

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО
РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Методические указания

Куйбышев 1990.

Составители: к.т.н. В.Д.Закаблукровский, к.т.н. Ю.Н.Лазарев

УДК 62.5 (075)

Аналоговое моделирование САУ. Исследование влияния коэффициента усиления на устойчивость и качество работы системы: Метод. указания к лабораторной работе /Куйбышев. авиац. ин-т; Сост. В.Д.Закаблукровский, Ю.Н.Лазарев. Куйбышев, 1990. 20 с.

Содержится методика выполнения лабораторной работы по курсу "Основы теории автоматического управления", связанной с аналоговым моделированием систем автоматического управления.

Указания предназначены для студентов, обучающихся по специальностям 1301, 1306, 1307. Подготовлены кафедрой динамики полета и систем управления.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П.Королева

Рецензенты: к.т.н. В.В.Дмитриев, к.т.н., доцент Е.И.Давыдов

Ц е л ь р а б о т ы - ознакомление студентов с аналоговым моделированием линейных систем автоматического управления (САУ), включающим подготовку аналоговой схемы моделирования системы, набор (коммутация) аналоговой схемы на аналоговой вычислительной машине (АВМ) и снятие решения. При выполнении лабораторной работы студенты исследуют влияние коэффициента усиления разомкнутой САУ на устойчивость и качество переходного процесса системы.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При проектировании САУ можно выделить три этапа выполнения этой работы.

С учетом конкретных особенностей объекта управления и решаемой САУ задачи выбирают функционально необходимые элементы системы: измерительные устройства, усилители-преобразователи, исполнительные элементы. Составным элементом в САУ входит и сам объект управления.

Затем проводится исследование САУ на устойчивость и качество переходного процесса. Для этого необходимо иметь математические модели всех составных элементов системы. Экспериментальные методы определения передаточных функций элементов САУ рассмотрены в соответствующих лабораторных работах.

По известной структурной схеме САУ, т.е. зная математические модели элементов системы и характер их взаимодействия, рассчитывают математические модели разомкнутой и замкнутой САУ, строятся частотные характеристики. Исследование САУ на устойчивость проводится по любому критерию устойчивости: Гурвица, Рауса, Михайлова, Найквиста и др. Показатели качества переходного процесса системы оцениваются по логарифмической амплитудно-частотной характеристике разомкнутой САУ. Более строгий анализ качества работы САУ выполняется путем аналогового моделирования системы.

Если САУ неустойчива, имеет недостаточные запасы устойчивости или качественные показатели переходного процесса не удовлетворяют заданным требованиям, то проводится коррекция системы. Наиболее простым способом коррекции является изменение коэффициента усиления разомкнутой САУ. Возможности этого метода коррекции ограничены.

Расчет параметров коррекции может быть выполнен различными методами, но их уточнение целесообразно производить методом аналогового моделирования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

- ознакомление с методикой исследования САУ на АБМ;
- составление аналоговой схемы моделирования САУ;
- коммутация аналоговой схемы САУ на АБМ и установка коэффициентов решающих усилителей;
- снятие переходного процесса САУ (снятие решения);
- исследование влияния коэффициента усиления разомкнутой системы на устойчивость и качество переходного процесса;
- оформление отчета.

АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ

При аналоговом моделировании изменениям физических переменных в реальной САУ ставятся в соответствие изменения напряжений в АБМ. Связь между физическими переменными в САУ и между напряжениями в АБМ выражается одной и той же математической зависимостью, например дифференциальными уравнениями. В этом случае каждой единице напряжения АБМ может быть поставлена в соответствие определенная мера физической переменной САУ, т.е. машинное представление физических переменных САУ производится с определенным масштабом:

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

где $x(t)$ - физическая переменная САУ;

k_x - масштаб представления физической переменной САУ в напряжении АБМ;

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

Точно так же в определенном масштабе на АБМ может быть представлено реальное астрономическое время

$$t_M = m_t t,$$

где t - реальное астрономическое время,

m_t - масштабный коэффициент времени,

t_M - машинное время.

Если $m_t > 1$, то реальные процессы в САУ представляются на АБМ в

замедленном темпе, и наоборот, если $m_t < 1$, то медленные реальные процессы в САУ протекают в ускоренном темпе на АБМ. Таким образом, варьируя масштабным коэффициентом времени, можно реальные процессы в САУ любой длительности моделировать на АБМ на определенном отрезке времени. Это обстоятельство имеет существенное значение.

Из удобства снятия решения по отдельным точкам процесса или просмотра его визуальное по осциллографу желательно выбрать масштаб времени таким, чтобы длительность решения на модели была 20 ... 30 с.

$$m_t = \frac{t_M}{t} \approx \frac{20 \dots 30}{t_p},$$

где t_p - предполагаемая длительность переходного процесса в САУ, с.
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

$$m_t \approx 2,5 \omega_{ср},$$

где $\omega_{ср}$ - частота среза, т.е. значение частоты, на которой логарифмическая амплитудная частотная характеристика разомкнутой САУ пересекает ось частот.

При выборе масштабов представления физических переменных САУ в моделировании АБМ необходимо найти некоторый компромисс, так как, с одной стороны, эти масштабы должны иметь как можно большие значения, чтобы уменьшить относительные погрешности, вызванные квантованием сигнала, с другой стороны, машинная переменная (напряжение) не должна превышать допустимого предельного значения. Для АБМ, рассчитанных на электронных лампах, рабочий диапазон напряжений составляет ± 100 В, для полупроводниковых АБМ - ± 25 или ± 10 В.

Соответственно масштаб представления физической переменной в моделировании для разных типов АБМ рассчитывается по формуле

$$\mu_x \leq \frac{100}{|Z_{max}|}; \quad \mu_x \leq \frac{25}{|Z_{max}|}; \quad \mu_x \leq \frac{10}{|Z_{max}|},$$

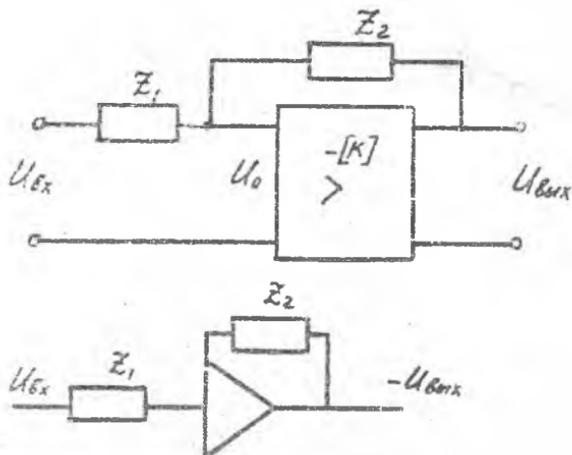
где Z_{max} - максимальное ожидаемое значение физической переменной.

После определения масштабов удобно округлить их в сторону уменьшения. Характерным для САУ является наличие замкнутой цепи с обратной связью, т.е. наличие контура с обратной связью. При этом возникает явление

входного и выходного сигналов, подаваемых на элемент сравнения одна и та же. Следовательно, для того, чтобы масштаб представления входного и выходного сигналов САУ на АЗМ был одинаков, необходимо, чтобы произведение масштабов представления промежуточных переменных внутри замкнутого контура равнялось единице. В противном случае не равенство 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.

РЕШАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АЗМ

Основным решающим элементом АЗМ является операционный или решающий усилитель с отрицательной обратной связью. Схема такого усилителя приведена на рис. I. Для получения отрицательной обратной связи усили-



Р и с. I. Операционный усилитель

тели проектируется так, чтобы выходное 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

$$\frac{U_{Bx}(p) - U_0(p)}{Z_1(p)} = \frac{U_0(p) - U_{Bvix}(p)}{Z_2(p)} = \frac{U_{Bx}(p) - U_{Bvix}(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)},$$

где

$$U_0(p) = \frac{U_{Bvix}(p)}{K_{yc}},$$

K_{yc} - коэффициент усиления усилителя,

$Z_1(p)$ - 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

$$\frac{U_{Bx}(p)}{U_{Bvix}(p)} = \frac{Z_1(p)}{Z_2(p)} \left[1 + \frac{1}{K_{yc}} \left(1 + \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} \right) \right].$$

При больших коэффициентах усиления усилителей (в АВМ применяются усилители с коэффициентом усиления $10^4 \dots 10^5$) решение уравнения можно записать как

$$U_{Bvix}(p) = - \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} U_{Bx}(p).$$

Передачная функция такого усилителя имеет следующий вид:

$$W(p) = - \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}.$$

Рассмотрим основные математические операции, выполняемые с помощью операционных усилителей.

1) Умножение на постоянный коэффициент (рис. 2):

$$Z_1(p) = R_1; \quad Z_2(p) = R_{oc},$$

$$U_{Bvix}(p) = - \frac{R_{oc}}{R_1} U_{Bx}(p).$$

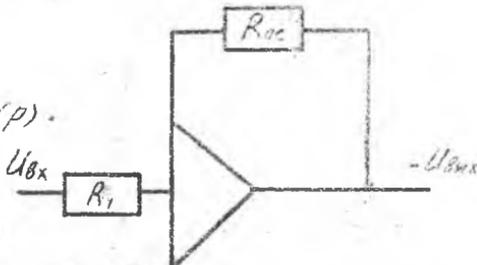


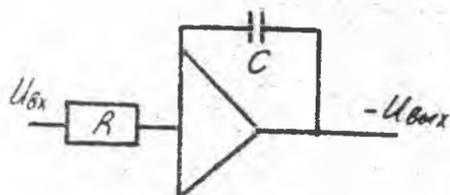
Рис. 2. Масштабный усилитель

или, переходя к оригиналам,

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{RC}{R_1} U_{\text{вх}}(t) = -K U_{\text{вх}}(t)$$

Такой усилитель называется масштабным

2) Интегрирование (рис. 3):



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

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

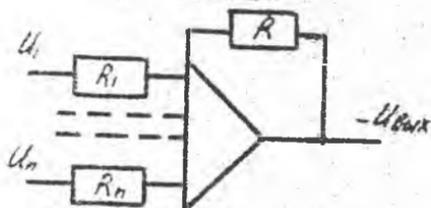
Р и с. 3. Интегратор

или, переходя к оригиналам,

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

$$U_{\text{вых}}(t_M) = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_M} U_{\text{вх}}(t_M) dt_M = -K \int_0^{t_M} U_{\text{вх}}(t_M) dt_M$$

3) Суммирование (рис. 4):



Р и с. 4. Сумматор

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

$$Z_2(p) = R$$

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

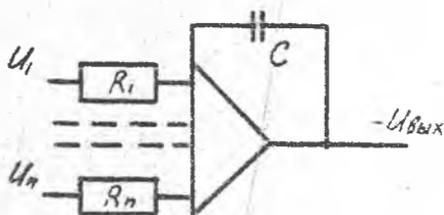
$$U_{\text{вых}}(t) = -K_1 U_1(t) - K_2 U_2(t) - \dots - K_n U_n(t)$$

4) Интегрирование суммы (рис. 5):

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

$$Z_2(p) = \frac{1}{Cp}.$$

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



Р и с. 5. Интегратор суммы

или

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

$$U_{\text{вых}}(t) = -K_1 \int_0^{t_M} U_1(t_M) dt_M - \dots - K_n \int_0^{t_M} U_n(t_M) dt_M.$$

5) Инвертирование знака:

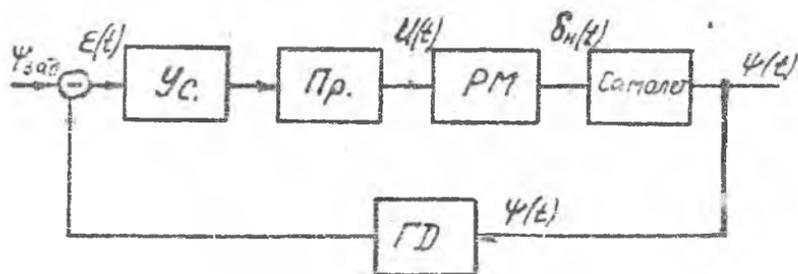
$$Z_1(p) = Z_2(p), \quad U_{\text{вых}}(t) = -U_{\text{вх}}(t).$$

СОСТАВЛЕНИЕ АНАЛОГОВОЙ СХЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ САУ

При исследовании САУ на АЭМ аналоговую схему моделирования целесообразно составлять по структурной схеме системы, используя типовые аналоговые схемы моделирования типовых звеньев САУ и их комбинации (прил. I).

В качестве примера рассмотрим систему автоматического управления движением самолета по курсу. Упрощенная схема такой системы приведена на рис. 6. На элементе сравнения сравнивается заданное значение положения самолета по углу рыскания $\varphi_{\text{зад}}$ и его действительное угловое положение $\varphi(t)$, которое измеряется специальным датчиком угла

датчиком (ГД) углового положения самолета. Сигнал ошибки $E(t)$ усиливается электронным усилителем напряжения, преобразуется и подается на рулевую машину (РМ). Рулевая машина отклоняет гули направления и самолет поворачивается так, чтобы угол рыскания соответствовал заданному значению, т.е. чтобы самолет летел по заданному курсу.



Р и с. 6. функциональная схема системы

Математические модели составных элементов системы определяются расчетным путем или по результатам специальных испытаний. Математическая модель усилителя-преобразователя может быть представлена как дифференциальное звено с передаточной функцией

$$W_{ус}(p) = K_{ус}.$$

Математическая модель рулевой машины - аperiodическое звено с передаточной функцией

$$W_{рм}(p) = \frac{K_{рм}}{T_{рм}p + 1}.$$

Принимаем $K_{рм} = 2 \text{ град/В}$, $T_{рм} = 0,2 \text{ с}$.

Математическая модель углового движения самолета по рысканию при отклонении рулей направления приближенно может быть представлена двумя звеньями - колебательным и интегрирующим:

$$W_{дв}(p) = \frac{K_{дв}}{(T^2 p^2 + 2\sigma T p + 1)p}.$$

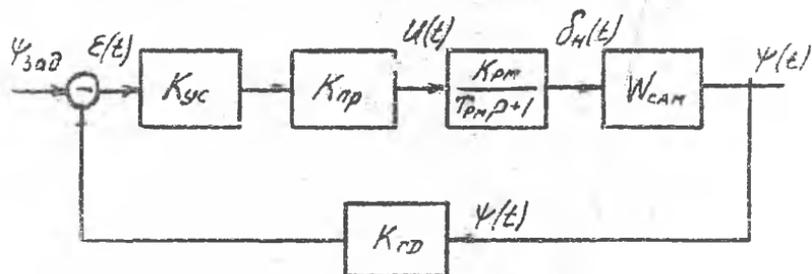
Принимаем

$$K_{ЛЯ} = 0,04; T = 30; c = 0,5.$$

Гироскопический датчик угла рыскания - безынерционное звено с передаточной функцией $W_{ГД}(\rho) = K_{ГД}$.

Принимаем $K_{ГД} = 1 В/град$.

Структурная схема рассматриваемой системы приведена на рис. 7.



Р и с. 7. Структурная схема системы

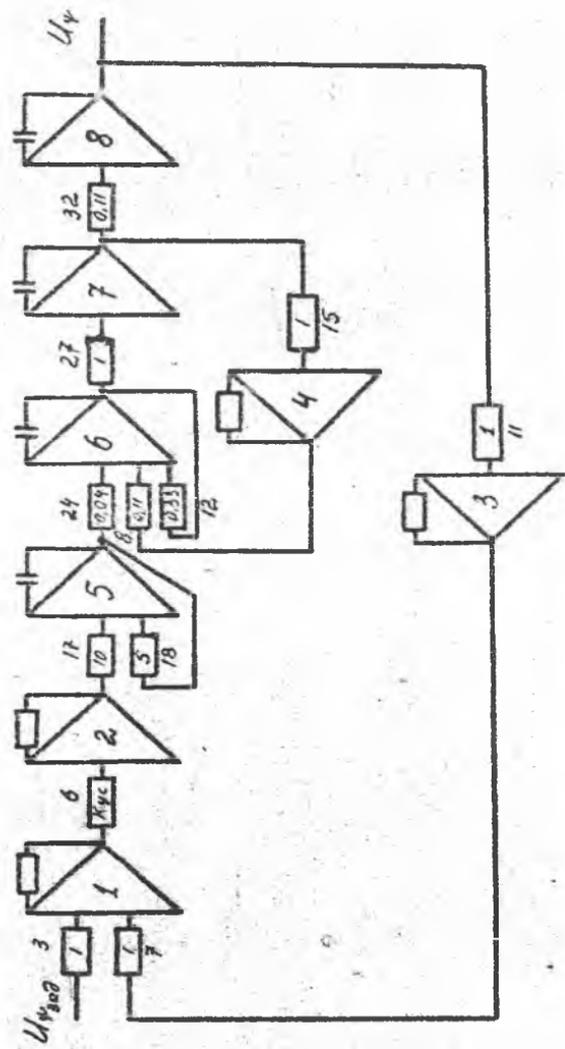
Аналоговая схема моделирования этой системы на АВМ МН-7 приведена на рис. 6. На усилителе I моделируется элемент сравнения, на усилителе 2 - усилитель-преобразователь системы, усилитель 5 моделирует рулевую машину, усилители 6, 7, 8 - самолет.

Коммутация аналоговой схемы моделирования, установка коэффициентов усилителей и снятие решения при работе на АВМ МН-7 описаны в прил. 2.

Исследование системы на АВМ проводится в следующем порядке:

1. Выполнить коммутацию аналоговой схемы, приведенной на рис. 6. Выставить расчетные значения коэффициентов усилителей. При этом усиления усилителя-преобразователя системы принять равным $K_{ус} = 1$.
2. Исследовать поведение системы при изменении коэффициента усиления усилителя-преобразователя системы в пределах

$$K_{ус} = 1 \dots 10 (1, 3, 5, 10).$$



Р и с. 8. Аналоговая схема моделирования системы на АЭМ МИ-7

3) Для различных значений $K_{уст}$ снять графики переходных процессов системы.

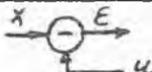
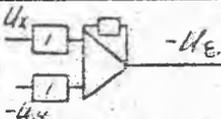
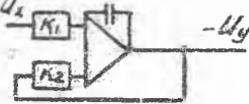
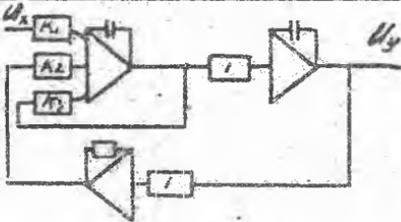
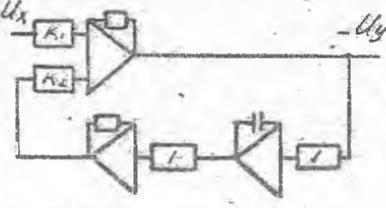
Если исследование системы выполняется на моделирующей установке АВК-31, коммутация аналоговой схемы моделирования производится в соответствии с рис. 9. Работа на АВК-31 описана в методических указаниях Е.И.Давыдова "Исследование динамических систем на аналоговой вычислительной машине АВК-31" (Куйбышев, ИСАС, 1966, 10 с.).

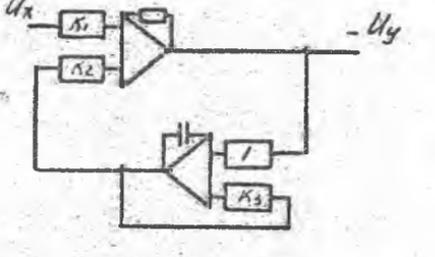
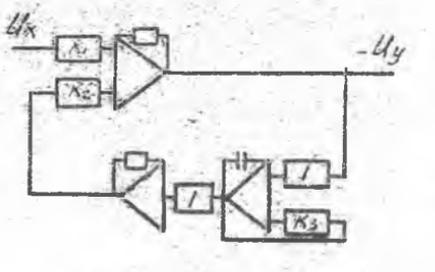
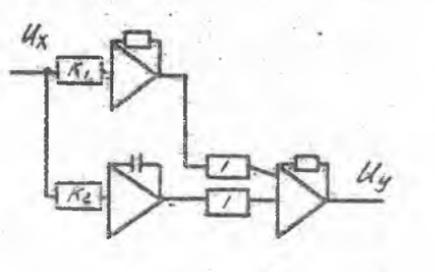
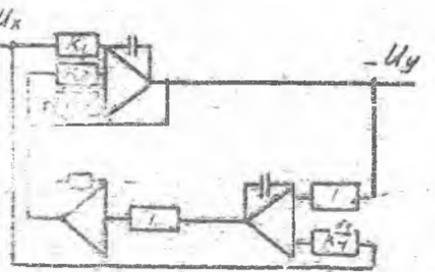
ОБОБЩЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- структурную и аналоговую схемы исследуемой САУ;
- формулы расчета коэффициентов решающих усилителей аналоговой схемы моделирования;
- графики переходных процессов САУ при различных значениях коэффициента усиления усилителя-преобразователя;
- выводы о влиянии коэффициента усиления размынута САУ на устойчивость и качество переходного процесса системы.

АНАЛОГОВЫЕ СХЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ
САУ И ИХ СОБЛАДЕНИЯ

Передаточная функция	Схема набора	Расчет коэффициентов
 $W(p) = x - y$		
$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = K$		
$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{K}{p}$		$K_1 = \frac{K}{m_t}$
$W(p) = \frac{y}{x} = \frac{K}{T_p + 1}$		$K_1 = \frac{K}{m_t T},$ $K_2 = \frac{1}{m_t T}$
$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\zeta T p + 1}$		$K_1 = \frac{K}{m_t^2 T^2},$ $K_2 = \frac{1}{m_t^2 T^2},$ $K_3 = \frac{2\zeta}{m_t T}$
$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{Kp}{T_p + 1}$		$K_1 = \frac{K}{T},$ $K_2 = \frac{1}{m_t T}$

Передача- ная функция	Схема набора	Расчет коэффициентов
$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} =$ $= \frac{K(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)},$ $T_1 < T_2$		$K_1 = K \frac{T_1}{T_2},$ $K_2 = K_3 - \frac{1}{m_c T_2},$ $K_3 = \frac{1}{m_c T_1}$
$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} =$ $= \frac{K(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)},$ $T_1 > T_2$		$K_1 = K \frac{T_1}{T_2},$ $K_2 = \frac{1}{m_c T_2} - K_3,$ $K_3 = \frac{1}{m_c T_1}$
$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} =$ $= K \cdot \frac{T_1 p + 1}{p} =$ $= K T_1 + \frac{K}{p}$		$K_1 = K T_1,$ $K_2 = \frac{K}{m_c}$
$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} =$ $= \frac{K(T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + 2c T_2 p + 1}$		$K_1 = \frac{K T_1}{m_c T_2^2},$ $K_2 = \frac{1}{m_c^2 T_2^2},$ $K_3 = \frac{2c}{m_c T_2},$ $K_4 = \frac{K}{m_c^2 T_2^2}$

РАБОТА НА АВМ МН-7

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 наборном 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 - 5, 6, 7, 8 и т.д. Последняя группа состоит 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 МОм, получаем коэффициент усиления

$$K = \frac{Z_{01}}{Z_{11}} = \frac{1}{0.1} = 10.$$

Если в качестве входного сопротивления используется третье сверху сопротивление группы, равное 1 МОм, то коэффициент усиления по этому входу равен единице. Второе сверху сопротивление любой группы изменяется в пределах 0,1 ... 1 МОм и позволяет получить коэффициент усиления от 10 до 1. Нижнее сопротивление изменяется от 1 до 100 МОм и позволяет получить коэффициент усиления от 1 до 0,01. Если в обратной связи усилителя вместо 1 МОм включить 0,1 МОм, то коэффициенты усиления усилителя уменьшатся в десять раз.

Зная значения коэффициентов усиления схемы набора и имея перед собой наборное поле, 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 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 1 ... 10, то выбирается входное сопротивление, расположенное в любой группе сопротивлений между сопротивлениями 0,1 и 1 МОм (2, 6, 10, 14, 18 и т.д.). Для коэффициентов меньше единицы выбираются сопротивления, расположенные ниже сопротивления 1 МОм (4, 8, 12, 16, 20 и т.д.). Выбранные номера усилителей и сопротивлений указываются на аналоговой схеме моделирования.

Для схемы, приведенной на рис. 8, номера усилителей и сопротивлений указаны.

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.

Коммутацию удобно производить в следующем порядке. Сначала соединить проводами входные сопротивления со входами усилителей в соответствии со схемой набора. Коммутация производится в средней и правой части наборного поля за пределами очерченного прямоугольника. Сопротивления условно показаны шлицами под отвертку или прямоугольниками. Усилители показаны треугольниками. Для удобства коммутации входы сопротивлений выведены перед входами усилителей.

Когда все сопротивления будут 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

"выходы" помещены входные гнезда всех входных сопротивлений с I по 64. Вокруг этого квадрата расположены четырежды повторенные гнезда выходов усилителей. Выходы усилителей ограничены квадратом с надписью "выходы".

Включени с модели

После коммутации аналоговой схемы на наборном поле можно включить модель. Для этого выключает блок питания и тумблер "20 В" на лицевой панели модели МН-7. Остальные тумблеры: "Установка нуля", "Подготовка", "220 В" должны быть выключены (в каждом 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 запитаны напряжением -100 В.

Установка нулей усилителей

В АЭМ 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 гнезда усилителей расположены внизу наборного поля слева от клемм вольтметров. Для установки нулей соединить выход настраиваемого усилителя с вольтметром "+ $\frac{1}{2}$ ". Клемма "+ $\frac{1}{2}$ " расположена внизу наборного поля. Клемму "- $\frac{1}{2}$ " заземлить. ВНИМАНИЕ! Не перепутать с клеммой "-100 В". Вольтметр " $\frac{1}{2}$ " 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 положении "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".

Установка коэффициентов усилителей

Чтобы выставить коэффициенты решающих усилителей, необходимо на клеммы соответствующих сопротивлений с надписью "вход", 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

$$U = U_{эп} K,$$

где $U_{эп}$ - эталонное напряжение (10 В или 100 В), поданное на входное сопротивление;

U - напряжение на выходе усилителя;

K - коэффициент усиления по данному входу усилителя.

Плавное изменить коэффициент усиления можно только с помощью четких 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".

Снятие решения

На вход наборной схемы подается входное напряжение. 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-ИЭГ" или "В2-ИЭЛ", которые расположены в нижней части наборного поля между клеммами делителя и выходами усилителей.

