности имеем

$$W = W_0 W_x = \frac{W_0}{1 + W_0 W_{oc}}.$$

Из этого выражения можно получить передаточную функцию последовательного корректирующего звена, эквивалентного параллельному корректирующему контуру и наоборот

$$W_k = \frac{1}{1 + W_0 W_{oc}}$$
$$W_{oc} = \frac{1 - W_k}{W_0 W_k}$$

В заключение следует отметить, что задача коррекции не является однозначной. В каждом конкретном случае нужно выбирать наиболее рациональный способ коррекции. При этом часто оказывается целесообразным использование коррекции последовательным корректирующим звеном с охватом одного или нескольких элементов обратными связями и с одновременным изменением коэффициента усиления разомкнутой САУ. Коррекция конкретной САУ является во многих случаях самостоятельной творческой работой. При этом, наряду с выбором места включения корректирующих звеньев и определения их параметров, стоит задача практической реализации корректирующих звеньев по их передаточным функциям.

Глава III. ИССЛЕДОВАНИЕ САУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭММ

§ 3. 1. Выбор масштаба времени и масштабирование переменных САУ

При математическом моделировании изменениям физических переменных в реальной САУ ставятся в соответствие изменения напряжений в ЭММ. Зависимость между физическими переменными в САУ и между напряжениями в ЭММ выражаются одной и той же математической зависимостью, например, дифференциальными уравнениями. В этом случае каждой единице напряжения ЭММ может быть поставлена в соответствие определенная мера физической переменной САУ, то есть машинное представление физических переменных САУ производится с определенным масштабом

$$U_x = M_x x(t),$$

где $x(t)$ — физическая переменная САУ.

M_x — масштаб представления физической переменной САУ в напряжении ЭММ,

U_x — машинная переменная (напряжение), соответствующая физической переменной $x(t)$.

Точно также в определенном масштабе на ЭММ может быть представлено реальное астрономическое время

$$\tau = m_t t,$$

где t — реальное астрономическое время,

m_t — масштабный коэффициент времени,

— машинное время.

Если $m_t > 1$, то реальные процессы в САУ представляются на ЭММ в замедленном темпе и наоборот, если $m_t < 1$, то медленные реальные процессы в САУ протекают в ускоренном темпе на ЭММ. Таким образом, варьируя масштабным коэффициентом времени, можно реальные процессы в САУ любой длительности моделировать на ЭММ на определенном отрезке времени. Это обстоятельство имеет существенное значение, так как отрезок времени, в течение которого гарантируется правильность решения задачи, имеет вполне определенную величину и специально оговорен в техниче-

ких условиях на ЭММ. Из удобства снятия решения по отдельным точкам процесса или просмотра его визуально по осциллографу желательно выбрать масштаб времени таким, чтобы длительность решения на модели была 20 -:- 30 сек.

$$m_t = \frac{\tau}{t} \approx \frac{20 \div 30}{t_p},$$

где t_p — предлагаемая длительность переходного процесса в САУ в секундах.

Удобнее пользоваться округленными значениями масштаба времени.

Поскольку длительность переходного процесса САУ и характер логарифмической амплитудной частотной характеристики разомкнутой САУ взаимосвязаны, можно рекомендовать выбор масштаба времени по формуле

$$m_t \approx 2,5 \omega_{cp},$$

где ω_{cp} — частота среза, то есть значение частоты, при которой логарифмическая амплитудная частотная характеристика разомкнутой САУ пересекает ось частот (рис. 3—1).

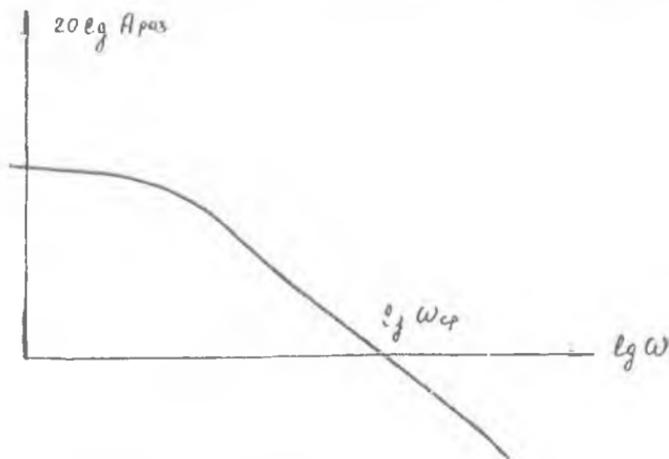


Рис. 3—1. Логарифмическая амплитудная частотная характеристика разомкнутой САУ

В отдельных случаях приходится изменять масштаб времени, подсчитанный по указанной формуле, с целью изменения значений рассчитываемых коэффициентов схемы набора таким образом, чтобы они не выходили из допустимых пределов, указанных для каждой ЭММ. Для моделей МН-7 имеем $0,01 \leq k \leq 10$; для моделей МН-10 $0,01 \leq k \leq 10$, для моделей ЭМУ-10 $0,001 \leq k \leq 10$.

При выборе масштабов представления физических переменных САУ в напряжениях ЭММ необходимо найти некоторый компромисс, так как с одной стороны эти масштабы должны иметь как можно большие значения, чтобы уменьшить относительные погрешности, вызванные напряжениями помех, с другой стороны машин-

ная переменная (напряжение) не должна превышать допустимого предельного значения, чтобы все электронные лампы решающих усилителей и транзисторы работали в пределах линейных участков их характеристик. Для моделей МН-7 и ЭМУ-10 допустимое предельное значение напряжения на решающих усилителях ± 100 в.

$$|U_{x_i}(t)| = |M_{x_i} x_i(t)| \leq 100 \text{ в.}$$

Для моделей МН-10 допустимое значение составляет ± 25 в

$$|U_{x_i}(t)| = |M_{x_i} x_i(t)| \leq 25 \text{ в.}$$

Масштаб представления физической переменной можно выбрать по правилу:

$$M_x \leq \frac{100 \text{ (25)}}{|x_{\max}|},$$

где x_{\max} — максимальное ожидаемое значение физической переменной $x(t)$,

100 — максимально допустимое напряжение для моделей МН-7, ЭМУ-10.

25 — максимально допустимое напряжение для модели МН-10.

После определения масштабов удобно округлить их в меньшую сторону.

Отступление от приведенного выше правила в сторону уменьшения масштабов производится в случае, если для выбранного масштаба времени напряжения, представляющие производные от машинных переменных, выходят за пределы линейности (100 в, 25 в).

Характерным для САУ является наличие замкнутой цепи воздействий, то есть наличие контура с обратной связью. При этом физическая природа входного и выходного сигналов, подаваемых на элемент сравнения одна и та же. Следовательно, для того, чтобы масштаб представления входного и выходного сигналов САУ на ЭММ был одинаков, необходимо, чтобы произведение масштабов представления промежуточных переменных внутри замкнутого контура равнялось единице. В противном случае неравенство этого произведения единице равносильно изменению коэффициента усиления разомкнутой САУ. Сказанное выше в равной степени относится не только к САУ, но и к любому внутреннему замкнутому контуру.

При исследовании САУ выбирают масштаб представления входной и выходной величин. В результате предварительного анализа САУ по ЛЧХ можно судить о характере переходного процесса САУ. Если переходный процесс монотонный, то выходная величина, подаваемая на элемент сравнения, не превышает в процессе решения значения входной величины

$$M_{x_{\text{вых}}} = M_{x_{\text{вх}}} = \frac{100 \text{ (25)}}{x_{\text{вх}}}.$$

При этом на вход аналоговой схемы, набранной на ЭММ, в качестве входной величины подается напряжение 100 в (ЭМУ-10, МН-7) или 25 в (МН-10).

$$U_{\text{вх}} = M_{x_{\text{вх}}} \cdot x_{\text{вх}} = 100 \text{ в (25в)}.$$

Если переходный процесс САУ колебательный, то выходная величина, подаваемая на элемент сравнения, может в процессе решения в два раза превышать значение входной величины

$$M_{x_{\text{вх}}} = \frac{100 (25)}{|2x_{\text{вх}}|}.$$

При исследовании такой САУ на вход аналоговой схемы подается напряжение 50 в (ЭМУ-10, МН-7) или 12,5 в (МН-10).

$$U_{\text{вх}} = M_{x_{\text{вх}}} x_{\text{вх}} = 50 \text{ в (12,5 в)}.$$

При анализе переходного процесса САУ необходимо учитывать, что значения выходной величины САУ будут в $M_{x_{\text{вх}}}$ раз меньше значений выходного напряжения аналоговой схемы, набранной на ЭММ

$$x_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{M_{x_{\text{вх}}}}.$$

Масштабы представления промежуточных переменных внутри замкнутых контуров, произведение которых должно равняться единице, удобно выбрать каждый равным единице, а затем при необходимости можно перераспределить их между собой, перераспреде-

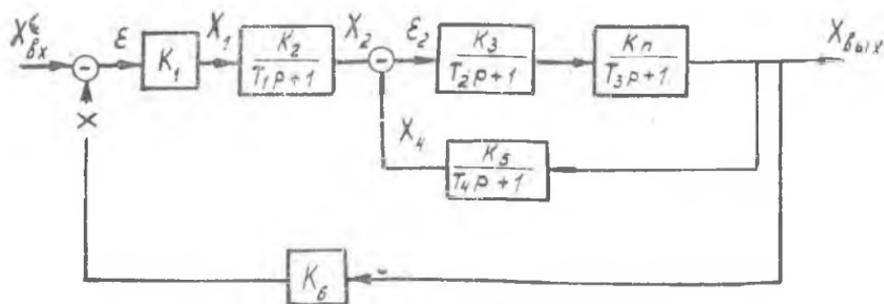


Рис. 3—2. Структурная схема САУ

ляя коэффициенты усиления отдельных звеньев по правилам структурных преобразований. Значения физических переменных САУ будут также в $M_{x_{\text{вх}}}$ раз меньше значений соответствующих напряжений аналоговой схемы.

В качестве примера рассмотрим САУ, структурная схема которой приведена на рис. 3—2.

Масштаб времени m_t выбирается по логарифмической ампли-

тудной частотной характеристике разомкнутой системы (рис. 3—1)

$$m_i = 2,5 \omega_{cp}.$$

Система разрывается у элемента сравнения (рис. 3—2). Значение масштаба времени округляется.

Если переходный процесс колебательный, то масштаб представления входной величины $x_{вх}$ и выходной величины x_5 , подаваемой на элемент сравнения, определяется из выражения

$$M_{x_5} = M_{x_{вх}} = \frac{100 (25)}{|2x_{вх}|}.$$

Рассчитанное значение масштаба округляется в меньшую сторону. Произведение масштабов остальных переменных должны равняться единице. Выбираем каждый из них равным единице

$$\begin{aligned} M_{\varepsilon_1} = 1; \quad M_{x_1} = 1; \quad M_{x_2} = 1; \\ M_{\varepsilon_2} = 1; \quad M_{x_3} = 1; \quad M_{x_4} = 1; \quad M_{x_{вых}} = 1. \end{aligned}$$

На вход аналоговой схемы подается напряжение

$$U_{вх} = M_{x_{вх}} x_{вх}.$$

Значения выходной величины САУ и промежуточных переменных будут в $M_{x_{вх}}$ раз меньше соответствующих значений напряжений аналоговой схемы

$$\begin{aligned} x_{вых} &= \frac{U_{x_{вых}}}{M_{x_{вых}} M_{x_{вх}}} = \frac{U_{x_{вых}}}{M_{x_{вх}} 1}; \quad \varepsilon_1 = \frac{U_{\varepsilon_1}}{M_{x_{вх}} M_{\varepsilon_1}} = \frac{U_{\varepsilon_1}}{M_{x_{вх}} 1}; \\ x_1 &= \frac{U_{x_1}}{M_{x_{вх}}}; \quad x_2 = \frac{U_{x_2}}{M_{x_{вх}}}; \quad \varepsilon_2 = \frac{U_{\varepsilon_2}}{M_{x_{вх}}}; \\ x_3 &= \frac{U_{x_3}}{M_{x_{вх}}}; \quad x_4 = \frac{U_{x_4}}{M_{x_{вх}}}; \quad x_5 = \frac{U_{x_5}}{M_{x_{вх}}}. \end{aligned}$$

При необходимости можно производить перераспределение коэффициентов усиления отдельных звеньев, входящих в САУ, по правилам структурных преобразований. При этом соответственно будут меняться масштабы представления промежуточных переменных. Если, например, для двух последовательно соединенных звеньев (рис. 3—2) перераспределить коэффициенты усиления k_1 и k_2 , то соответственно изменится и масштаб представления внутри замкнутого контура. Масштабы входной и выходной величин контура не изменятся.

§ 3. 2. Решающие элементы электронных моделирующих машин

Основным решающим элементом ЭММ является операционный или решающий усилитель с отрицательной обратной связью. Схема такого усилителя приведена на рис. 3—3. Для получения отрицательной обратной связи усилителя проектируются так, чтобы выход-

ное напряжение имело знак обратный по отношению к входному напряжению. Принимая входное сопротивление усилителя бесконечно большим и учитывая, что знаки входного и выходного напряжений противоположны, по закону Кирхгофа

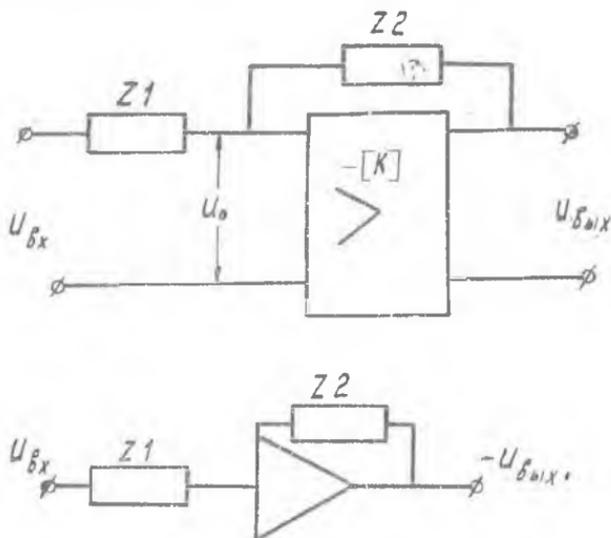


Рис. 3—3. Операционный усилитель

$$\frac{U_{вх}(p) - U_0(p)}{z_1(p)} = \frac{U_0(p) - U_{вых}(p)}{z_2(p)} = \frac{U_{вх}(p) - U_{вых}(p)}{z_1(p) + z_2(p)},$$

где

$$U_0(p) = \frac{U_{вых}(p)}{k},$$

$z_1(p)$ — входное операторное сопротивление усилителя,

$z_2(p)$ — операторное сопротивление обратной связи.

Для активного сопротивления $z(p) = R$, для индуктивного сопротивления $z(p) = pL$, для емкостного $z(p) = \frac{1}{pC}$.

В результате решения уравнения получаем:

$$\frac{U_{вх}(p)}{U_{вых}(p)} = \frac{z_1(p)}{z_2(p)} \left[1 + \frac{1}{k} \left(1 + \frac{z_2(p)}{z_1(p)} \right) \right].$$

При больших коэффициентах усиления усилителей (в ЭММ применяются усилители с коэффициентом усиления $4 \cdot 10^1$ до $8 \cdot 10^4$) решение уравнения можно записать как

$$U_{вых}(p) = -\frac{z_2(p)}{z_1(p)} U_{вх}(p).$$

Передаточная функция такого усилителя имеет вид:

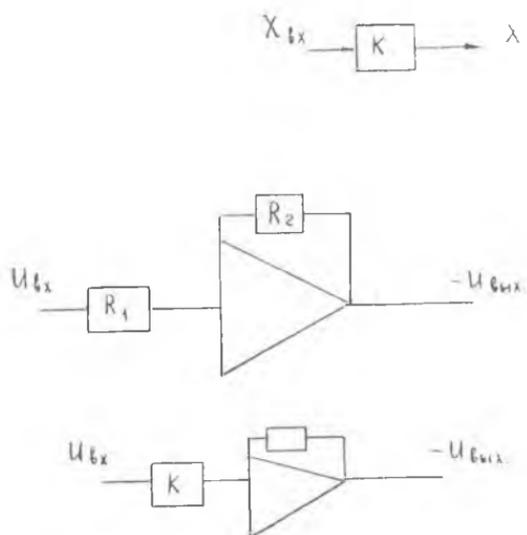


Рис. 3—4. Умножение на постоянный коэффициент с инвертированием знака

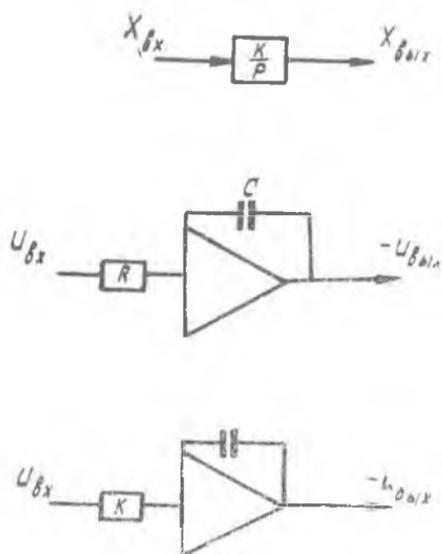


Рис. 3—5. Интегратор

$$W(p) = -\frac{z_2(p)}{z_1(p)}.$$

Рассмотрим основные математические операции, выполняемые с помощью операционных усилителей.

1. Умножение на постоянный коэффициент (рис. 3—4)

$$z_1(p) = R_1; z_2(p) = R_2:$$

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

Для, переходя к оригиналам,

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{R_2}{R_1} U_{\text{вх}}(t),$$

$$U_{\text{вых}}(t) = -k U_{\text{вх}}(t).$$

2. Интегрирование (рис. 3—5)

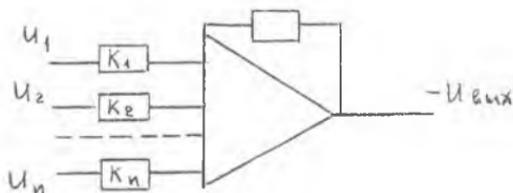
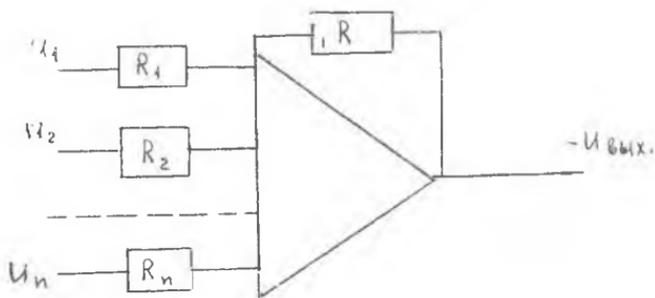
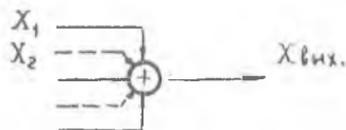


Рис 3—6. Сумматор

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

$$U_{\text{вых}}(p) = -\frac{1}{CpR} U_{\text{вх}}(p).$$

Или, переходя к оригиналам,

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt$$

$$U_{\text{вых}}(\tau) = -\frac{1}{RCm_i} \int_0^\tau U_{\text{вх}} d\tau; \quad U_{\text{вых}}(\tau) = -k \int_0^\tau U_{\text{вх}} d\tau.$$

3. Суммирование (рис. 3—6)

$$z_1(p) = R_1; R_2; R_3; \dots; R_n;$$

$$z_2(p) = R;$$

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R}{R_1} U_1 - \frac{R}{R_2} U_2 - \dots - \frac{R}{R_n} U_n,$$

$$U_{\text{вых}} = -k_1 u_1 - k_2 u_2 - \dots - k_n u_n.$$

4. Интегрирование суммы (сложение и суммирование на одном элементе) (рис. 3—7)

$$z_1(p) = R_1, R_2, \dots, R_n;$$

$$z_2(p) = \frac{1}{Cp},$$

$$U_{\text{вых}}(p) = \frac{1}{Cp} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} U_{\text{вх}i}.$$

или

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{CR_1} \int_0^t U_1 dt - \frac{1}{CR_2} \int_0^t U_2 dt - \dots - \frac{1}{R_n C} \int_0^t U_n dt,$$

$$U_{\text{вых}}(\tau) = -k_1 \int_0^\tau U_1 d\tau - k_2 \int_0^\tau U_2 d\tau - \dots - k_n \int_0^\tau U_n d\tau.$$

5. Инвертирование знака

$$z_1(p) = z_2(p) = R,$$

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}}.$$

6. Дифференцирование (рис. 3—8)

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

$$U_{\text{вых}}(p) = RCp U_{\text{вх}}(p);$$

или, переходя к оригиналам,

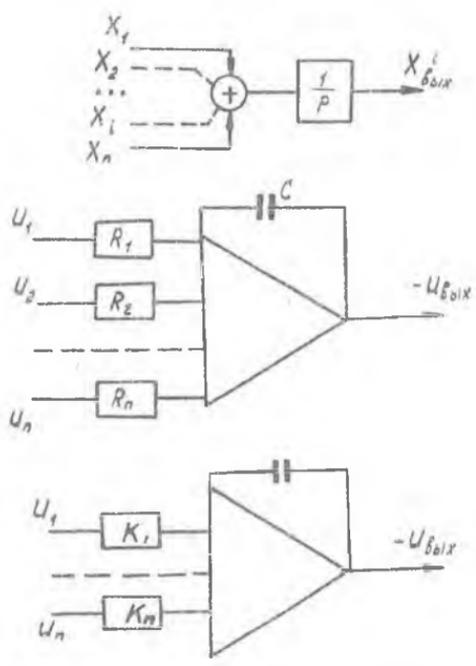


Рис. 3—7. Интегратор с одновременным суммированием

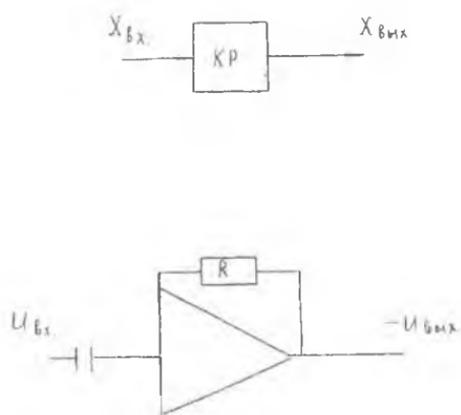


Рис. 3—8. Дифференцирование

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

Дифференцирующие усилители, как правило, при исследовании САУ не используются, так как из-за недостаточной стабильности напряжения питания реагируют на его пульсацию (частотой 50 гц).

§ 3. Составление схем набора и расчет коэффициентов по дифференциальному уравнению

Поведение замкнутой САУ с постоянными коэффициентами в общем случае описывается уравнением:

$$\begin{aligned} (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) x_{\text{вых}} = \\ = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) x_{\text{вх}}. \end{aligned}$$

В реальных САУ, как правило, $m \leq n$.

Рассмотрим частный случай, когда в правой части все коэффициенты при производных от входной величины равны нулю

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}.$$

Для составления схемы набора методом понижения порядка производной уравнение разрешается относительно высшей производной выходной величины

$$p^n x_{\text{вых}} = \frac{k}{a_n} x_{\text{вх}} - \frac{a_{n-1}}{a_n} p^{n-1} x_{\text{вых}} - \dots - \frac{a_1}{a_n} p x_{\text{вых}} - \frac{a_0}{a_n} x_{\text{вых}}.$$

Получили аналитическое выражение высшей производной выходной величины через низшие производные выходной величины, выходную и входную величины. Считая как бы известной высшую производную выходной величины, подают ее на вход последовательно соединенных n интегрирующих усилителей. На выходе этих усилителей соответственно будут низшие производные выходной величины и выходная величина (рис. 3—9). При построении схемы было сделано предположение, что имеется высшая производная выходной величины. Ее можно получить, если на вход первого интегрирующего усилителя подать с соответствующими коэффициентами и знаками низшие производные выходной величины, выходную величину, а также входной сигнал в соответствии с выражением высшей производной (рис. 3—9). Структурная схема для математического моделирования приведена на рис. 3—10.

В общем случае уравнение САУ имеет вид:

$$\begin{aligned} (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) x_{\text{вых}} = \\ = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) x_{\text{вх}}; \\ x_{\text{вых}} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} x_{\text{вх}}. \end{aligned}$$

Вводим новую переменную

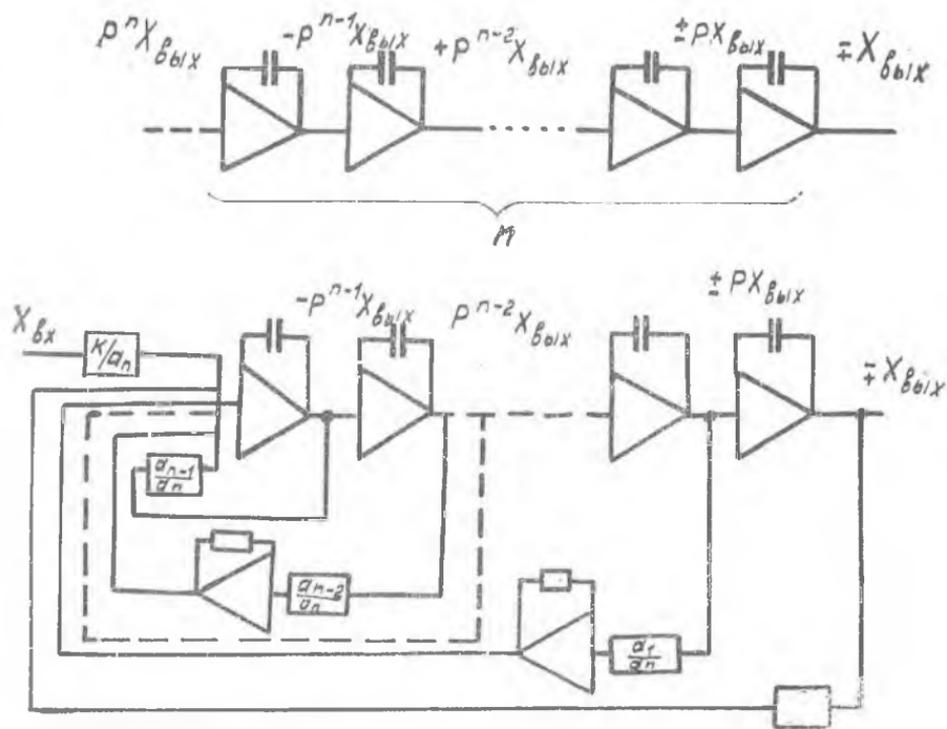


Рис. 3—9. Составление схемы набора

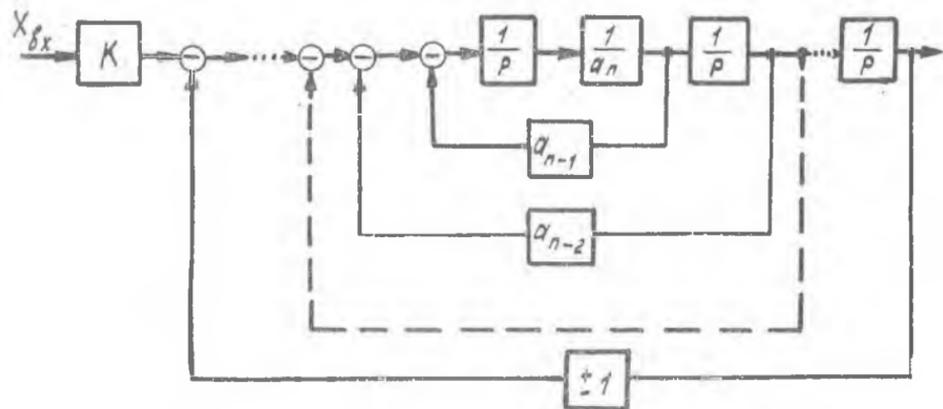


Рис. 3—10. Последовательность составления схемы набора

$$U = \frac{x_{\text{вх}}}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0},$$

в результате получаем решение уравнения в виде

$$x_{\text{вых}} = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) U.$$

Для составления схемы набора необходимо иметь переменную U и ее производные до порядка m , которые можно получить при составлении схемы набора по уравнению

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) U = x_{\text{вх}}$$

методом понижения порядка производной (рис. 3—11)

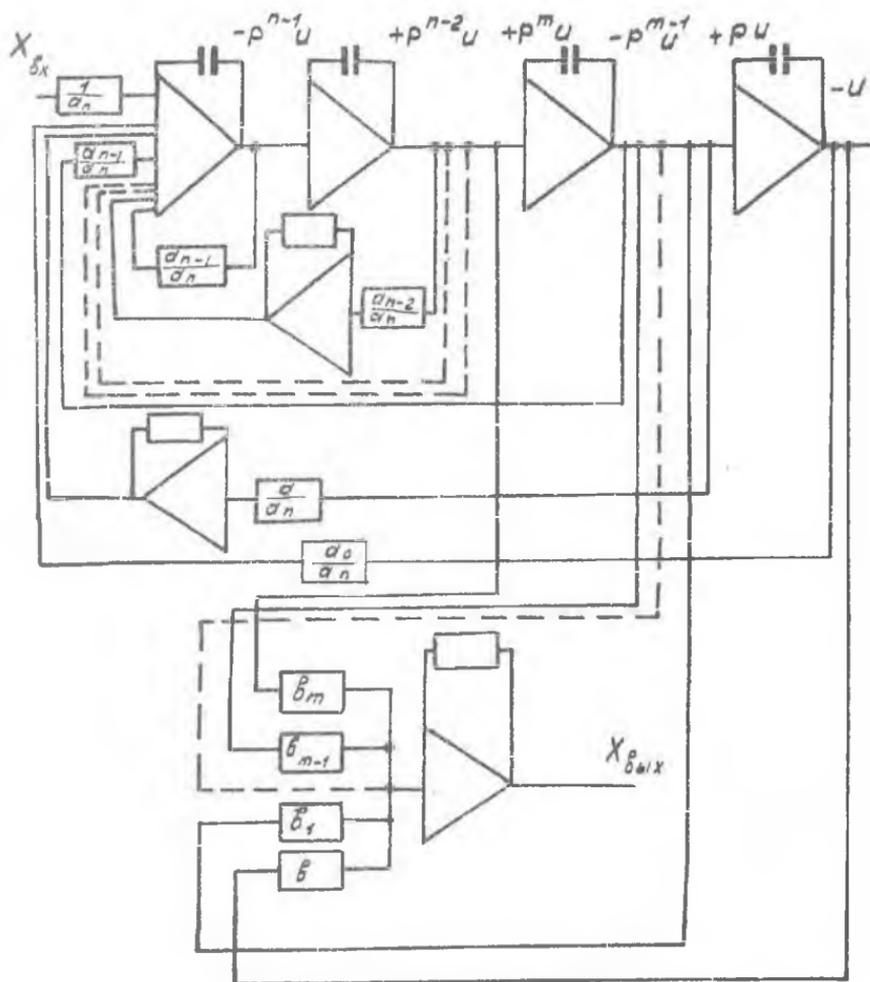


Рис. 3—11. Аналоговая схема набора на ЭММ

$$p^n U = \frac{1}{a_n} x_{\text{вх}} - \frac{a_{n-1}}{a_n} p^{n-1} U - \dots - \frac{a_1}{a_n} p U - \frac{a_0}{a_n} U.$$

Производные от переменной U с соответствующими знаками и коэффициентами и переменная суммируются согласно уравнению

$$x_{\text{вых}} = b_m p^m U - b_{m-1} p^{m-1} U + \dots + b_1 p U + b_0 U$$

для получения искомого решения (рис. 3—11).

Структурная схема для математического моделирования приведена на рис. 3—12.

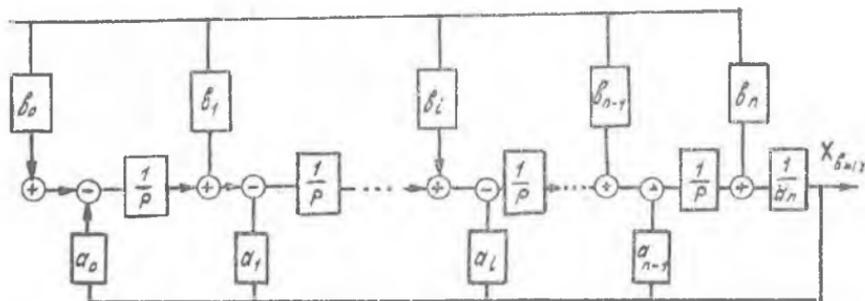


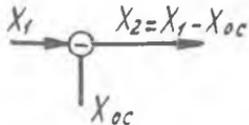
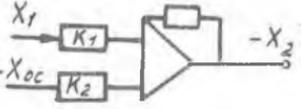
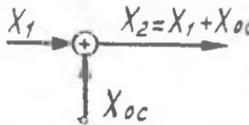
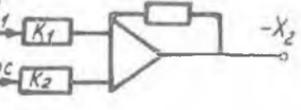
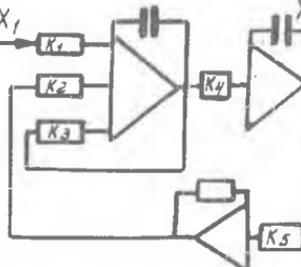
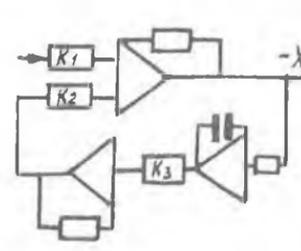
Рис. 3—12. Составление структурной схемы по дифференциальному уравнению

§ 3. 4. Составление схемы набора и расчет коэффициентов по структурной схеме САУ

При исследовании САУ на ЭММ удобнее составлять схему набора по структурной схеме системы, так как в этом случае можно использовать готовые схемы набора для типовых элементов САУ и их сочетаний. В табл. 3—1 приведены схемы набора на ЭММ, соответствующие передаточным функциям типовых элементов и участков цепи структурной схемы САУ.

Перед составлением схемы набора по структурной схеме САУ необходимо произвести структурные преобразования САУ таким образом, чтобы САУ представляла собой соединение элементов или их сочетания, для которых имеются готовые схемы набора. При этом необходимо сгруппировать дифференцирующие и форсирующие элементы с инерционными звеньями с целью построения схемы набора на интегрирующих усилителях.

Рассмотрим в качестве примера схему, приведенную на рис. 3—13. Для моделирования дифференцирующего звена, включенного в обратную связь внутреннего контура и форсирующего звена первого порядка требуются дифференцирующие усилители, которые, как уже было отмечено выше, неустойчивы в работе и, как правило, при исследовании САУ не используются. Целесообразно при исследовании такой системы произвести структурные преобразования и сгруппировать эти элементы с инерционными элементами. Преобразованная схема представлена на рис. 3—14. Для состав-

Передаточная функция	Схемы набора	Расчет коэффициентов схемы набора
 $X_2 = X_1 - X_{oc}$		$K_2 = K_1 = 1$
 $X_2 = X_1 + X_{oc}$		$K_1 = K_2 = 1$
$W = \frac{X_2}{X_1} = K$		$K_1 = K$
$W = \frac{X_2}{X_1} = \frac{K}{p}$		$K_1 = \frac{K}{m_t}$
$W = \frac{X_2}{X_1} = \frac{K}{T_p + 1}$		$K_1 = \frac{K}{m_t T}$ $K_2 = \frac{1}{m_t T}$
$W = \frac{X_2}{X_1} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2cTp + 1}$		$K_1 = \frac{K}{m_t^2 T^2}$ $K_5 K_2 = \frac{1}{m_t^2 T^2}$ $K_3 = \frac{2C}{m_t} \frac{1}{T} \quad K_4 = 1$
$W = \frac{X_2}{X_1} = \frac{Kp}{Tp + 1}$		$K_1 = \frac{K}{T}$ $K_2 K_3 K_4 = \frac{1}{m_t T}$

Передаточная функция	Схемы набора	Расчет коэффициентов схемы набора
$W = \frac{X_2}{X_1} = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1}$ $T_1 < T_2$		$K = K \frac{T_1}{T_2}$ $K_3 = \frac{1}{m_t T_1}$ $K_2 K_4 = K_3 - \frac{1}{m_t T_2}$
$W = \frac{X_2}{X_1} = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1}$ $T_1 > T_2$		$K_4 = K \frac{T_1}{T_2}$ $K_3 = \frac{1}{m_t T_1}$ $K_2 K_4 K_5 = \frac{1}{m_t T_2} - K_3$
$W = \frac{X_2}{X_1} = \frac{K(T p + 1)}{p}$ $= K T + \frac{K}{p}$		$K_1 K_3 = K T$ $K_2 K_4 = \frac{K}{m_t}$
$W = \frac{X_2}{X_1} = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + 2CTp + 1}$		$K = \frac{K T_1}{m_t T_2^2}$ $K_2 K_4 K_5 = \frac{1}{m_t^2 T_2^2}$ $K_3 = \frac{2C}{m_t T_2}$ $K_6 = \frac{K}{T_2^2 m_t^2}$

ления схемы набора остается найти в табл. 3—1 схемы набора для элементов и их сочетаний, входящих в преобразованную САУ, и соединить их между собой в соответствии со структурной схемой (рис. 3—15).

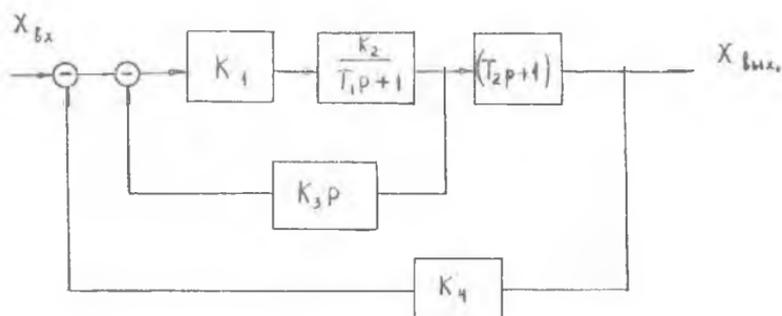


Рис. 3—13. Структурная схема САУ.

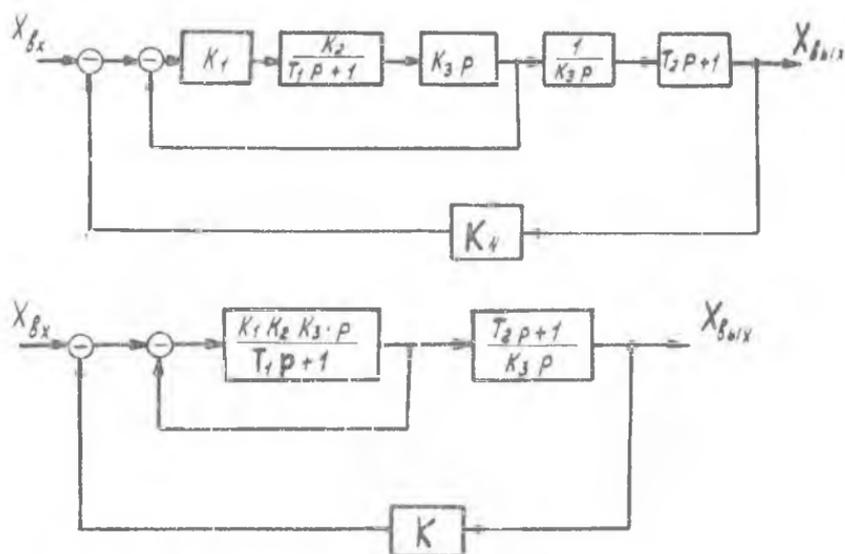


Рис. 3—14. Преобразования структурной схемы САУ

При составлении схемы набора необходимо помнить, что каждый усилитель инвертирует знак. При моделировании элемента сравнения необходимо, чтобы два сравниваемых сигнала подавались на усилитель с противоположными знаками. Если между входным и выходным напряжениями по прямой цепи (то есть не учитывая обратных связей) имеется четное количество усилителей, то выходное напряжение имеет тот же знак, что и входное, если же нечетное, то противоположный. Рекомендуется при составлении схе-

напряжение и напряжение главной обратной связи. Затем разностный сигнал (напряжение) поступает на следующий усилитель, где сравнивается с напряжением внутренней обратной связи и после умножения на коэффициент k_1 поступает на следующий усилитель. В соответствии с обозначениями напряжений на рис. 3—16 на третий усилитель подается напряжение U_3 и U_4

$$U_3 = -[-(U_{\text{вх}} - U_1 k_9) + U_2] = U_{\text{вх}} - U_1 k_9 - U_2.$$

На выходе третьего усилителя напряжение U_5 определится, как

$$U_5 = -[U_3 k_1 - U_4 k_2] = -[k_1(U_{\text{вх}} - k_9 U_1 - U_2) - k_2 U_4].$$

Из этого выражения видно, что тот же сигнал U_5 можно получить, если убрать первый и второй усилители, а на третий усилитель подать входное напряжение и напряжение U_2 с коэффициентом k_1 , а также напряжение U_1 с коэффициентом k_1, k_9 . Для инвертирования знака напряжения U_2 можно было добавить инвертор последовательно с четвертым усилителем, но тот же результат можно полу-

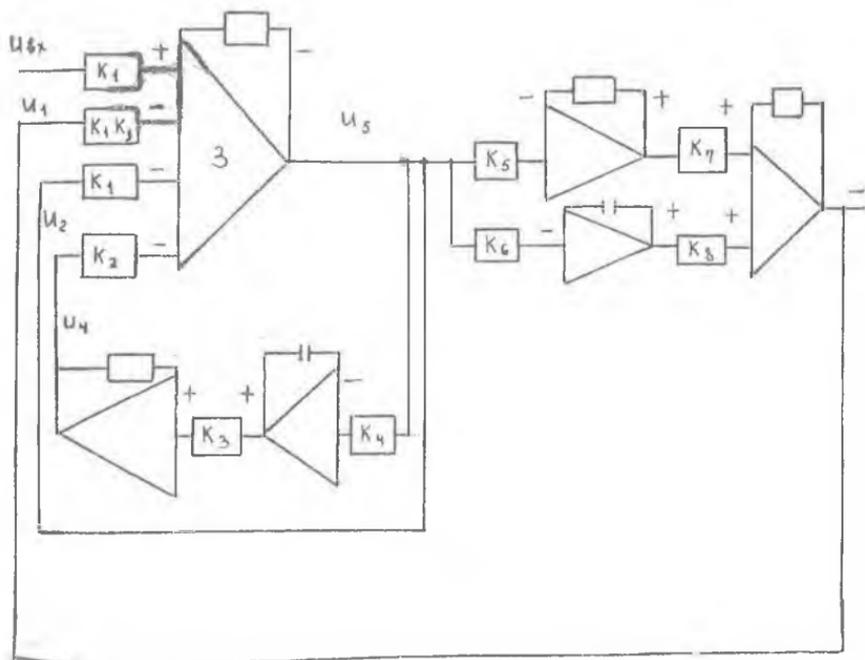


Рис. 3—17. Преобразование схемы набора с целью уменьшения числа входящих интеграторов

чить, если не вводить инвертор, а убрать четвертый усилитель. Все упрощения проведены по правилам структурных преобразований с учетом знаков. В окончательном виде схема набора представлена на рис. 3—17.

§ 3. 5. Методика набора задачи на ЭММ и снятие решения

Подготовленная схема набора САУ должна соответствовать возможностям имеющейся ЭММ.

1. Количество интегрирующих и суммирующих усилителей, необходимое для реализации данной схемы набора не должно превышать количества соответствующих усилителей электронной моделирующей машины.

2. Значения коэффициентов схемы набора должны находиться в допустимых для данной ЭММ пределах.

Работа на ЭММ выполняется в следующей последовательности.

1. Выбрать номера используемых решающих усилителей и входных сопротивлений ЭММ с обязательным указанием этих номеров на схеме набора.

2. Произвести необходимую коммутацию на наборном поле ЭММ согласно схеме набора в соответствии с выбранными номерами усилителей и входных сопротивлений.

3. Выставить коэффициенты решающих усилителей.

4. Подать входное напряжение и снять решение.

5. Построить переходный процесс САУ.

Выбор номеров усилителей и входных сопротивлений производится по схеме набора в зависимости от назначения усилителя и величины коэффициента. В качестве интегрирующих усилителей можно использовать лишь те усилители, у которых в обратной связи включено емкостное сопротивление. Номера таких усилителей известны для каждого типа ЭММ. На схеме набора номера усилителей удобно указывать цифрами внутри треугольника, условно изображающего усилитель. Номер входного сопротивления усилителя выбирается в зависимости от величины коэффициента усиления по данному входу и указывается на схеме набора цифрами рядом с соответствующим входом (рис. П1—4).

Коммутация на наборном поле ЭММ производится специальными проводниками в соответствии со схемой набора и выбранными номерами усилителей и входных сопротивлений. Конструкция наборного поля и методика коммутации имеют свои особенности для различных ЭММ. Следует отметить, что работа на ЭММ, особенно коммутация схемы на наборном поле, должна производиться с особой тщательностью, так как ошибка хотя бы в одном соединении полностью исказит решение. Обнаружить такую ошибку часто сложнее, чем снова собрать схему.

Коэффициенты усиления, указанные на схеме набора, выставляются отдельно для каждого входа усилителя при помощи изменения входного сопротивления усилителя (МН-7) или же за счет введения потенциометров при постоянном входном сопротивлении усилителя (ЭМУ-10, МН-10).

Для снятия решения необходимо на вход набранной схемы по-

дать входное напряжение. В процессе решения может оказаться, что напряжение на выходе какого-либо усилителя будет превышать допустимое для усилителей ЭММ значение. Обнаружить это можно по загоранию специальных лампочек или же подключая поочередно выходы всех усилителей к измерительному прибору. Рекомендуется перед снятием решения подать на вход схемы небольшое напряжение ($\approx 0,1$ от максимально допустимого), определить на выходе какого усилителя напряжение в процессе решения достигает наибольшего значения. Увеличить или уменьшить входное напряжение с тем, чтобы напряжение на выходе этого усилителя в процессе решения не превышало допустимого значения для усилителей данной ЭММ. При малом значении входного напряжения увеличивается ошибка за счет дрейфа нуля усилителей. Для наблюдения решения выход соответствующего усилителя подключается к измерительному прибору (вольтметру) или к индикатору (осциллографу). В ЭММ предусмотрена возможность остановки машины с фиксацией решения через определенные промежутки времени. Это позволяет построить график изменения напряжения по времени.

Построение переходного процесса САУ производится с учетом масштаба представления физической переменной САУ в машинной переменной (напряжении) аналоговой схемы, набранной на ЭММ. Вопрос масштабирования переменных САУ был рассмотрен § 3. 1.

$$M_{x_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вх}}}{x_{\text{вх}}}, \quad M_{x_{\text{вых}}} = M_{x_{\text{вх}}}$$

где $x_{\text{вх}}$ — физическая переменная (входная величина САУ),
 $U_{\text{вх}}$ — входное напряжение, подаваемое на аналоговую схему.

При построении переходного процесса САУ нужно учитывать, что

$$x_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{M_{x_{\text{вых}}}}$$

Переходный процесс САУ строится в реальном астрономическом времени, следовательно,

$$t = \frac{\tau}{m_t},$$

где τ — машинное время.

Следовательно, график, отражающий изменение выходной величины САУ по времени, получается в результате линейной деформации осей графика, изображающего изменение выходного напряжения аналоговой схемы, набранной на ЭММ, в машинном времени.

Несмотря на большое разнообразие электронных моделирующих машин, методика набора задачи на них и снятия решения остается общей. При этом необходимо учитывать индивидуальные особенности каждой конкретной ЭММ. В настоящее время широко распространены следующие типы ЭММ: МН-7, МН-7М, МН-10М, МН-11, МН-14, МН-17М, МН-18, ЭМУ-10 и др., основные характеристики которых сведены в табл. 3—2.

Основные технические характеристики ЭММ

	МН-7	МН-10М	ЭМУ-10	МН-14	МН-17М
Площадь для размещения, м ²	1,5	0,2	2	40	45
Потребляемая мощность, кВт.	1	0,25	2	10	10
Порядок дифференциального уравнения (не выше)	6	10	24	20	80
Погрешность решения % (не выше)	10	10	2-3%	1	0,3
Время решения (не более) сек	200	200	1000	10000	1000

Модели МН-7 и МН-7М, МН-10М являются настольными малогабаритными моделями малой мощности. Они позволяют исследовать процессы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями невысоких порядков. (шестого МН-7 и десятого МН-10). Эти модели имеют сравнительно невысокую точность решения. Модель МН-10М выполнена на полупроводниках. Электронные моделирующие машины МН-14, ЭМУ-10, МН-17М и др. предназначены для тех же целей, но обладают большими возможностями. Моделирующая установка МН-14 позволяет исследовать процессы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями до 20 порядка, ЭМУ-10 — до 24 порядка, МН-17М — до 80 порядка. Моделирующая установка МН-17М рассчитана как на самостоятельную работу, так и на совместную с ЭЦВМ. Обладая весьма большими возможностями (точность решения в 30 раз выше, нежели на модели МН-7, имеются блоки извлечения квадратного корня, блоки тригонометрических функций), она потребляет мощность около 10 кВт и требует для своего размещения помещение площадью около 45 м². Характерным для модели ЭМУ-10 является автоматическая стабилизация нулевого уровня усилителей. Наибольшее применение из-за удобства размещения, обслуживания и достаточных для инженерных целей возможностей находят следующие ЭММ: МН-7, МН-10М, ЭМУ-10.

Глава IV. ИССЛЕДОВАНИЕ САУ НА ЭММ В КОМПЛЕКСЕ С РЕАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Для исследования САУ на ЭММ необходимо иметь математическое описание каждого составного элемента системы. Получение передаточных функций элементов представляет значительные трудности. Кроме того, элементы при исследовании САУ описываются в первом приближении, как правило, линейными дифференциальными уравнениями, хотя в любом реальном элементе САУ всегда имеются нелинейные зависимости (люфт, сухое трение, насыщение, ограничение и т. д.). Упрощая процессы в элементах, представляя их в линейном приближении, заведомо допускаются ошибки. Для того, чтобы избежать математического описания элементов САУ и уменьшить ошибку за счет упрощения процессов, происходящих в элементах, целесообразно при окончательной доводке САУ использовать реально изготовленные элементы. При этом в лабораторных условиях невозможно собрать полностью из реальных элементов некоторые системы. Так, в лаборатории невозможно разместить такие объекты управления, как самолет, корабль, объекты металлургической или химической промышленности и т. п. Однако математическое описание этих объектов в ряде случаев известно. Это позволяет моделировать объекты на ЭММ, используя остальную часть САУ в реальном виде. Моделирование объектов на ЭММ производится в истинном масштабе времени, то есть $m_t = 1$, так как невозможно замедлить или растянуть процессы по времени в реальных элементах САУ. Схематично можно представить такую комплексную схему в виде рис. 4—1. Если все элементы, за исключением объекта управления, изготовлены, и известна передаточная функция самого объекта управления, то можно составить замкнутую САУ, если в качестве объекта управления включить его модель. При этом входной величиной модели объекта, набранной на ЭММ в виде аналоговой схемы, должно быть напряжение. Выходной величиной с модели будет также напряжение. Физические

переменные САУ, обозначенные на рис. 4—1 через x_4 и $x_{\text{ВЫХ}}$, могут быть совсем другой физической природы. Поэтому для нормального функционирования системы необходимы входной и выходной преобразователи к модели, назначением которых является преобразование физической переменной x_4 в машинную переменную (напряжение) в физическую переменную $x_{\text{ВЫХ}}$. Преобразователи вводятся в систему искусственно. В реальной САУ их нет. Поэтому для устранения их влияния на работу системы на ЭММ вместе с передаточной функцией объекта управления моделируются обратные передаточные функции входного и выходного преобразователей.

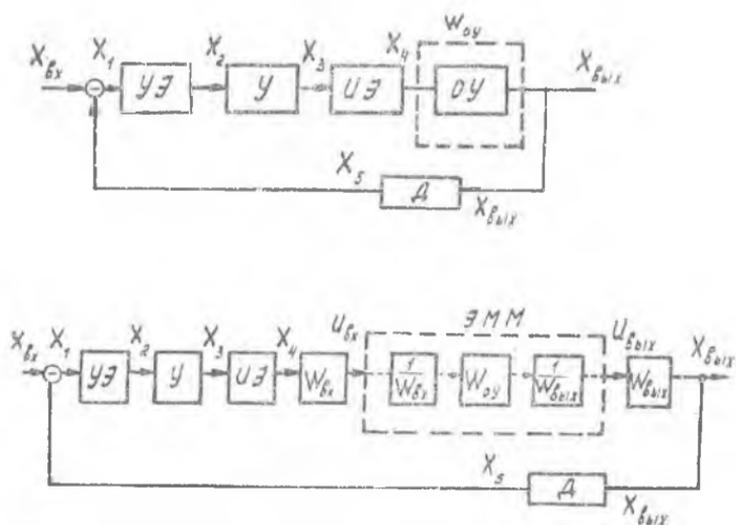


Рис. 4—1. Исследование САУ на ЭММ в комплексе с реальной аппаратурой

В качестве примера рассмотрим упрощенную САУ летательным аппаратом по углу рыскания. Структурная схема системы приведена на рис. 4—2. Если имеются такие элементы как усилитель напряжения (УН), усилитель мощности (УМ), рулевая машинка (РМ), гироскопический датчик (ГД) и известна передаточная функция летательного аппарата $W_{\text{ЛА}}$, то для исследования САУ необходимы входной и выходной преобразователи к модели. В качестве входного преобразователя можно использовать потенциометр, установленный на валу рулевой машинки. Движок потенциометра закреплен на корпусе рулевой машинки. Назначение потенциометра преобразовывать угол поворота вала рулевой машинки в пропорциональное этому углу напряжение. Передаточная функция такого преобразователя имеет вид

$$W_{\text{ВХ}} = k \frac{\text{ВОЛЬТ}}{\text{ГРАДУС}};$$

в предположении, что момент инерции потенциометра значительно меньше момента инерции вала рулевой машинки. Назначением выходного преобразователя является преобразование выходного на-

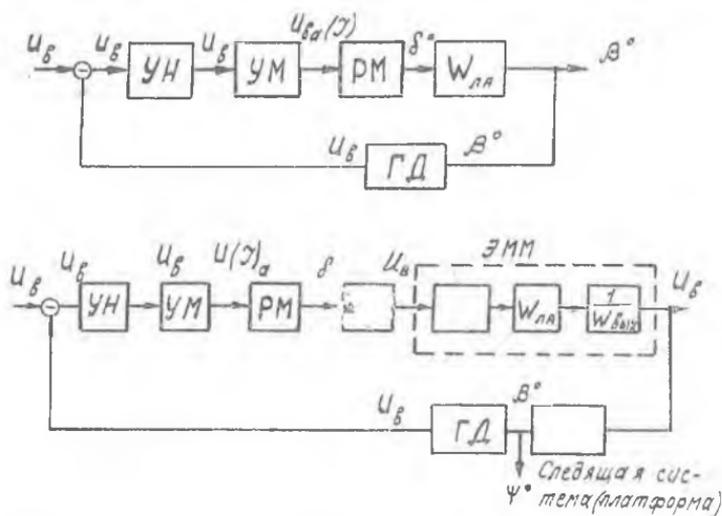


Рис. 4—2. Упрощенная схема САУ летательным аппаратом по каналу рыскания

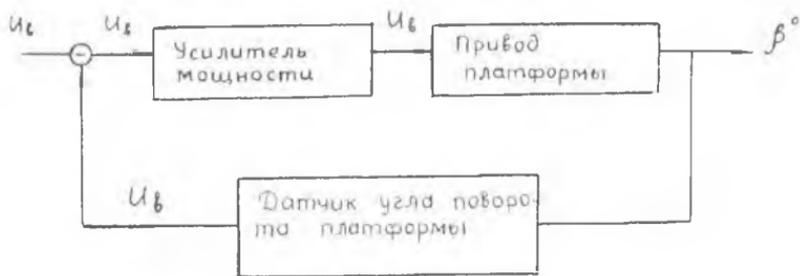


Рис. 4—3. Структурная схема выходного преобразователя (следящая система)

пряжения с модели в пропорциональный ему угол поворота корпуса гироскопического датчика. В качестве такого преобразователя можно использовать специальную следящую платформу с усилителем мощности. Корпус гироскопического датчика закрепляется на платформе. Структурная схема выходного преобразователя приведена на рис. 4—3.

РАБОТА НА ЭММ МН-7

Электронная моделирующая машина МН-7 предназначена для исследования процессов, которые описываются дифференциальными уравнениями не выше шестого порядка. Допускается параллельная работа нескольких моделей. Время решения не более 200 сек. Моделирующая установка МН-7 позволяет моделировать некоторые виды нелинейных зависимостей. Относительная погрешность решения при частотах колебаний до 5 гц не превышает 10% при величине сигнала

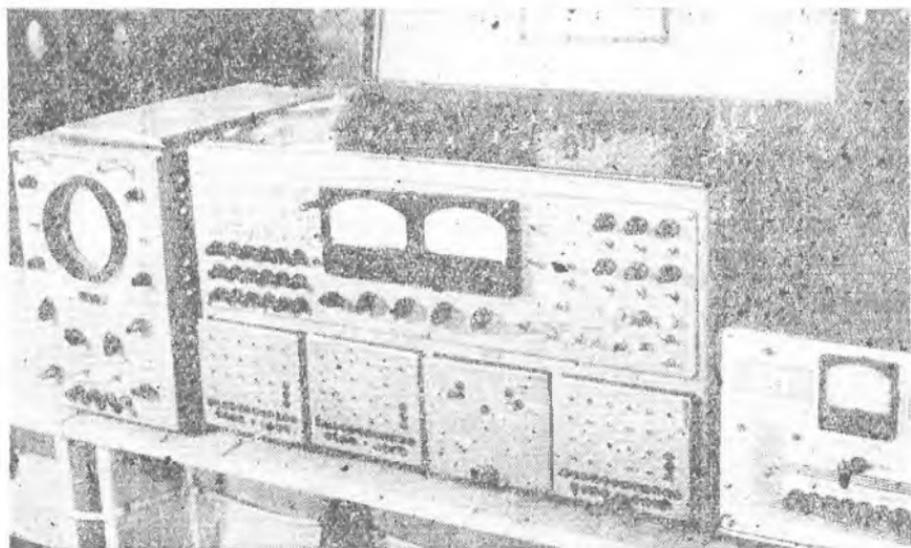


Рис. П1—1. Моделирующая установка МН-7.

100 в. Внешний вид модели МН-7 вместе с блоком питания показан на рис. П1—1. Наборное поле модели показано на рис. П1—2, рис. П1—3. Нижнюю часть модели занимают блоки нелинейностей

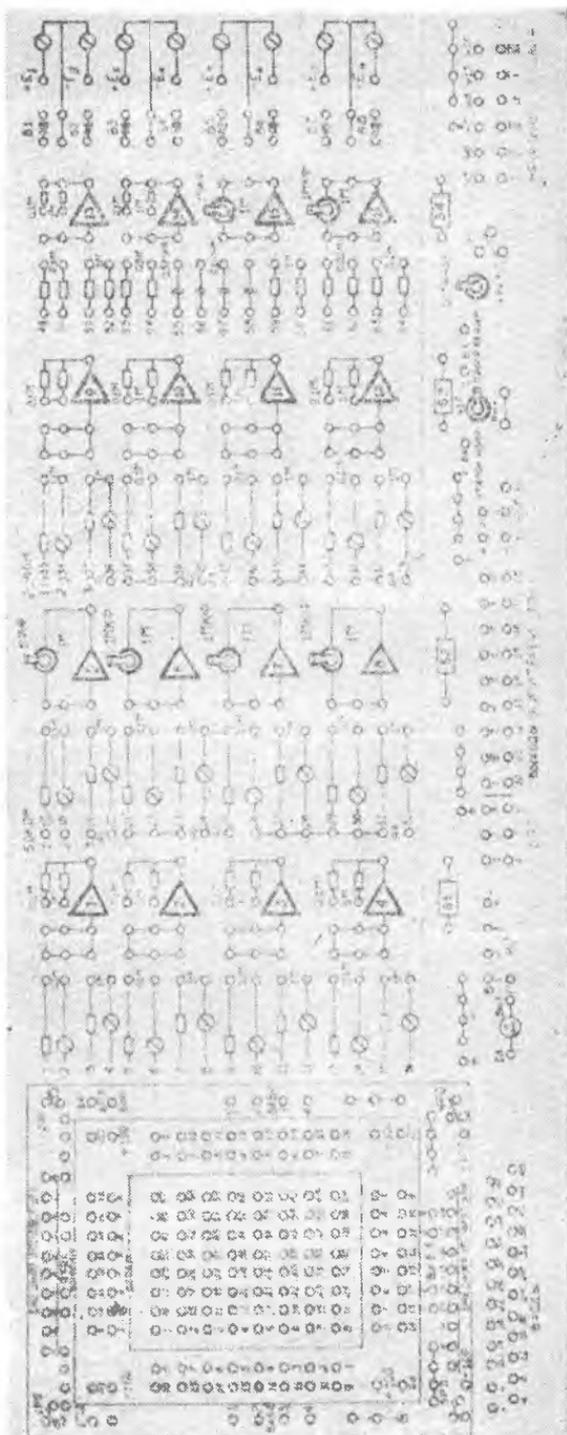


Рис. III—2. Наборное поле модели МН-7

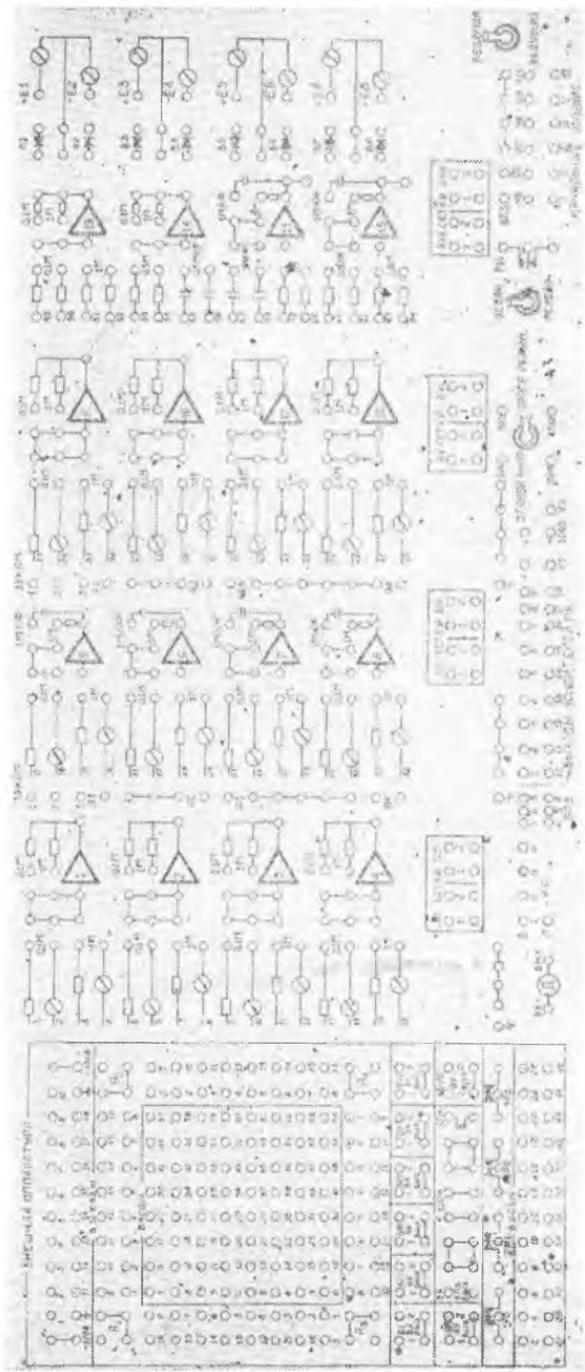


Рис. П1—3. Наборное поле модели МН-7М

III. I. Выбор номеров усилителей и сопротивлений

Моделирующая установка МН-7 имеет шесть интегрирующих усилителей, которые могут работать и как обычные сумматоры, если в обратной связи включить активные сопротивления. Номера этих усилителей: 5, 6, 7, 8, 15, 16. Усилители на приборном поле условно показаны треугольниками. Остальные десять усилителей могут работать только как сумматоры (масштабные усилители, инверторы). Их номера: 1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14. Сопротивления, имеющие номера с 1 по 64, являются входными сопротивлениями для усилителей и сведены в группы по четыре сопротивления. Все эти группы полностью аналогичны. Например, первая группа состоит из сопротивлений 1, 2, 3, 4, вторая аналогичная группа 5, 6, 7, 8 и т. д. Последняя группа из четырех сопротивлений 45, 46, 47, 48. Каждая из этих групп расположена перед каким-либо усилителем, но электрически с ним не связана. Любое сопротивление из любой группы можно использовать в качестве входного сопротивления к любому усилителю. Если в обратной связи усилителя включено активное сопротивление 1 мом или емкостное 1 мкф , то, используя в качестве входного сопротивления верхнее сопротивление группы, равное $0,1 \text{ мом}$, получаем коэффициент усиления

$$k = \frac{z_{oc}}{z_{вх}} = \frac{1}{0,1} = 10.$$

Если в качестве входного сопротивления используется третье сверху сопротивление группы, равное 1 мом , то коэффициент усиления по этому входу $= \frac{R_{oc}}{R_{вх}} = 1$. Второе сверху сопротивление любой группы изменяется в пределах от $0,1 \text{ мом}$ до 1 мом и позволяет получить коэффициент усиления от 10 до 1. Нижнее сопротивление изменяется от 1 мом до 100 мом и позволяет получить коэффициент усиления от 1 до 0,01. Если в обратной связи усилителя вместо 1 мом включить $0,1 \text{ мом}$, то коэффициенты усиления усилителя уменьшатся в десять раз.

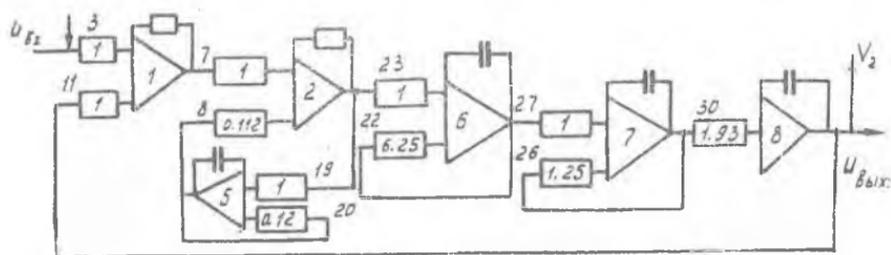


Рис. III—4. Схема набора САУ на МН-7 с указанием номеров используемых усилителей и сопротивлений

Зная значения коэффициентов усиления схемы набора и имея перед собой наборное поле (рис. III—2, рис. 1—3), можно выбрать номера усилителей и входных сопротивлений. Для интегрирующих усилителей можно выбрать любой из шести усилителей (5, 6, 7, 8, 15, 16). Если коэффициент усиления усилителя по какому-то входу равен 10, то выбирается любое верхнее сопротивление, равное $0,1 \text{ мом}$, в группе из четырех сопротивлений. Например: 1, 5, 9, 13, 17 и т. д. Но желательно для сокращения длины коммутационных проводов выбрать сопротивление, расположенное недалеко от усилителя. Если коэффициент равен 1, то в качестве входного сопротивления выбирается сопротивление равное 1 мом (3, 7, 11, 15, 19 и т. д.). Если коэффициент усиления лежит в интервале от 1 до 10, то выбирается входное сопротивление, расположенное в любой группе сопротивлений между сопротивлениями $0,1 \text{ мом}$ и 1 мом (2, 6, 10, 14, 18 и т. д.). Для коэффициентов меньше единицы выбираются сопротивления, расположенные ин-

же сопротивления 1 мом (4, 8, 12, 16, 20 и т. д.). Выбранные номера усилителей и сопротивлений указываются на схеме набора. Для схемы набора, приведенной на рис. П1.....4, выбраны номера усилителей и входных сопротивлений.

П1. 2. Коммутация аналоговой схемы на наборном поле

Коммутация на наборном поле модели производится специальными проводами согласно схеме набора и выбранным номерам усилителей и входных сопротивлений. При этом необходимо проверить наличие цепей обратных связей всех усилителей модели. Для усилителей, работающих в режиме интегрирования, необходимо в обратной связи включить емкостное сопротивление.

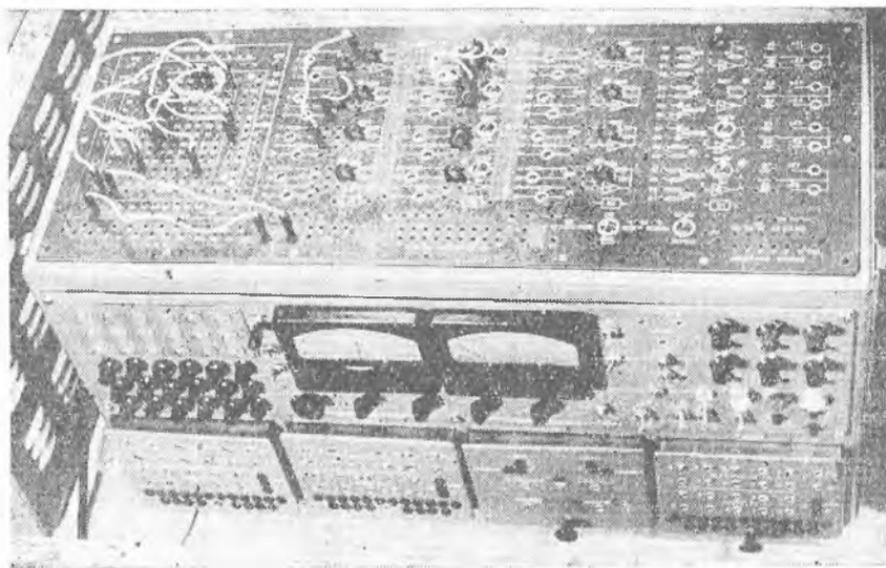


Рис. П1 1—5. Коммутация схемы набора (рис. П1-4) на МН-7

Коммутацию удобно производить в следующей последовательности. Сначала соединить проводами входные сопротивления со входами усилителей, в соответ-

Таблица 1

Коммутация схемы набора (рис. П1—4)			
Сопротивления	Вход усилителя	Выход усилителя	Сопротивления
3,11	1	1	7
7,8	2	2	23,19
19,20	5	5	8,20
22,23	6	6	22,27
26,27	7	7	26,30
30	8	8	
3	напряжение с делителя	8	11, вольтметр

вни со схемой набора. Коммутация производится в средней и правой части наборного поля, за пределами очерченного прямоугольника. Сопrotивления условно показаны шлицами под отвертку или же прямоугольниками. Усилители показаны треугольниками. Для удобства коммутации выходы сопротивлений выведены перед входами усилителей.

Когда все сопротивления соединены со своими усилителями, необходимо соединить выходы усилителей с сопротивлениями согласно схеме набора. Коммутация производится на наборном поле модели в левой части внутри очерченного прямоугольника. Внутри квадрата с надписью «входы» помещены входные клеммы всех входных сопротивлений с 1 по 64. Вокруг этого квадрата расположены четырежды повторенные клеммы выходов усилителей. Выходы усилителей ограничены квадратом с надписью «выходы». На рис. П1—5 показана коммутация схемы набора на рис. П1—4. Для удобства коммутации можно рекомендовать предварительное составление таблицы всех соединений сопротивлений со входами усилителей, и таблицы соединений выходов усилителей с сопротивлениями (со входами сопротивлений). Коммутация в соответствии с первой таблицей производится в средней и правой частях наборного поля за пределами очерченных прямоугольников, коммутация согласно второй таблице производится внутри очерченного прямоугольника. Коммутация для схемы (рис. П1—4) показана в табл. 1.

П1.3. Включение модели

После составления аналоговой схемы на наборном поле модели с помощью коммутационных проводов можно включить модель. Для этого включают блок питания и тумблер «26 в» на лицевой панели модели МН-7. Остальные тумблеры «Установка нуля», «Подготовка», «220 в» должны быть выключены (в нижнем положении) Тумблер 100 «: 10» поставить в положение «100». Тумблер «Однократно—повторно» — в положение «Однократно». Тумблер «—100» поставить в положение «В», при этом клеммы «—100» на наборном поле модели будут записаны напряжением — 100 в.

П1.5. Установка коэффициентов усилителей

В ЭММ используются усилители постоянного тока, для которых характерен дрейф нуля. После прогрева модели в течение 5-10 минут необходимо установить на нуль выходы используемых в работе усилителей. Установка на нуль усилителей производится для получения более точного решения за счет уменьшения ухода нуля. Для некоторых задач эта операция может не производиться, если ошибка за счет дрейфа нуля мало влияет на общий характер процесса. С целью удобства замера выходного напряжения усилителей выходные клеммы усилителей расположены внизу наборного поля слева от клемм вольтметров. Для установки нулей соединить выход настраиваемого усилителя с вольтметром « $+V_1$ ». Клемма « $+V_1$ » расположена внизу наборного поля. Клемму « $-V_1$ » заземлить. **Внимание!** Не перепутать с клеммой «—100 в». Вольтметр « V_1 » имеет переключатель, расположенный слева от вольтметра на лицевой панели. Проверить нуль усилителя в положении переключателя «100 в», затем в положении «2,5 в» и, наконец, в положение «0,1 в». Уход нуля устраняется при помощи потенциометров, имеющих обозначения соответственно номерам усилителей и расположенных на лицевой панели слева.

После установки нулей усилителей тумблер «Установка нуля» поставить в положение «Работа».

П1.5. Установка коэффициентов усилителей.

Чтобы выставить коэффициенты решающих усилителей, необходимо на клеммы соответствующих сопротивлений с надписью «входы», расположенные слева

внизу наборного поля, подать эталонное напряжение. Если коэффициент усиления меньше единицы, то подать 100 в с соответствующих клемм «100 в» наборного поля внутри очерченного квадрата. Если коэффициент усиления больше единицы, то подается 10 в, для чего напряжение 100 в с клеммы наборного поля «100 в» подается на делитель, а с выхода делителя снимается необходимое напряжение 10 в. Переключатели делителя находятся на лицевой панели модели под левым вольтметром. Тумблер «Установка нуля» должен быть в положении «Работа».

Выход усилителя, по отношению к которому сопротивление является входным (выходы усилителей расположены внизу наборного поля), соединяется с вольтметром « V_1 » или « V_2 ». Гнезда вольтметров расположены внизу наборного поля. Если используется вольтметр « V_1 », то клемму « $-V_1$ » следует заземлить. **Внимание!** Не перепутать с клеммой « -100 в», расположенной рядом. Вольтметр « V_2 » имеет переключатель полярности «+», «-» и переключатель шкалы «100, 10». Вращая шлиц настраиваемого сопротивления при помощи отвертки, добиваются равенства выходного напряжения усилителя

$$U = U_{эт} \cdot k$$

где $U_{эт}$ — эталонное напряжение (10 в или 100 в), поданное на входное сопротивление,

U — напряжение на выходе усилителя,

k — коэффициент усиления по данному входу усилителя.

Плавно изменить коэффициент усиления можно только с помощью четных входных сопротивлений (2, 4, 6, ..., 48), которые являются переменными. Остальные сопротивления — постоянные. Они обеспечивают постоянный коэффициент усиления.

После установки коэффициентов усиления поставить тумблер «Подготовка» в положение «Работа».

П 1. 6. Снятие решения

На вход набранной схемы подается входное напряжение. Вопрос выбора величины входного напряжения подробно рассмотрен в разделах 3.1, 3.5. Входное напряжение снимается с делителя напряжения. Выход соответствующего усилителя, с которого снимается необходимый сигнал, соединяется с вольтметром. Включается счетчик времени, для чего необходимо тумблер «220 в» поставить в верхнее положение. После нажатия кнопки «Пуск», расположенной на лицевой панели внизу справа, можно снять решение по вольтметру или осциллографу.

Для снятия решения по точкам можно останавливать модель через каждую секунду. Для этого после нажатия кнопки «Пуск» и загорания лампочки «Пуск» быстро, в течение одной секунды, нажать кнопку «Останов» и держать ее до погасания лампочки «Пуск». Записать показание вольтметра и повторить все действия с нажатия кнопки «Пуск». Для возвращения схемы в исходное положение нажать кнопку «Исходное положение».

Для снятия решения с осциллографа необходимо соединить выход усилителя с гнездами «В1—ИЭЛ» или «В2—ИЭЛ», которые расположены в нижней части наборного поля между клеммами делителя и выходами усилителей.

П 1. 7. Исследование САУ при ненулевых начальных условиях

Ненулевые начальные условия в виде напряжений подаются на интегрирующие усилители при помощи потенциометров и переключателей, расположенных в правом верхнем углу лицевой панели модели. Напряжения, соответствующие начальным условиям, подаются на гнезда интеграторов, расположенные в правом нижнем углу наборного поля. Контроль за величиной и знаком напряжения интегрирующих усилителей осуществляется по вольтметру.

РАБОТА НА ЭММ МН-10М

Современная электронная моделирующая машина МН-10М выполнена на полупроводниках и отличается малыми габаритами. Предназначена для исследования процессов, которые описываются дифференциальными уравнениями не выше пятого порядка. Допускается параллельная работа нескольких моделей. Мо-

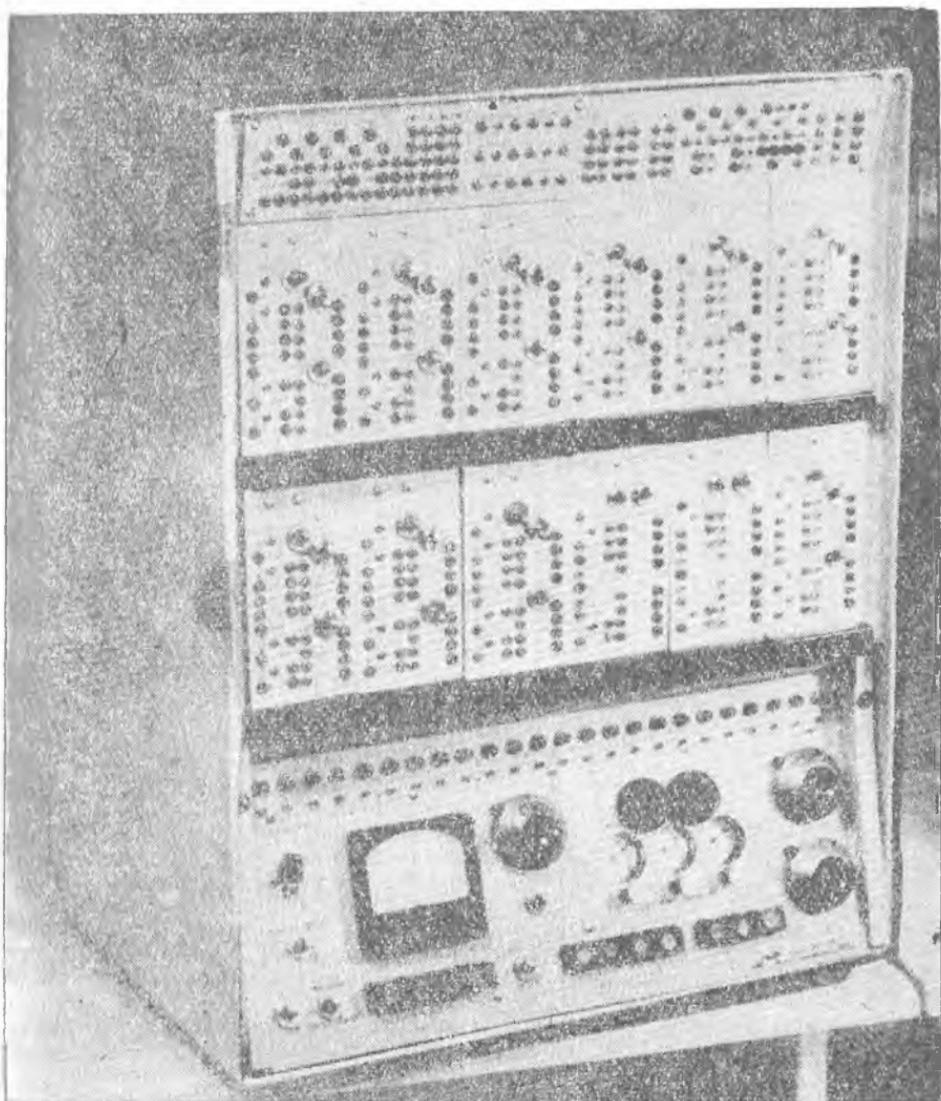


Рис. П2—6. Моделирующая установка МН-10М

делирующая установка позволяет моделировать некоторые виды нелинейных зависимостей. Время решения не более 200 сек. Относительная погрешность решения не превышает 10%. Линейная характеристика усилителей от -25 до +25 вольт. Внешний вид модели МН-10М показан на рис. П2—6.

Для исследования линейных САУ на МН-10М необходимо вставить в модель блоки интегрирования и суммирования БИС-1. (При исследовании нелинейных систем могут быть использованы специальные блоки, вставляемые в одну или несколько ячеек модели. Каждый блок рассчитан на работу с двумя усилителями постоянного тока, имеющими условные обозначения в виде треугольников с номерами 1 или 2. Входные сопротивления блоков БИС-1 могут быть подключены к любому усилителю машины. Для сокращения длины коммутационных проводов желательно использовать сопротивления с усилителем, клеммы которого выведены на одном блоке с сопротивлением. Все блоки являются взаимозаменяемыми. Любой блок можно вставить в любую из двенадцати ячеек модели. Исключение составляет операция интегрирования. Ее можно производить в ячейках с 1 по 10. Если в качестве входных сопротивлений к усилителям использовать постоянные сопротивления, то в зависимости от величины входного сопротивления и сопротивления обратной связи можно получить коэффициенты усиления 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 1; 2; 4; 5; 10

$$k = \frac{Z_{oc}}{Z_{вх}} = \frac{R_{oc}}{R_{вх}}$$

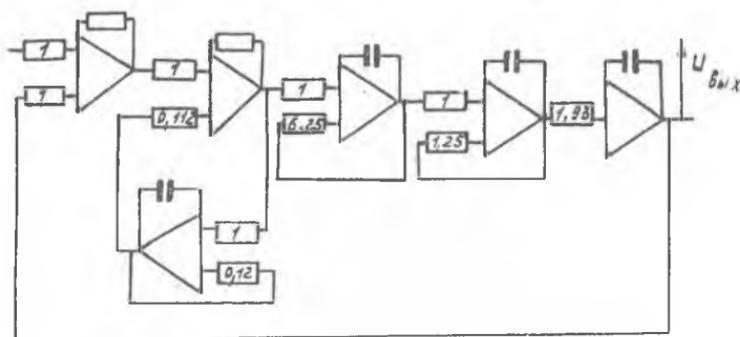


Рис. П2—7. Схема набора САУ на МН-10М

Если в обратной связи включена емкость, то приведенную формулу для подсчета коэффициента усиления для емкости 1 мкф в числитель подставляется единица. В том случае, если коэффициент усиления по какому-либо входу отличен от указанных выше значений, необходимо использовать потенциометр. Так как сигнал, снимаемый с потенциометра, всегда меньше сигнала, подаваемого на потенциометр, то для коэффициентов больше единицы выход потенциометра соединяется со входом усилителя (с таким входным сопротивлением), который дает коэффициент усиления 10. Таким образом, на МН-10М можно выставлять коэффициенты от 0,01 до 10. На рис. П2—7 показана схема набора САУ на МН-10М.

Коммутация производится на модели специальными проводами в соответствии со схемой набора. На рис. П2—8 показана коммутация на МН-10М схемы набора (рис. 2—7). Когда все сопротивления соединены со своими усилителями, а выходы усилителей с сопротивлениями согласно схеме набора, необходимо включить модель и выставить нули усилителей. Включается блок питания тумблером на лицевой панели блока питания. При перерушке источников питания про-

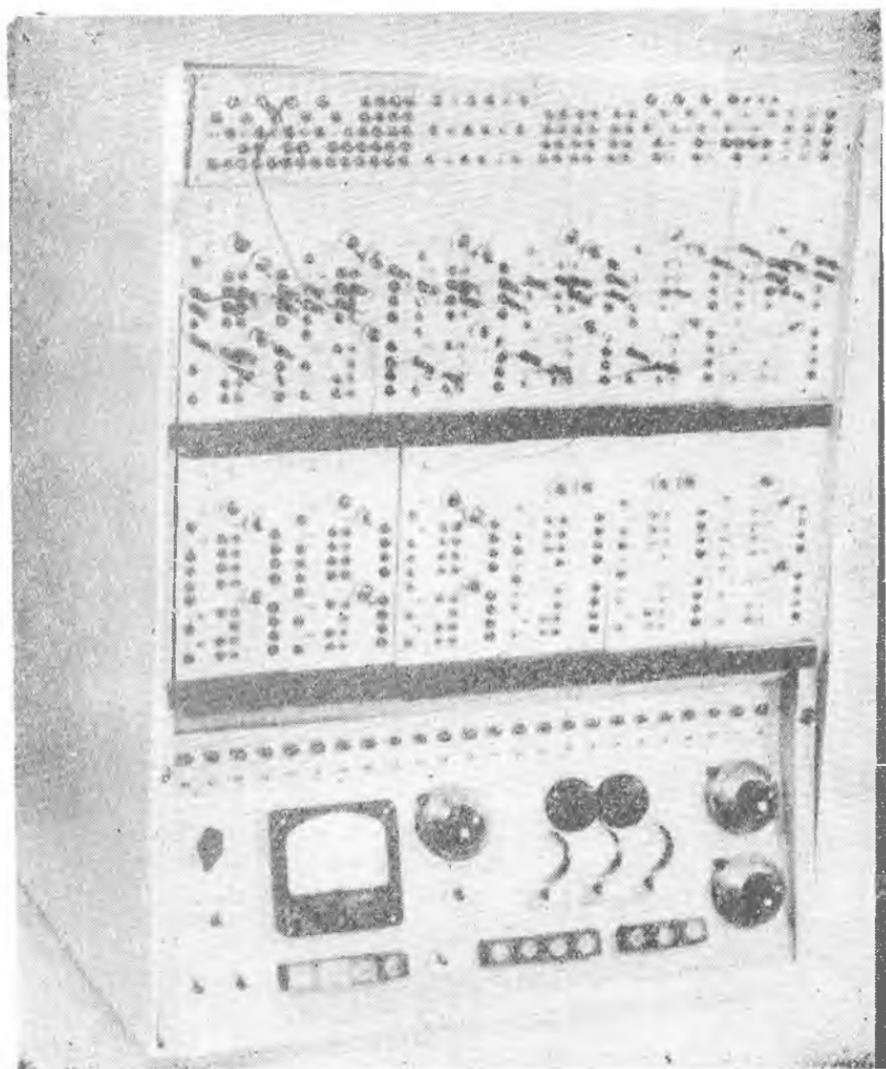


Рис. П2—8. Коммутация схемы набора (рис. П2—8) на МН-10М

изводится автоматическое их отключение. После устранения причины перегрузки источники подключаются к модели нажатием кнопки «Вкл» на лицевой панели блока питания.

П2. 1. Установка нулей усилителей

Для установки нулей усилителя необходимо нажать клавиши «У» внизу лицевой панели модели. Обратит внимание на сигнальные лампочки усилителей. В нормальном режиме лампочки не должны гореть. Нули усилителей настраиваются по шкале 0,5 вольт. Тумблер «Прямое измерение — Компенсационное измерение» ставится в положение «Прямое измерение». Искреключателем «Выбор ячейки» и тумблером «Выбор усилителя» выбирается выход контролируемого усилителя и клавиатурой выбора шкалы прибора включается сначала шкала 50 в, а затем 0,3 в.

Нуль усилителей настраивается при помощи потенциометров, расположенных под сигнальными лампочками. Контроль за выходом усилителей из режима осуществляется с помощью сигнальных лампочек Л1 — Л24. Нули интегрирующих усилителей следует настраивать в режиме интегрирования. Для перевода усилителя в режим интегрирования следует поставить тумблер «Входы БИС — Интегрирование» в положение «Интегрирование». Затем после установки нулей тумблер ставится в положение «Входы БИС».

Установка на нуль усилителей производится с целью получения более точного решения за счет уменьшения ухода нуля. Для некоторых задач эта операция может не производиться, если ошибка за счет дрейфа нуля мало повлияет на общий характер процесса.

П2. 2. Настройка коэффициентов усилителей

Настройка усилителей производится при нажатом клавише «Н». Выход настраиваемого усилителя подключается к измерительному прибору при помощи переключателя «Выбор ячейки» и тумблера «Выбор усилителя». Если, например, необходимо подключить к измерительному прибору выход второго усилителя из четвертой ячейки, то переключатель «Выбор ячейки» ставится в положение 4, а тумблер «Выбор усилителя» в положение 2. Измерения производятся компенсационным методом. Тумблер «Прямое измерение — Компенсационное измерение» ставится в положение «Компенсационное измерение». На соответствующий вход, по которому настраивается заданный коэффициент усиления, подается эталонное напряжение. Датчиками эталонных напряжений в режиме настройки являются усилители, расположенные в ячейках 11 и 12. Усилители 11—2 и 12—1 выдают независимые напряжения x_1 и x_2 со знаком плюс, а усилитель 12—2 выдает напряжение x_2 со знаком минус. Диапазон изменения напряжений x_1 и x_2 от 0 до 25 вольт. Величины напряжений x_1 и x_2 регулируются при помощи потенциометров, расположенных справа внизу лицевой панели модели. Если настраиваемый коэффициент усиления меньше единицы, то на вход подается эталонное напряжение 25 в (для удобства расчета можно подавать 20 в). Если настраиваемый коэффициент усиления больше единицы, то на вход подается такое напряжение, чтобы на выходе усилителя напряжение не превышало по абсолютной величине 25 в.

Вращая шлиц настраиваемого потенциометра, добиваются величины выходного напряжения усилителя

$$U = U_{эт} k,$$

где $U_{эт}$ — эталонное напряжение,
 U — напряжение на выходе усилителя,
 k — коэффициент усиления.

П2. 3. Снятие решения

На вход исследуемой системы подать входное напряжение. Вопрос выбора величины входного напряжения подробно рассмотрен в параграфах 3.1 и 3.5. Выход соответствующего усилителя, с которого снимается интересующий сигнал, соединяется с измерительным прибором при помощи переключателя «Выбор ячейки» и тумблера «Выбор усилителя». Для схемы (рис. П2—7) для наблюдения выходной величины необходимо переключатель поставить в положение 5, а тумблер в положение 1.

Нажать клавиш «Р». Для наблюдения решения по индикатору, шкале измерительного прибора, для записи его на шлейфовом осциллографе и т. д., то есть для непрерывного решения необходимо задать по шкале измерителя времени время решения. Решение начинается после нажатия клавиша пуска «П» и заканчивается по истечении заданного времени. Внешние измерительные приборы и индикаторы подключаются к выходу соответствующего усилителя. Внешние приборы должны обладать большим внутренним сопротивлением и потреблять ток не более 10 ма. Для повторного решения нажимается клавиш исходного положения «ИИ» и затем клавиш «П». В модели предусмотрена возможность остановки с фиксацией решения в любой момент времени при помощи клавиша остановки «О». Продолжение решения задается клавишем «П». Это позволяет зафиксировать решение в интересующих точках. При помощи измерителя времени можно снимать решение по точкам с определенным интервалом (0,1 сек до 100 сек). Для замера величины напряжения во время фиксации решения целесообразно пользоваться компенсационным методом при помощи измерительного прибора модели, что увеличивает точность решения.

П2. 4. Исследование САУ при ненулевых начальных условиях

Ненулевые начальные условия в виде напряжений подаются на интегрирующие усилители при помощи соответствующих потенциометров «ПНУ» и переключателей полярности. Контроль осуществляется по измерительному прибору модели в режиме компенсационного измерения. При этом должен быть нажат клавиш «Н».

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

РАБОТА НА ЭММ ЭМУ-10

Современная электронная моделирующая машина ЭМУ-10 предназначена для исследования процессов, которые описываются нелинейными дифференциальными уравнениями до 24 порядка включительно. Время решения до 1000 сек. Некоторые операции автоматизированы. При работе на ЭМУ-10 автоматически поддерживаются нули на выходе усилителей. Потенциометры, служащие для выставки коэффициентов усилителей делятся в модели на ручные (4), (5) и автоматические. На автоматических потенциометрах выставка коэффициентов производится автоматически при помощи специальной следящей системы. Линеиная характеристика усилителей в диапазоне от -100 в до $+100$ в. Внешний вид модели показан на рис. П3—9 и рис. П3—10. Установка имеет сменные наборные поля, что позволяет производить набор схем одновременно для нескольких задач отдельно от модели на специальных столах. Усилительные блоки (2) вставляются в модель в ячейки, расположенные двумя вертикальными рядами слева и справа. Каждый блок содержит четыре усилителя. Все блоки взаимозаменяемы. Рядом с ячейками усилителей расположены (также вертикальными рядами) ячейки, для блоков цепей обратных связей. Для решения линейных задач в ячейки обратных связей вставляются линейные блоки.

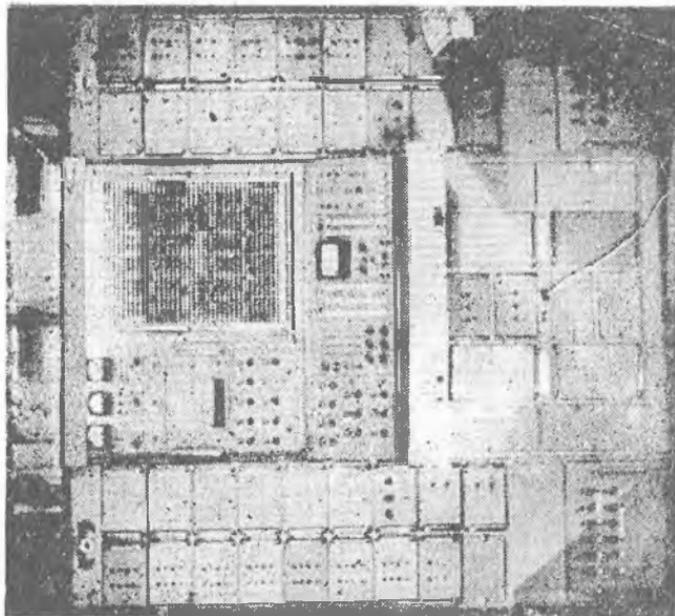


Рис. ПЗ—10. Электронная моделирующая машина ЭМУ-10

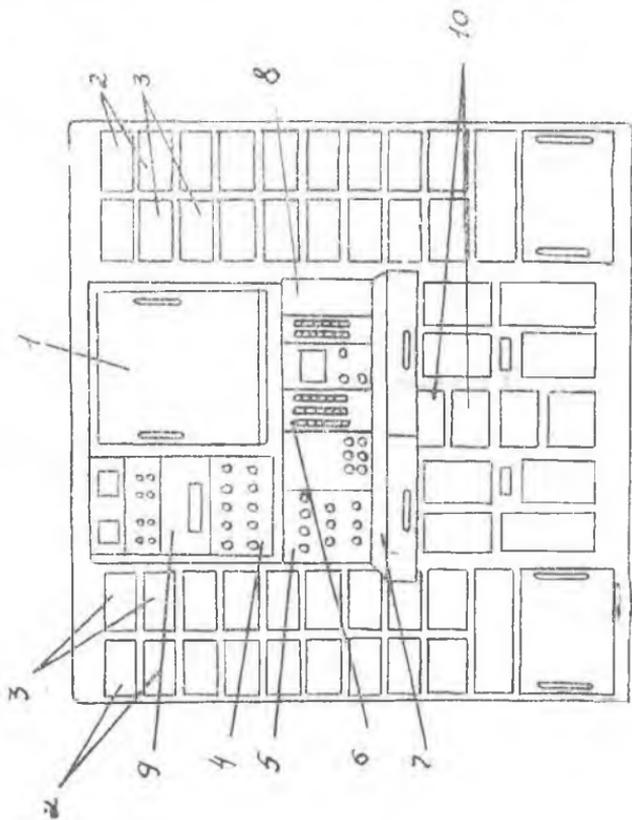


Рис. ПЗ—9. Электронная моделирующая машина ЭМУ-10.

ПЗ. 1. Выбор номеров усилителей

Моделирующая установка ЭМУ-10 имеет двадцать четыре интегрирующих усилителя, которые могут работать как интеграторы или как обычные сумматоры. Номера этих усилителей нечетные — с 1 по 47. Остальные — четные усилители со 2 по 48 могут работать только как сумматоры (масштабные усилители, инверторы). Усилитель имеет 6 входов с коэффициентами 1, 5, 10. Четные усилители позволяют при помощи специальных коммутаций уменьшить в десять раз коэффициенты усиления по каждому входу, то есть сделать их равными 0,1; 0,1; 0,1; 0,5; 1. Если коэффициент усиления по какому-либо входу отличен от 0,1; 1; 5; 10, то необходимо использовать потенциометры. Так как сигнал, снимаемый с потенциометра, всегда меньше сигнала, подаваемо-

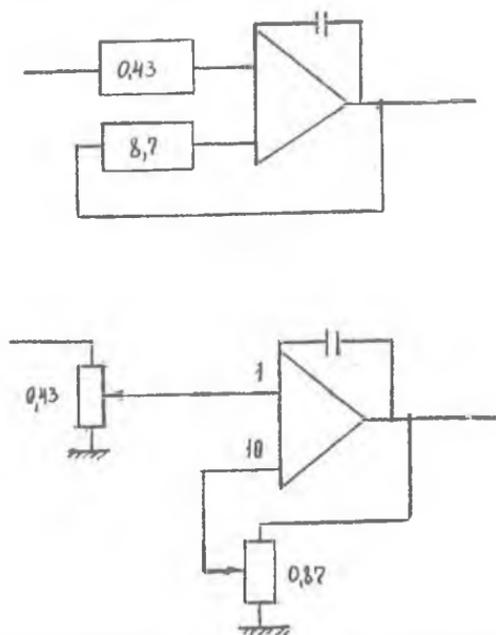


Рис. ПЗ—11. Пример подготовки аналоговой схемы к набору на ЭМУ-10.

го на потенциометр, то для коэффициентов больше единицы выход потенциометра соединяется со входом усилителя, коэффициент усиления которого равен 5 или 10. Соответственно на потенциометре выставляется величина коэффициента в 5 или 10 раз меньше, чем задано по схеме набора. На рис. ПЗ—11 показан участок схемы набора, составленный применительно к модели ЭМУ-10.

ПЗ. 2. Наборное поле ЭМУ-10

Наборное поле модели показано на рис. ПЗ—12. Усилители на наборном поле условно показаны в виде прямоугольников. Номер усилителя указан в белом кружке в верхней части прямоугольника, изображающего усилитель. В нечетных усилителях имеется гнездо с надписью «И». Если вставить штырь с ребристой ручкой в это гнездо, усилитель переводится в режим интегрирования. Если не вставлять штыря, то усилитель будет работать как сумматор. Четные

усилители имеют гнездо «Х О, 1». Если вставить штырь в это гнездо, то все коэффициенты по каждому входу данного усилителя уменьшатся в десять раз. Коммутационный штырем можно заменить соединением гнезда при помощи специального коммутационного провода с гнездом «Земля». Гнезда «Земля» на наборном поле окрашены в черный цвет. У каждого усилителя слева имеются окрашенные в голубой цвет входы усилителя с фиксированным коэффициентом усиления по каждому входу (1, 1, 1, 5, 5, 10). Выходы усилителя соединены между собой и окра-

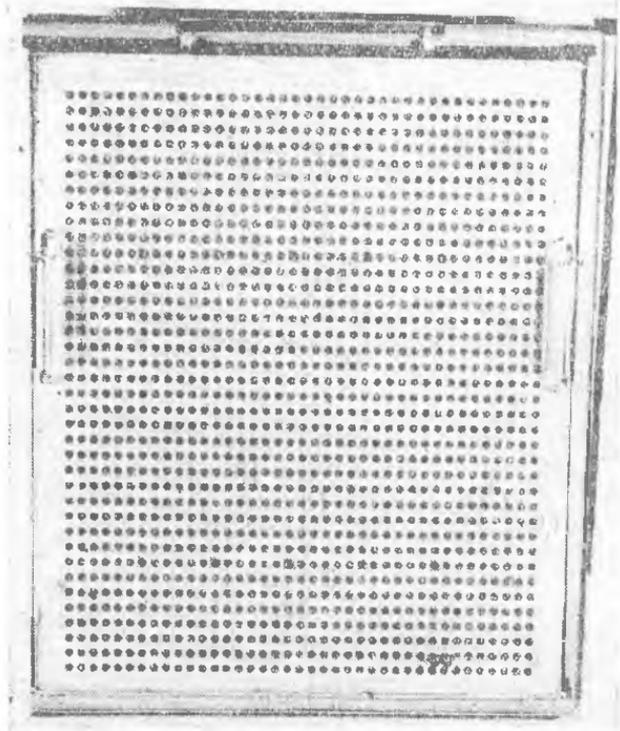


Рис. ПЗ—12. Сменное наборное поле ЭМУ-10.

шены в красный цвет. Потенциометры окрашены в желтый цвет и имеют метки «Р» или «А», что указывает на способ установки коэффициента передачи потенциометра (ручной или автоматический). Кроме того, указан номер потенциометра. Выбирать для схемы набора можно любой потенциометр. Для сокращения длины коммутационных проводов желательно выбирать потенциометры, расположенные на наборном поле недалеко от усилителей.

При использовании автоматических потенциометров необходимо проверить их наличие в модели. Номера автоматических потенциометров, имеющих в модели, можно посмотреть под пультом управления (10) над блоками автоматических потенциометров. На наборном поле имеются потенциометры с тремя гнездами, при использовании которых нижнее гнездо заземлено в модели. При использовании потенциометров с двумя гнездами (третье гнездо заземлено в модели) необходимо помнить, что входной сигнал на потенциометр подается на левое или верхнее гнездо, снимается сигнал с потенциометра (движок потенциометра) с гнезда, расположенного справа или снизу. В противном случае можно вывести потенциометр из строя. Для участка схемы набора (рис. ПЗ—11) на рис. ПЗ—13 показана коммутация на наборном поле модели.

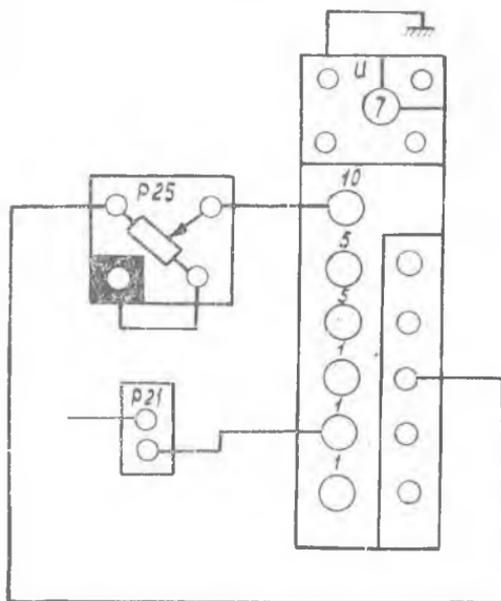
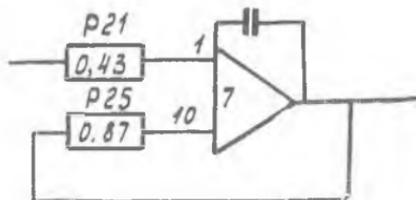


Рис. ПЗ—13. Коммутация на наборном поле ЭМУ-10 участка схемы (рис. 2—12)

ПЗ. 3. Коммутация аналоговой схемы на наборном поле

После выбора номеров усилителей и потенциометров, используемых в работе, коммутация на наборном поле производится специальными проводами в соответствии со схемой набора. На рис. ПЗ—14 показана схема набора, а на рис. ПЗ—15 — коммутация этой схемы на наборном поле ЭМУ-10. Перед решением необходимо вставить штыри в заштрихованные гнезда «Земля». Расположены они в нижней части наборного поля. Для замены наборного поля модели необходимо повернуть на себя рычаг, расположенный внизу слева от наборного поля, и вставить новое наборное поле.

ПЗ. 4. Включение модели ЭМУ-10

На пульте справа нажать кнопку «Вкл». Загорится лампочка «220» и начнут работать вентиляторы.

После 2—3 минут прогрева включить тумблер «Вкл». Загорится лампочка «Питание усилителей».

Для подачи напряжения +100 в и —100 в на наборное поле необходимо нажать на пульте крайнюю справа кнопку. Загорится лампочка «100». При повтор-

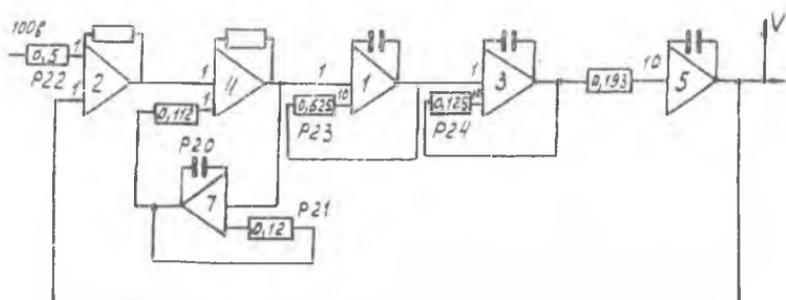
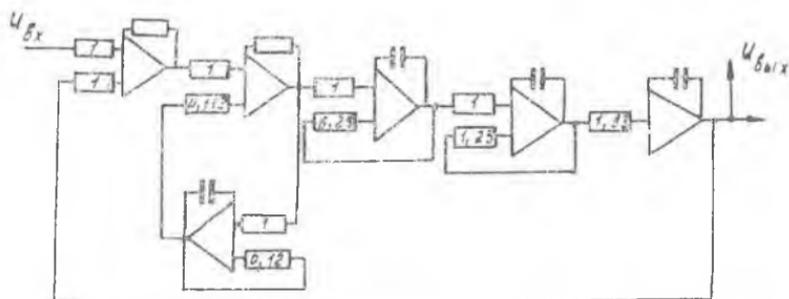


Рис. ПЗ—14. Схема набора САУ на ЭМУ-10

ном нажатии этой кнопки отключается напряжение $+100$ в и -100 в от наборного поля и гаснет лампочка «100».

Внимание! Все коммутации на наборном поле модели и смена наборных полей производится при отключенном напряжении ± 100 в.

ПЗ.5. Установка коэффициентов потенциометров

Ручные потенциометры выставляются при помощи ручек и дисков, указывающих величину коэффициента передачи. Ручки и диски падают над нулем слева (4), (5). Величина коэффициентов изменяется от 0,001 до 1.

Чтобы выставить автоматические потенциометры, на пульте тумблер «Коэффициенты — Откл. — Усилители» ставится в положение «Коэффициенты». На двухрядных клавишах набирается номер потенциометра. На трехрядных клавишах (6) устанавливается величина коэффициента (от 0,001 до 0,999). Нажимается кнопка «Пуск» над клавишами. После погасания лампочки «Разбаланс» потенциометр будет иметь заданный коэффициент передачи.

ПЗ. 5. Снятие решения

Для подачи на вход схемы напряжения, о величине которого подробно говорилось в параграфах 3.1 и 3.5, необходимо напряжение 100 в с соответствующих гнезд наборного поля подать на потенциометр. Изменяя величину коэффи-

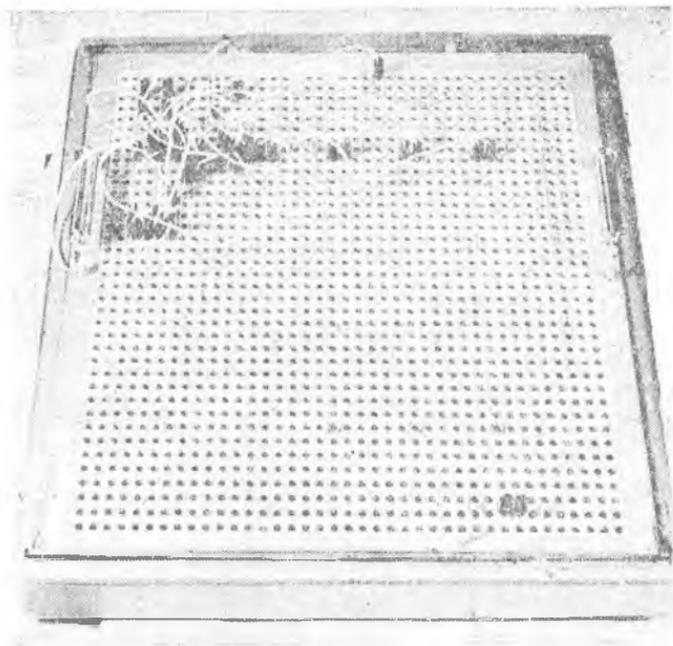


Рис. 113—15. Коммутация схемы набора (рис. 113—14) на ЭМУ-10

инвента передачи потенциометра, можно получить на выходе потенциометра необходимое напряжение

$$U = 100 \text{ В}$$

Выход соответствующего усилителя, с которого снимается интересный сигнал, соединяется с измерительным прибором V_1 или V_2 при помощи проводов и гнезд « V_1 » и « V_2 », расположенных в нижней части наборного поля. Кроме того можно подключить любой усилитель к измерительным приборам V_1 и V_2 при помощи селектора. Для этого переключатель «Коэффициенты — Откл. — Усилители» ставится в положение «Усилители». На двухрядных клавишах набирается номер усилителя. Переключатели измерительных приборов V_1 и V_2 ставятся в положение «Селектор» (среднее положение). Если поставить эти переключатели в положение « V_1 » и « V_2 », то измерительные приборы V_1 и V_2 подключаются при этом к гнездам « V_1 » и « V_2 » наборного поля. Измерительным прибором V_1 является цифровой вольтметр. Измерение по индикатору V_2 производится компенсационным методом.

Перед снятием решения необходимо нажать клавишу «Возврат», при этом схема будет в исходном заданном состоянии. Затем нажать клавишу «Останов». Возможны два режима работы модели. Ручное управление, если тумблер «Ручное-Автоматическое» находится в положении «Ручное». При этом после нажатия клавиши «Пуск» решение будет продолжаться до момента нажатия клавиши «Останов». При повторном нажатии клавиши «Пуск» решение будет продолжаться. Для возвращения схемы в исходное положение необходимо нажать клавишу «Возврат». Если тумблер «Ручное-Автоматическое» находится в положении «Автоматическое», то пуск модели осуществляется также нажатием клавиши «Пуск». Остановка с фиксацией решения произойдет при достижении заданного на счетчике времени. Время останова задается на счетчике времени при помощи пере-

ключателей. Время решения и остановок можно фиксировать по лампочкам счетчика. Можно наблюдать решение в режиме периодизации, для чего задать на счетчике интервал времени, по истечении которого необходимо повторение решения и нажать клавиш «Период».

ПЗ. 7. Исследование САУ при ненулевых начальных условиях

Ненулевые начальные условия в виде напряжений подаются на интегрирующие усилители при помощи потенциометров. Напряжение с потенциометров подается на входы усилителей «ИУ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойков А. Д. Инженерные методы анализа линейных систем автоматического управления. КуАИ, 1968.
2. Бойков А. Д. Идентификация линейных многомерных объектов автоматического управления ортогональным методом моментов. Труды КуАИ, вып. 24, 1966.
3. Бойков А. Д. Анализ линейных многомерных систем автоматического управления ортогональным методом моментов, Труды первой Поволжской конференции по автоматическому управлению «Алгоритмизация и автоматизация процессов и установок», вып. 1. Куйбышев, 1970.
4. Бойков А. Д. Расчеты динамических характеристик линейных многомерных объектов автоматического управления ортогональным методом по статистическим данным с использованием вычислительных машин, Тезисы докладов первой республиканской научно-методической конференции по энергетике, автоматике и электронике, МВССО, Каз. ССР. Алма-Ата, 1967.
5. Бойков А. Д. Некоторые вопросы идентификации многомерных нестационарных линейных объектов управления. В сб. «Приборы и устройства автоматического управления и контроля», ПИИ, Пенза, 1970.
6. Бойков А. Д. Определение динамических характеристик линейных многомерных объектов управления априорным методом моментов. Материалы Поволжской конференции по автоматическому управлению. Книга первая «Теория автоматического управления», Татарское книжное издательство, Казань, 1971.
7. Бойков А. Д. Определение динамических характеристик линейных многомерных объектов автоматического управления в режиме нормальной эксплуатации. Тезисы докладов научно-технической конференции КуАИ, Куйбышев, 1967.
8. Бойков А. Д., Дмитриев А. И., Егупов Н. Д. Ортогональный принцип построения аналитических самонастраивающихся систем автоматического управления. В сб. «Автоматические измерительные и регулирующие устройства», научные труды вузов Поволжья, вып. 4, 1968.
9. Бойков А. Д., Закаблукровский В. Д., Априорный метод коррекции линейных систем автоматического управления. В сб. «Автоматическое управление и регулирование в различных отраслях народного хозяйства», вып. 1. Научные труды вузов Поволжья, Куйбышев, 1971.
10. Бойков А. Д., Закаблукровский В. Д., Яковлев В. П. Идентификация объектов и систем автоматического управления по статистическим данным. Материалы научно-технической конференции КуАИ, Куйбышев, 1970.

11. Бойков А. Д., Сеницын В. П., Сафонова Л. В. Методы расчета частотных характеристик систем автоматического управления с применением ЦВМ. Материалы научно-технической конференции КуАИ, Куйбышев, 1970.

12. Васильев Д. В., Филиппов Г. С. Основы теории и расчета следящих систем. Госэнергоиздат, 1959.

13. Гутенмахер Л. И. Электрические модели. Изд-во АН СССР 1949.

14. Кампе-Немм А. А. Решение инженерных задач на электронных моделирующих машинах. Изд-во «Энергия», 1970.

15. Колпакова П. П. Вопросы синтеза многосвязных систем управления. Труды второго Всесоюзного совещания по вопросам инвариантности. Изд-во «Наука», 1966.

16. Коган Б. Я. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. Физматгиз, 1963.

17. Корн Г., Корн Т. Электронные моделирующие устройства. Изд-во «Иностранная литература», 1955.

18. Корн Г., Корн Т. Электронные аналоговые и аналогоцифровые вычислительные машины. Теория и основные функциональные блоки. Изд-во «Мир», 1967.

19. Малнев Ю. Н. Электронные математические машины. КуАИ, 1962.

20. Печорина И. П. Расчет систем автоматического управления. Машгиз, 1962.

21. Симою М. П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования. «Автоматика и телемеханика», № 6, 1957.

22. Солодовников В. В. (ред.). Техническая кибернетика, кн. 1, 2. Машгиз, 1967.

23. Солодовников В. В., Усков А. С. Статистический анализ объектов регулирования», Машгиз, 1960.

24. Солодовников В. В., Усков А. С. Частотный метод определения динамических характеристик по данным их нормальной эксплуатации. «Автоматика и телемеханика», № 12, 1959.

25. Шаталов А. С. Структурные методы в теории управления и электроавтоматики. Госэнергоиздат, 1962.

26. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. Изд-во «Энергия», 1969.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Структурные преобразования САУ	5
§ 1. 1. Метод структурных преобразований	5
§ 1. 2. Метод графов	16
Глава II. Анализ и синтез САУ	20
§ 2. 1. Анализ САУ методом ортогональных разложений	20
§ 2. 2. Построение логарифмических частотных характеристик разомкнутой САУ	25
§ 2. 3. Исследование САУ на устойчивость и качество переходного процесса по ЛЧХ	27
§ 2. 4. Коррекция САУ	30
Глава III. Исследование САУ с использованием ЭММ	40
§ 3. 1. Выбор масштаба времени и масштабирование переменных САУ	40
§ 3. 2. Решающие элементы электронных моделирующих машин	44
§ 3. 3. Составление схем набора и расчет коэффициентов по дифференциальному уравнению	50
§ 3. 4. Составление схемы набора и расчет коэффициентов по структурной схеме САУ	53
§ 3. 5. Методика набора задачи на ЭММ и снятие решения	60
Глава IV. Исследование САУ на ЭММ в комплексе с реальными элементами	63
Приложение 1. Работа на ЭММ МН-7	66
П1. 1. Выбор номеров усилителей и сопротивлений	69
П1. 2. Коммутация аналоговой схемы на наборном поле	70
П1. 3. Включение модели	71
П1. 4. Установка нулей усилителей	71
П1. 5. Установка коэффициентов усилителей	71
П1. 6. Снятие решения	72
П1. 7. Исследование САУ при ненулевых начальных условиях	72
Приложение 2. Работа на ЭММ МН-10М	73
П2. 1. Установка нулей усилителей	76
П2. 2. Настройка коэффициентов усилителей	76
П2. 3. Снятие решения	77
П2. 4. Исследование САУ при ненулевых начальных условиях	77
Приложение 3. Работа на ЭММ ЭМУ-10	77
П3. 1. Выбор номеров усилителей	79
П3. 2. Наборное поле ЭМУ-10	79

ПЗ. 3. Коммутация аналоговой схемы на наборном поле	81
ПЗ. 4. Включение модели ЭМУ-10	81
ПЗ. 5. Установка коэффициентов потенциометров	82
ПЗ. 6. Снятие решения	82
ПЗ. 7. Исследование СЛУ при ненулевых начальных условиях	84
Литература	85