

Министерство образования Российской Федерации

Омский государственный технический университет

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания для самостоятельной работы
студентов дневной формы обучения

Омск 2003

Составитель Ситников Дмитрий Владимирович, ст. преподаватель

Приводится пример анализа следящей системы управления положением антенны радиолокационной станции. Даны варианты систем управления для самостоятельной работы студентов, уравнения движения измерительных, корректирующих, усилительных, исполнительных устройств и объектов управления, входящих в состав вариантов систем управления.

1. АНАЛИЗ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

Данный анализ следящей системы служит примером для выполнения задания, варианты которого приведены в п.2.

Следящая система на рис. 1 представляет собой простейшую следящую систему, задачей которой является обеспечить равенство входной и выходной величин. Подобная система используется, например, для управления положением антенны радиолокационной станции. Входной (задающей) величиной служит угол поворота ϑ_1 движка задающего потенциометра, который связан с органом управления, например с рукояткой на пульте управления радиолокационной станции. Выходной (регулируемой) величиной является угловое положение ϑ_2 объекта управления (антенны радиолокационной станции).

САУ работает следующим образом. Чувствительный элемент состоит из задающего (ϑ_1) и принимающего (ϑ_2) потенциометров. Принимающий потенциометр жестко связан с валом объекта управления ОУ (конструктивно он установлен в редукторе). При наличии разности угловых положений $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ движков задающего и принимающего потенциометров с чувствительного элемента ЧЭ на электромагнитный усилитель ЭМУ поступает разность напряжений ΔU . Разность $\Delta\vartheta$ будем называть рассогласованием. Усилитель служит для обеспечения требуемой мощности сигнала. Напряжение U с ЭМУ подается на электродвигатель постоянного тока Д, вал которого через редуктор Р связан с ОУ.

ОУ будет поворачиваться до тех пор, пока рассогласование не примет нулевое значение. При достижении объектом управления заданного угла, т.е. $\vartheta_2 = \vartheta_1$, рассогласование будет равно нулю, следовательно, $\Delta U = U = 0$ и двигатель остановится. Таким образом, объект управления стремится принять положение, согласованное с положением рукоятки управления. Связь элементов системы между собой отражена на рис.2. Значения параметров элементов системы приведены в табл. 1.

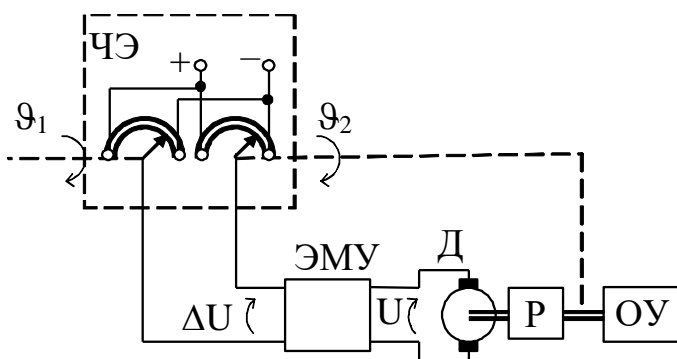


Рис. 1. Следящая система

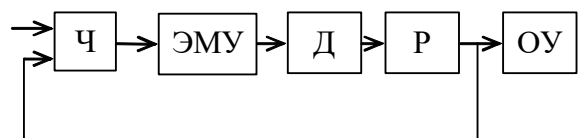


Рис. 2. Блок-схема следящей системы

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение
Задающий и принимающий потенциометры	k_{Π} , В/рад	1
Электромагнитный усилитель	k_1	500
	T_1 , с	0,005
Электродвигатель с редуктором	T_2 , с	0,1
	k_2 ,	0,1

Задание

1. Написать уравнения, передаточные функции элементов. Составить структурную схему. Определить передаточные функции разомкнутой, замкнутой систем и передаточную функцию по ошибке.

2. Построить частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ) системы, ЛАЧХ разомкнутой системы, переходную характеристику.

3. Исследовать систему на устойчивость.

4. Определить коэффициенты ошибок. Найти установившуюся ошибку $\Delta x(t)$ при функции входного сигнала $x_{BX}(t) = 1; t; t^2$.

5. Определить показатели качества (время регулирования, перерегулирование, колебательность переходного процесса).

Выполнение задания

1. Передаточные функции элементов системы (звеньев)

Электромагнитный усилитель.

Из уравнения элемента

$$T_1 \frac{dU}{dt} + U = k_1 \Delta U$$

получим передаточную функцию

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}.$$

Электродвигатель с редуктором.

Из уравнения элемента

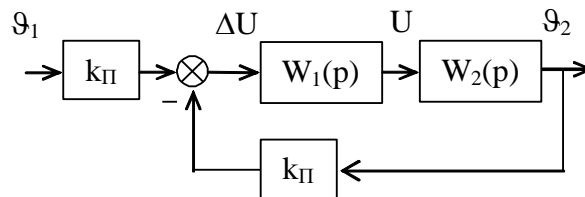
$$T_2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} = k_2 U$$

получим передаточную функцию

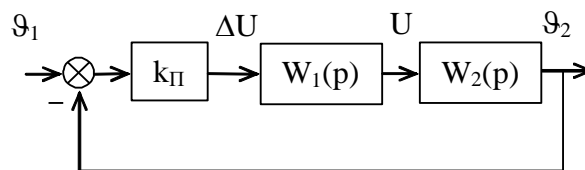
$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p^2 + p}.$$

Чувствительный элемент состоит из задающего и принимающего потенциометров (безынерционные звенья). Передаточная функция потенциометра $W_{\Pi}(p) = k_{\Pi}$.

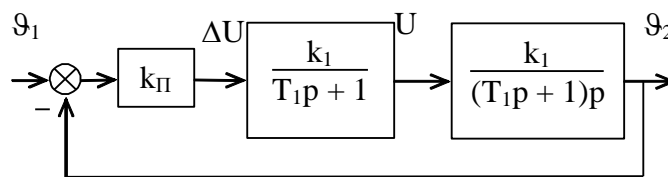
Структурная схема системы управления будет выглядеть следующим образом:



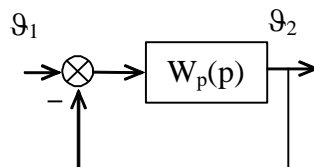
Проведем преобразования структурной схемы. Перенесем сумматор с правой стороны задающего потенциометра (k_{Π}) в левую, добавив в цепь обратной связи звено $\frac{1}{k_{\Pi}}$. Получим



После подстановки значений передаточных функций получим структурную схему САУ



Объединим последовательно соединенные звенья



Передаточная функция эквивалентного звена является **передаточной функцией разомкнутой системы** и рассчитывается по формуле

$$W_p(p) = k_{\Pi} \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) = \frac{k_{\Pi} k_1 k_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p^2 + p)} =$$

$$= \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p^2 + p)} = \frac{k}{T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2)p^2 + p},$$

где $k = k_{\Pi} k_1 k_2 = 1 \cdot 500 \cdot 0,1 = 50$.

В общем виде

$$W_p(p) = \frac{b_0'}{a_3' p^3 + a_2' p^2 + a_1' p + a_0'},$$

где $a_0' = 0$; $a_1' = 1$; $a_2' = T_1 + T_2 = 0,005 + 0,1 = 0,105$;
 $a_3' = T_1 T_2 = 0,005 \cdot 0,1 = 0,0005$; $b_0' = k = 50$.

Передаточная функция замкнутой системы

$$W(p) = \frac{W_p}{1 + W_p} = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p^2 + p) + k} = \frac{k}{T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2)p^2 + p + k} .$$

В общем виде

$$W(p) = \frac{b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} ,$$

где $a_0 = k = 50$; $a_1 = 1$; $a_2 = T_1 + T_2 = 0,005 + 0,1 = 0,105$;
 $a_3 = T_1 T_2 = 0,005 \cdot 0,1 = 0,0005$; $b_0 = k = 50$.

Передаточная функция по ошибке

$$W_{\Delta}(p) = 1 - W(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2)p^2 + p}{T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2)p^2 + p + k} .$$

2. Построение частотных характеристик

Аналитические выражения для **частотных характеристик замкнутой системы** получают из комплексной передаточной функции $W(j\omega)$:

АЧХ – модуль комплексной передаточной функции: $A(\omega) = |W(j\omega)|$;

ФЧХ – аргумент комплексной передаточной функции: $\varphi(\omega) = \arg(W(j\omega))$.

Передаточная функция замкнутой системы в общем виде

$$W(p) = \frac{b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} .$$

Комплексную передаточную функцию получим, подставив $p = j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{b_0}{(a_0 - a_2 \omega^2) + j(a_1 \omega - a_3 \omega^3)} .$$

Одним из возможных путей получения функций АЧХ и ФЧХ является следующий. Обозначим:

$P_b(\omega) = b_0$ – действительная часть числителя,

$Q_b(\omega) = 0$ – мнимая часть числителя,

$P_a(\omega) = a_0 - a_2 \omega^2$ – действительная часть знаменателя,

$Q_a(\omega) = a_1 \omega - a_3 \omega^3$ – мнимая часть знаменателя,

тогда

$$W(j\omega) = \frac{P_b + jQ_b}{P_a + jQ_a} .$$

Для того чтобы избавиться от мнимой единицы в знаменателе, умножим последнее выражение на $\frac{P_a - jQ_a}{P_a - jQ_a}$.

$$W(j\omega) = \frac{P_b + jQ_b}{P_a + jQ_a} \cdot \frac{P_a - jQ_a}{P_a - jQ_a} = \frac{P_a P_b + Q_a Q_b + j(P_a Q_b - P_b Q_a)}{P_a^2 + Q_a^2} =$$

$$= \frac{P_a P_b + Q_a Q_b}{P_a^2 + Q_a^2} + j \frac{P_a Q_b - P_b Q_a}{P_a^2 + Q_a^2} = P(\omega) + jQ(\omega),$$

где

$$P(\omega) = \frac{P_a P_b + Q_a Q_b}{P_a^2 + Q_a^2},$$

$$Q(\omega) = \frac{P_a Q_b - P_b Q_a}{P_a^2 + Q_a^2}.$$

Амплитуда – модуль комплексной передаточной функции:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Фаза – аргумент комплексной передаточной функции:

$$\varphi(\omega) = \arg(W(j\omega)) = \begin{cases} \arctg \frac{Q}{P}, & \text{при } P \geq 0, \\ \pi - \arctg \frac{Q}{P}, & \text{при } P < 0. \end{cases}$$

По полученным формулам рассчитаем $P_a(\omega)$, $P_b(\omega)$, $Q_a(\omega)$, $Q_b(\omega)$, $P(\omega)$, $Q(\omega)$, $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ при изменении ω от 0 до 90° , занесем данные в табл. 2 и построим зависимости $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ (если фаза получается положительной, на графике откладываем $\varphi(\omega) - 2\pi$). Диапазон изменения частоты выбирается таким, чтобы показать все особенности частотных характеристик.

Таблица 2

Расчетные данные для частотных характеристик

ω, c^{-1}	P_a	P_b	Q_a	Q_b	P	Q	A	$\varphi, \text{рад}$
0	50	50	0	0	1	0	1	0
5	47.38	50	4.938	0	1.044	-0.109	1.050	-0.103
10	39.5	50	9.5	0	1.197	-0.288	1.231	-0.236
15	26.38	50	13.31	0	1.511	-0.763	1.692	-0.467
20	8	50	16	0	1.25	-2.5	2.795	-1.107
25	-15.63	50	17.19	0	-1.448	-1.593	2.152	-2.308
30	-44.5	50	16.5	0	-0.988	-0.3663	1.053	-2.786
35	-78.63	50	13.56	0	-0.618	-0.1065	0.626	-2.970
40	-118	50	8	0	-0.422	-0.0286	0.422	-3.074
50	-212.5	50	-12.5	0	-0.234	0.0138	0.234	-3.200
70	-464.5	50	-101.5	0	-0.103	0.0225	0.105	-3.356
90	-800.5	50	-274.5	0	-0.056	0.0192	0.059	-3.471

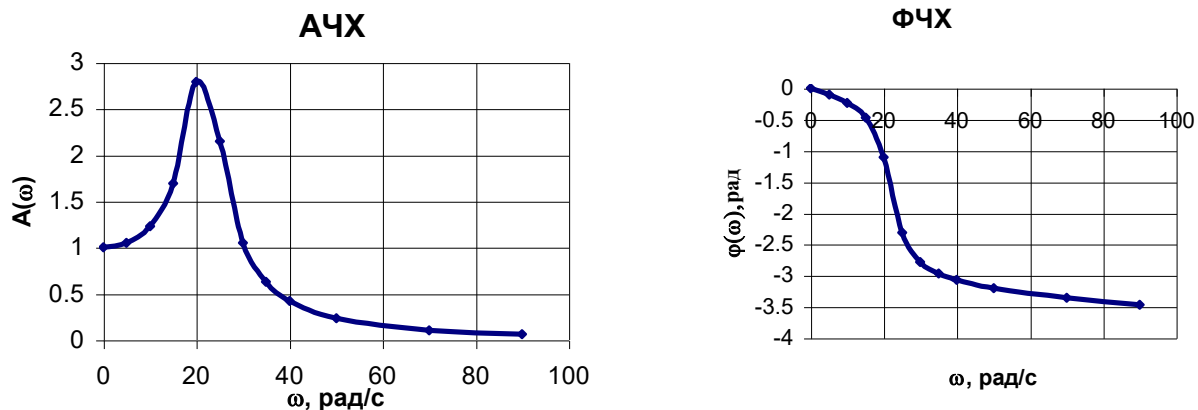


Рис. 3. Частотные характеристики замкнутой системы

Частотные характеристики системы показаны на рис. 3. Аналогично построим логарифмические частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) разомкнутой системы (рис. 4). Значения ЛАЧХ рассчитываются из выражений

$$L_p(\omega) = 20 \log (A_p(\omega));$$

$$\varphi_p(\omega) = \arg(W_p(j\omega)).$$

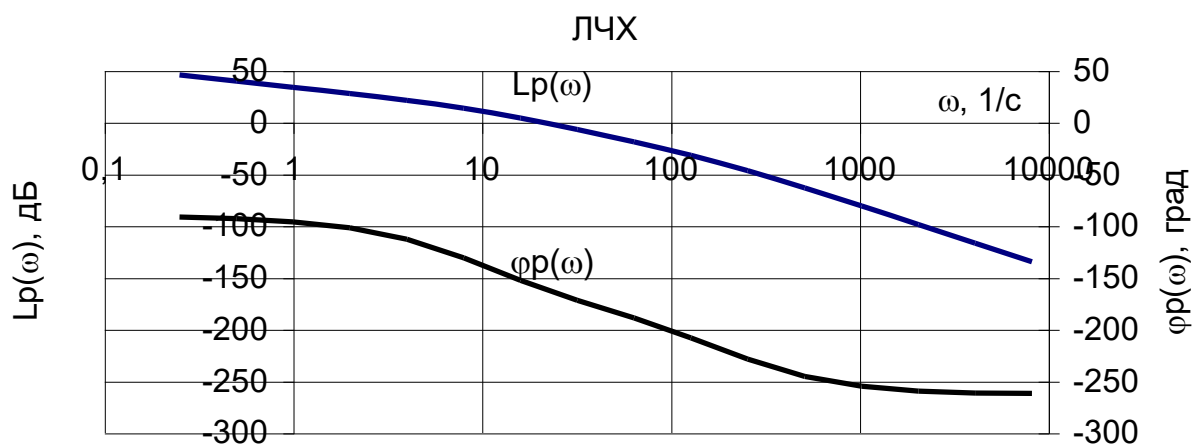


Рис. 4. ЛЧХ разомкнутой системы

Для построения асимптотической ЛАЧХ разомкнутой системы представим передаточную функцию разомкнутой системы в виде произведения передаточных функций типовых звеньев:

$$W_p(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p^2 + p)} = k \frac{1}{T_1 p + 1} \frac{1}{T_2 p + 1} \frac{1}{p}.$$

Число интегрирующих звеньев (порядок астатизма) $\nu = 1$.

$k = 50$; $T_1 = 0,005$ с; $T_2 = 0,1$ с.

Определим логарифмическую амплитуду при частоте $\omega=1$:

$$L_p(1) = 20 \log k = 34.$$

Таблица 3

Данные для асимптотической ЛАЧХ

$W_i(p)$	тип звена	T_i, c	ω_i, c^{-1}	Изменение наклона, дБ/дек	Суммарный наклон, дБ/дек
			начальный наклон		- 20
$\frac{1}{T_1 p + 1}$	Интегрирующее	0,1	10	- 20	- 40
$\frac{1}{T_2 p + 1}$	Интегрирующее	0,005	200	- 20	- 60

Полученные данные (табл.) позволяют построить асимптотическую ЛАЧХ (рис. 5).

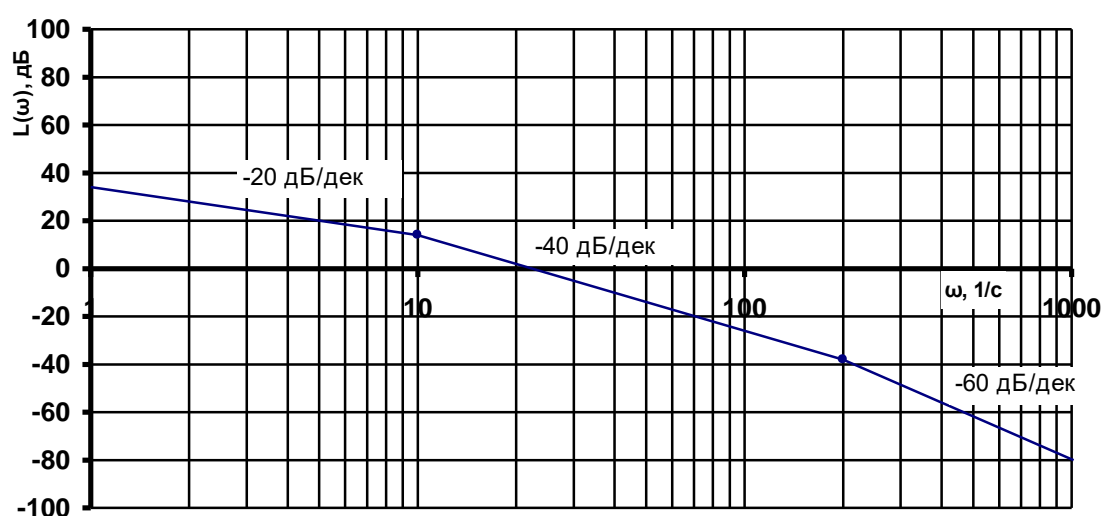


Рис. 5. Асимптотическая ЛАЧХ разомкнутой системы

3. Исследование системы на устойчивость

Критерий Гурвица

Составим определители Гурвица:

В общем виде

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_2 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_1 & a_2 \\ 0 & 0 & a_0 \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_3 \\ a_0 & a_1 \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = a_2.$$

Подставим значения коэффициентов (см. передаточную функцию замкнутой системы), получим определители Гурвица:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0,105 & 0,0005 & 0 \\ 50 & 1,0 & 0,105 \\ 0 & 0 & 50 \end{vmatrix} = 4; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 0,105 & 0,0005 \\ 50 & 1,0 \end{vmatrix} = 0,08; \quad \Delta_1 = a_2 = 0,105.$$

Вывод: так как все определители Гурвица больше 0, то система устойчива.

Критерий Михайлова

Годограф Михайлова – кривая, описываемая характеристическим вектором на комплексной плоскости. Характеристический вектор получим, подставив $p = j\omega$ в характеристический полином (знаменатель передаточной функции замкнутой системы):

$$M(j\omega) = a_0 - a_2\omega^2 + j(a_1\omega - a_3\omega^3).$$

Эта система третьего порядка.

Изменяя частоту в диапазоне: $\omega = 0 \dots 60 \text{ с}^{-1}$, построим кривую Михайлова (рис. 6).

Вывод: так как характеристический вектор описывает угол $3\pi/2$, т.е. последовательно проходит первый, второй и третий квадранты (уходит в бесконечность в третьем квадранте) и порядок системы равен трем, то система устойчива.

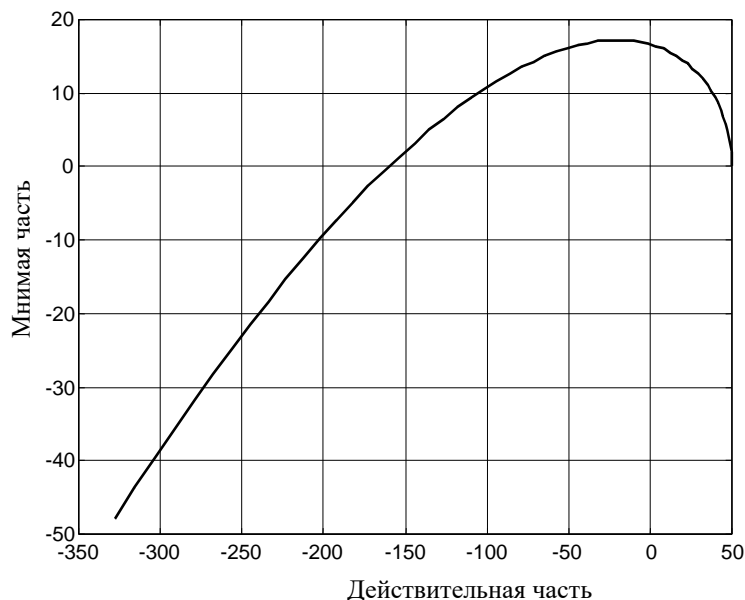


Рис. 6. Кривая Михайлова

Критерий Найквиста

Откладывая значение комплексной передаточной функции разомкнутой системы $W_p(j\omega)$ на комплексной плоскости при изменении частоты $\omega = 40 \dots 500 \text{ с}^{-1}$, получим амплитудно-фазовую характеристику (АФХ) разомкнутой системы (рис. 7).

Вывод: система устойчива, т.к. кривая Найквиста не охватывает точку с координатами $(-1;0)$.

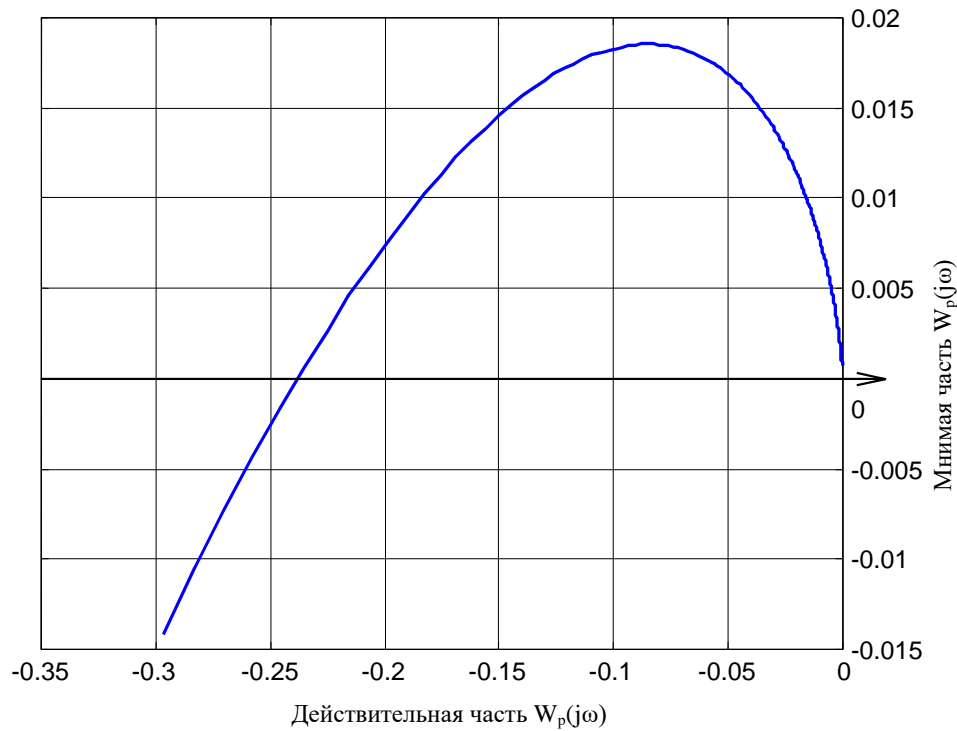


Рис. 7. АФХ разомкнутой системы

Запасы устойчивости

Определим запасы устойчивости графически по ЛЧХ разомкнутой системы (см. рис. 4).

Запасы устойчивости: по фазе $\varphi_{ЗАП} = 19,2^\circ$, по амплитуде $L_{ЗАП} = 12,5$ дБ.

Можно найти запасы устойчивости без построения ЛЧХ разомкнутой системы, если есть выражения для функций $L_P(\omega)$ и $\varphi_P(\omega)$.

Находим ω_C и $\omega_{П}$ из уравнений $L_P(\omega_C) = 0$ и $\varphi_P(\omega_{П}) = -\pi$.

$$20 \log (A_P(\omega_C)) = 0,$$

$$\arg(W_P(j\omega)) = -\pi.$$

Решение этих двух уравнений: $\omega_C = 21,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{П} = 44,8 \text{ с}^{-1}$.

Тогда запасы устойчивости определяются из выражений

$$L_{ЗАП} = -L(\omega_{П}) = 12,5 \text{ дБ};$$

$$\varphi_{ЗАП} = \varphi(\omega_C) + \pi = 0,335 \text{ рад} = 19,2^\circ.$$

Вывод: запас устойчивости по фазе недостаточен (рекомендуемые запасы устойчивости $L_{ЗАП} > 6$ дБ, $\varphi_{ЗАП} > 30^\circ$). Поэтому необходима коррекция динамических свойств системы (в примере это не производится).

4. Оценка точности САУ

Определим коэффициенты ошибок. Передаточная функция системы по ошибке

$$W_{\Delta}(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2)p^2 + p}{T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2)p^2 + p + k}$$

или, в общем виде,

$$W_{\Delta}(p) = \frac{a'_3 p^3 + a'_2 p^2 + a'_1 p + a'_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

где $a'_0 = 0$; $a'_1 = 1$; $a'_2 = T_1 + T_2 = 0,005 + 0,1 = 0,105$;

$a'_3 = T_1 T_2 = 0,005 \cdot 0,1 = 0,0005$; $a_0 = k = 50$; $a_1 = 1$;

$a_2 = T_1 + T_2 = 0,005 + 0,1 = 0,105$; $a_3 = T_1 T_2 = 0,005 \cdot 0,1 = 0,0005$.

Представим $W_{\Delta}(p)$ в виде бесконечного степенного ряда:

$$W_{\Delta}(p) = S_0 + S_1 p + S_2 p^2 + \dots,$$

где коэффициенты ошибок S_k определяются по формуле

$$S_k = \frac{1}{a_0} \left(a'_k - \sum_{r=1}^k S_{k-r} \cdot a_r \right).$$

Определим коэффициенты ошибок S_0, S_1, S_2 :

$$S_0 = \frac{a'_0}{a_0} = 0;$$

$$S_1 = \frac{1}{a_0} (a'_1 - S_0 \cdot a_1) = \frac{1}{50} (1 - 0) = 0,02;$$

$$S_2 = \frac{1}{a_0} (a'_2 - (S_1 \cdot a_1 + S_0 \cdot a_2)) = \frac{1}{50} (0,105 - (0,02 \cdot 1 + 0)) = 0,0017.$$

Установившаяся ошибка

$$\Delta x(t) = S_0 x_{BX}(t) + S_1 \frac{d x_{BX}(t)}{d t} + S_2 \frac{d^2 x_{BX}(t)}{d t^2} = 0,02 \frac{d x_{BX}(t)}{d t} + 0,0017 \frac{d^2 x_{BX}(t)}{d t^2}.$$

При $x_{BX}(t) = 1$ $\Delta x(t) = 0$ – статическая ошибка системы отсутствует (система астатическая); при $x_{BX}(t) = t$ $\Delta x(t) = 0,02$ – скоростьная ошибка постоянна; при $x_{BX}(t) = t^2$ $\Delta x(t) = 0,02 t + 0,0017$ – ошибка от ускорения линейно возрастает с течением времени.

5. Показатели качества переходного процесса

Для определения показателей качества необходимо построить переходную характеристику. Переходная характеристика $h(t)$ представляет собой решение дифференциального уравнения (ДУ) системы:

$$a_3 \frac{d^3 x_{ВЫХ}(t)}{d t^3} + a_2 \frac{d^2 x_{ВЫХ}(t)}{d t^2} + a_1 \frac{d x_{ВЫХ}(t)}{d t} + a_0 x_{ВЫХ}(t) = b_0 x_{ВХ}(t)$$

при $x_{ВХ}(t) = 1$ и нулевых начальных условиях. Подставив $h(t) = x_{ВЫХ}(t)$, получим ДУ

$$a_3 \frac{d^3 h(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 h(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dh(t)}{dt} + a_0 h(t) = b_0 ,$$

коэффициенты определены при выводе передаточной функции замкнутой системы:

$$a_0 = 50; \quad a_1 = 1; a_2 = 0,105; a_3 = 0,0005; b_0 = 50.$$

Перепишем ДУ в виде

$$a_3 \frac{d^3 h(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 h(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dh(t)}{dt} + a_0 \left(h(t) - \frac{b_0}{a_0} \right) = 0 .$$

Обозначив $h_1(t) = h(t) - \frac{b_0}{a_0}$, получим однородное дифференциальное уравнение

$$a_3 \frac{d^3 h_1(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 h_1(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dh_1(t)}{dt} + a_0 h_1(t) = 0 .$$

Для его решения необходимо найти все корни характеристического уравнения:

$$a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 = 0,$$

$$50 + p + 0,105 p^2 + 0,0005 p^3 = 0.$$

Так как уравнение третьего порядка, получим три корня:

$$p_1 = -202,6 = -\beta,$$

$$p_{2,3} = -3,72 \pm j \cdot 21,9 = -\alpha \pm j \cdot \omega,$$

где обозначено

$$\beta = 202,6;$$

$$\alpha = 3,72;$$

$$\omega = 21,9 \text{ с}^{-1}.$$

Получен один действительный корень и два комплексных. Поэтому решение ДУ имеет вид

$$h_1(t) = C_1 e^{-\beta t} + e^{-\alpha t} (C_2 \cos \omega t + C_3 \sin \omega t) .$$

Переходная характеристика системы

$$h(t) = \frac{b_0}{a_0} + h_1(t) = \frac{b_0}{a_0} + C_1 e^{-\beta t} + e^{-\alpha t} (C_2 \cos \omega t + C_3 \sin \omega t).$$

Величина $\frac{b_0}{a_0} = 1.$

Постоянные величины C_1, C_2, C_3 найдем из начальных условий:

$$h(0) = 0, \frac{dh(0)}{dt} = 0, \frac{d^2 h(0)}{dt^2} = 0.$$

Вычисляя первую и вторую производные функции $h(t)$ при $t = 0$ и решая полученную систему уравнений относительно C_1, C_2, C_3 , получим

$$C_1 = -0,012; C_2 = -0,988; C_3 = -0,282.$$

Таким образом, переходная характеристика

$$h(t) = 1 - 0,012 e^{-202,6 t} - e^{-3,72 t} (0,988 \cos 21,9 t + 0,282 \sin 21,9 t).$$

По данной формуле построим переходную характеристику (рис. 8).

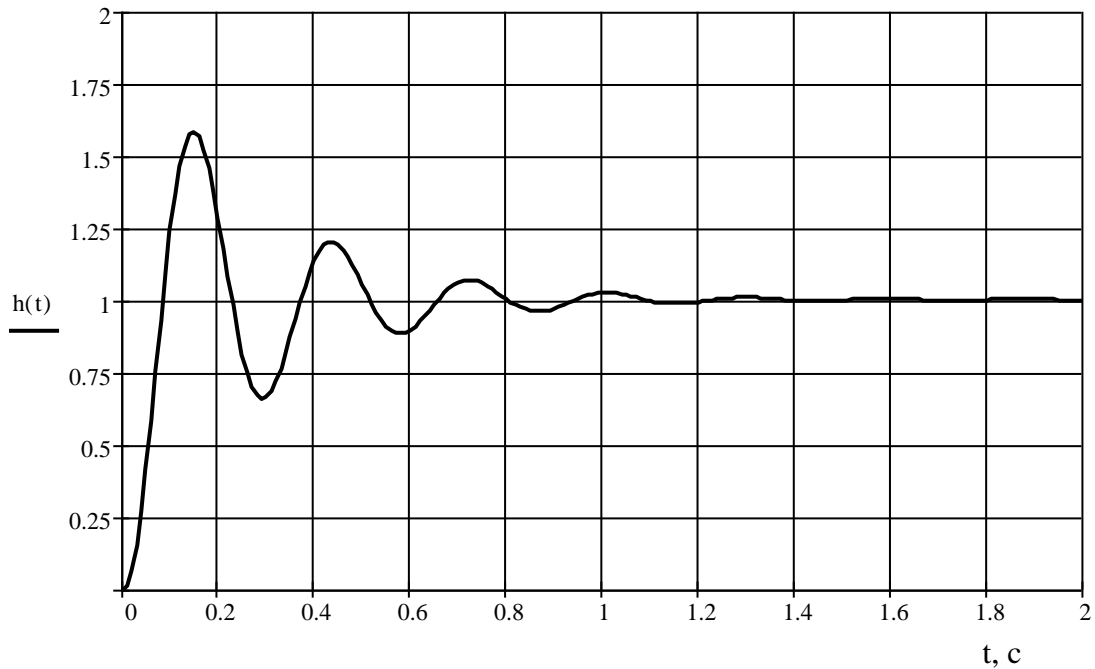


Рис. 8. Переходная характеристика САУ

Графически определим показатели качества:

– время регулирования

$$t_p = 0,76 \text{ с},$$

– перерегулирование

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100 = \frac{1,58 - 1}{1} \cdot 100 = 58 \%,$$

– колебательность переходного процесса

$$n = 3.$$

2. ВАРИАНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Приведем варианты систем автоматического управления для самостоятельного анализа студентами:

1. Система регулирования угловой скорости вращения коленчатого вала дизеля.
2. Система автоматического регулирования угловой скорости вращения гидротурбины.
3. Система автоматического регулирования концентрации сернистого газа на заводах серной кислоты.
4. Схема программного регулятора температуры теплообменника.
5. Система автоматической стабилизации продольного канала самолета (автопилот).
6. Система стабилизации напряжения генератора.
7. Следящая система копировально-фрезерного станка.
8. Регулятор скорости вращения электрического двигателя.
9. Электрогидравлическая следящая система.
10. Электрогидравлическая следящая система с электромагнитом.
11. Система автоматического регулирования давления.

Для каждой САУ приведены три варианта исходных данных. Исходные данные содержат параметры звеньев системы (коэффициенты передачи, постоянные времени).

Задание

1. Написать уравнения, передаточные функции элементов. Составить структурную схему. Определить передаточные функции разомкнутой, замкнутой систем и передаточную функцию по ошибке.
2. Построить частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ) системы, ЛАЧХ разомкнутой системы, переходную характеристику.
3. Исследовать систему на устойчивость. Определить запасы устойчивости.
4. Определить коэффициенты ошибок. Найти установившуюся ошибку $\Delta x(t)$ при функции входного сигнала $x_{BX}(t) = 1; t; t^2$.
5. Определить показатели качества (время регулирования, перерегулирование, колебательность переходного процесса).
6. Определить параметры корректирующего звена, обеспечивающие наибольшее быстродействие при достаточном запасе устойчивости (по амплитуде не менее 6 дБ, по фазе не менее 30°).

1. Система регулирования угловой скорости вращения коленчатого вала дизеля

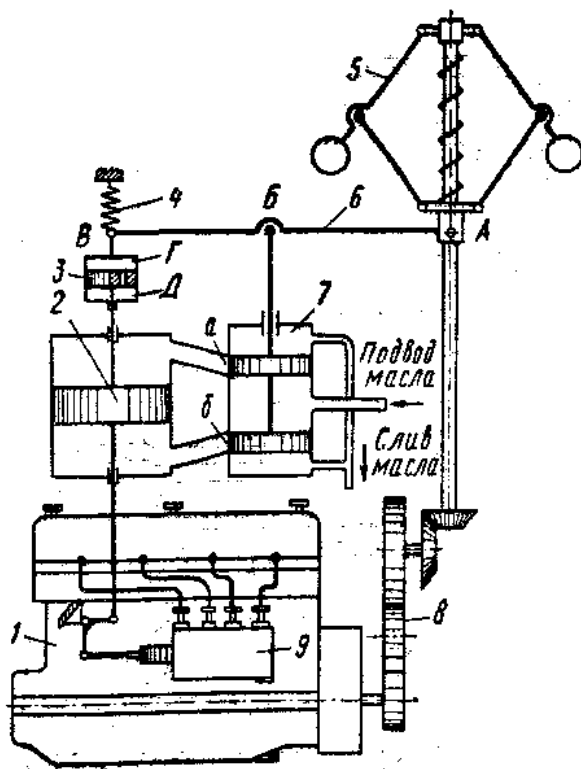


Рис. 9. Система автоматического регулирования угловой скорости и вращения коленчатого вала дизеля.

На рис. 9 изображена принципиальная схема системы автоматического регулирования угловой скорости вращения коленчатого вала дизеля. В качестве чувствительного элемента в системе применен тахометрический измеритель угловой скорости 5, вал которого соединен с помощью механического редуктора 8 с коленчатым валом дизеля 1. Рычаг 6 связан с муфтой измерителя скорости, поршнем гидравлического клапана 7 и штоком изодрома 3. Изодром в свою очередь соединен с поршнем гидравлического серводвигателя 2. Шток поршня серводвигателя через систему рычагов перемещает тягу управления насоса 9 подачи топлива в дизель.

Система регулирования угловой скорости вращения дизеля работает следующим образом. При повышении угловой скорости вращения ко-

ленчатого вала дизеля, обусловленном уменьшением нагрузки, увеличивается угловая скорость вращения вала тахометрического измерителя 5, и его грузы начинают расходиться, поднимая муфту, а вместе с ней конец А рычага 6 вверх. Шток поршня гидравлического клапана 7 также поднимается вверх, и его поршень открывает отверстие а, через которое масло под давлением будет поступать в верхнюю полость серводвигателя 2. Поршень серводвигателя переместится вниз. Одновременно с этим его шток через систему рычагов передвинет тягу управления насосом влево, уменьшая подачу топлива в дизель. Скорость вращения дизеля уменьшится, грузы центробежного измерителя опустятся и конец рычага А переместится вниз.

При этом в гидравлическом клапане закрывается отверстие а и открывается отверстие б. Шток серводвигателя 2 будет подниматься вверх, воздействуя на поршень изодрома.

Так как полости Г и Д соединены калибровочным отверстием, то перемещение точки В вверх зависит не от положения поршня серводвигателя, а от его скорости. Пружина изодрома 4 обеспечивает возвращение точки В в одно и то же положение. Точка Б находится в положении равновесия, когда оба отверстия а и б перекрыты. При уменьшении скорости вращения дизеля перемещения всех рассмотренных устройств будут происходить в обратных направлениях.

Блок-схема системы регулирования угловой скорости вращения коленчатого вала дизеля показана на рис. 10.

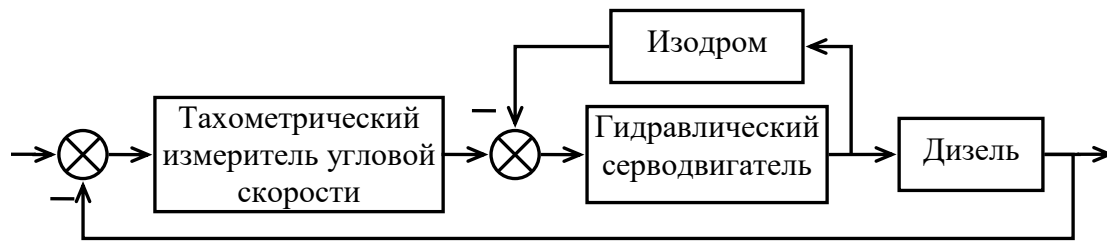


Рис. 10. Блок-схема системы регулирования угловой скорости вращения коленчатого вала дизеля

Исходные данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Дизель	$T_d, \text{с}$	0,5	0,3	0,4
	$k_d, \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{м}}$	10^4	10^4	10^4
Гидропривод	$T_g, \text{с}$	0,001	0,001	0
	$k_g, \text{с}^{-1}$	1000	800	900
Изодром	$T_{и}, \text{с}$	0,03	0,04	0,05
Центробежный тахометр	$T_{цб}, \text{с}$	0,1	0,05	0,08
	$k_{цб}, \frac{\text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
	$\xi_{цб}$	0,1	0,05	0,1
Редуктор	k_p	1	1	1

Примечание: Плечи рычага б равны: $AB = BV$.

2. Система автоматического регулирования угловой скорости вращения гидротурбины

На рис. 11 изображена упрощенная принципиальная схема системы автоматического регулирования угловой скорости вращения гидротурбины. Чувствительным устройством системы является тахометрический измеритель скорости (тахометр) 2, приводимый во вращение от синхронного электродвигателя 1, питаемого напряжением от генератора 11. При этом скорость вращения тахометра пропорциональна частоте переменного тока генератора, а следовательно, скорости вращения вала гидротурбины.

С падением электрической нагрузки в цепях потребления 13 возрастает скорость вращения гидротурбины 12 и генератора 11, грузы тахометра 2 расходятся и муфта перемещается вверх. Рычаг 3 перемещает золотник 4 гидроусилителя 6 вспомогательного гидравлического привода и масло, поступающее от

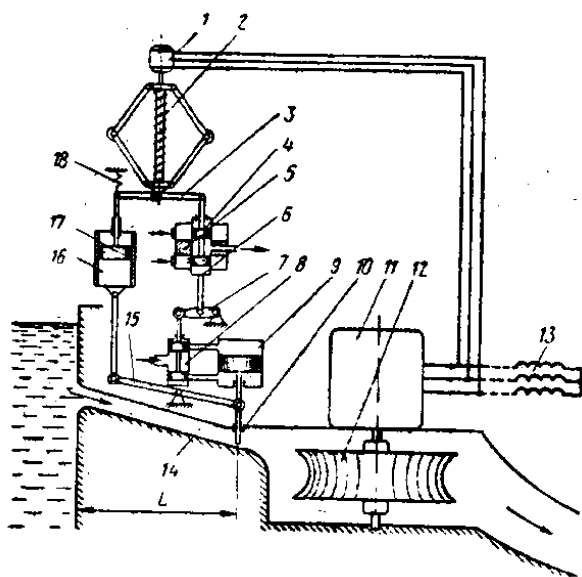


Рис. 11. Система автоматического регулирования угловой скорости вращения гидротурбины

насоса в силовой цилиндр, будет опускать поршень 5, а вместе с ним – корпус гидроусилителя 6. Его движение передается через рычаг 7 на управляющий золотник 8 основного гидравлического привода 9. Поршень гидравлического привода, следя за движением золотника 8, переместится вниз, и заслонка 10 уменьшит проходное отверстие в трубопроводе 14. Соответственно с этим мощность турбины снизится, что приведет к уменьшению скорости вращения гидротурбины, генератора и синхронного электродвигателя 1.

Для повышения устойчивости системы регулирования, а также уменьшения времени протекания переходного процесса применена гибкая обратная связь изодромного типа. В системе перемещение рычага 15 передается через цилиндр изодрома 16, масло в цилиндре изодрома приведет в движение поршень 17, который в свою очередь воздействует на рычаг 3. При движении поршня происходит сжатие пружины 18. Выпрямляясь, пружина возвращает поршень в первоначальное положение, и масло будет перетекать через калибровочное отверстие в поршне из одной половины цилиндра в другую. Тогда перемещение сервомотора будет пропорционально скорости относительного перемещения поршня.

На рис. 12 показана блок-схема системы автоматического регулирования угловой скорости вращения гидротурбины. Значения параметров САУ приведены в табл. 5.

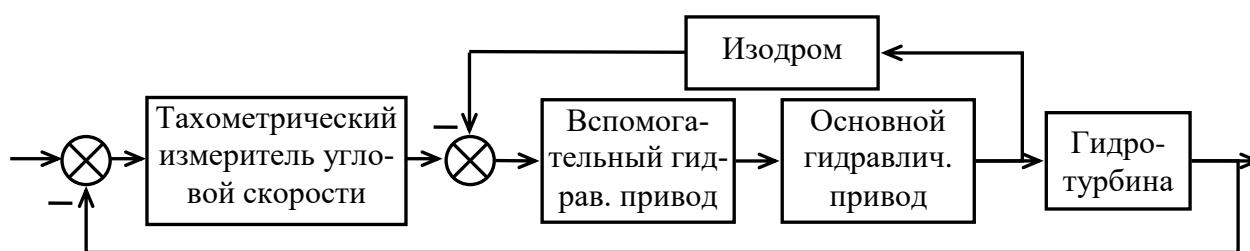


Рис. 12. Блок-схема системы регулирования угловой скорости вращения гидротурбины

Таблица 5

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Гидротурбина	$T_T, \text{с}$	5	7	4
	$\omega_0, \text{с}^{-1}$	1	2	5
	$z_0, \text{м}$	0,2	0,3	0,4
Гидропривод	$T_{\Gamma}, \text{с}$	0,001	0,002	0,001
	$k_{\Gamma}, \text{с}^{-1}$	1000	800	1000
Изодром	$T_{\text{И}}, \text{с}$	0,03	0,04	0,04
Центробежный тахометр	$T_{\text{ЦБ}}, \text{с}$	0,1	0,1	0,1
	$k_{\text{ЦБ}}, \frac{\text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
	$\xi_{\text{ЦБ}}$	0,1	0,2	0,2
Редуктор	k_P	1	1	2

Примечание: скорость двигателя 1 в 20 раз выше скорости гидротурбины 12. Плечи рычагов 3 и 15 равны. Перемещение гидроусилителя 6 равно перемещению золотника 4.

3. Система автоматического регулирования концентрации сернистого газа на заводах серной кислоты

На рис. 13 представлена упрощенная схема системы, состоящая из объекта регулирования в виде сушильной башни 2; регулятора Р, состоящего из электронного усилителя 3, электромашинного усилителя (ЭМУ) 4, электродвигателя 5, механического редуктора 6 и силового серводвигателя 8; датчика 1 (электрического газоанализатора). Регулятор воздействует на управляющий орган 7, изменяющий проходное сечение воздуховода.

Работа системы регулирования заключается в следующем. При увеличении количества сернистого газа SO_2 , поступающего через трубопровод в сушильную башню, на ее выходе повышается концентрация сернистого газа. Электрический газоанализатор 1, измеряющий концентрацию SO_2 , выдает напряжение u_d , поступающее на электронный усилитель 3 регулятора Р. Усиленный в ЭМУ, электродвигателе и силовом гидравлическом серводвигателе сигнал воздействует на заслонку 7 воздуховода, увеличивая количество воздуха, поступающего в башню. Таким образом, концентрация сернистого газа в башне падает до требуемого значения.

Для повышения устойчивости и качества системы регулирования в ней предусмотрены две внутренние гибкие обратные связи: первая, состоящая из конденсатора 13 и резистора 14, и вторая, состоящая из редуктора 9, тахогенератора 10, потенциометра 11, конденсатора 12 и резистора 15.

Блок-схема системы регулирования концентрации сернистого газа показана на рис. 14 (электромашинный усилитель 4 и электронный усилитель 3 объединены). Исходные данные приведены в табл. 6.

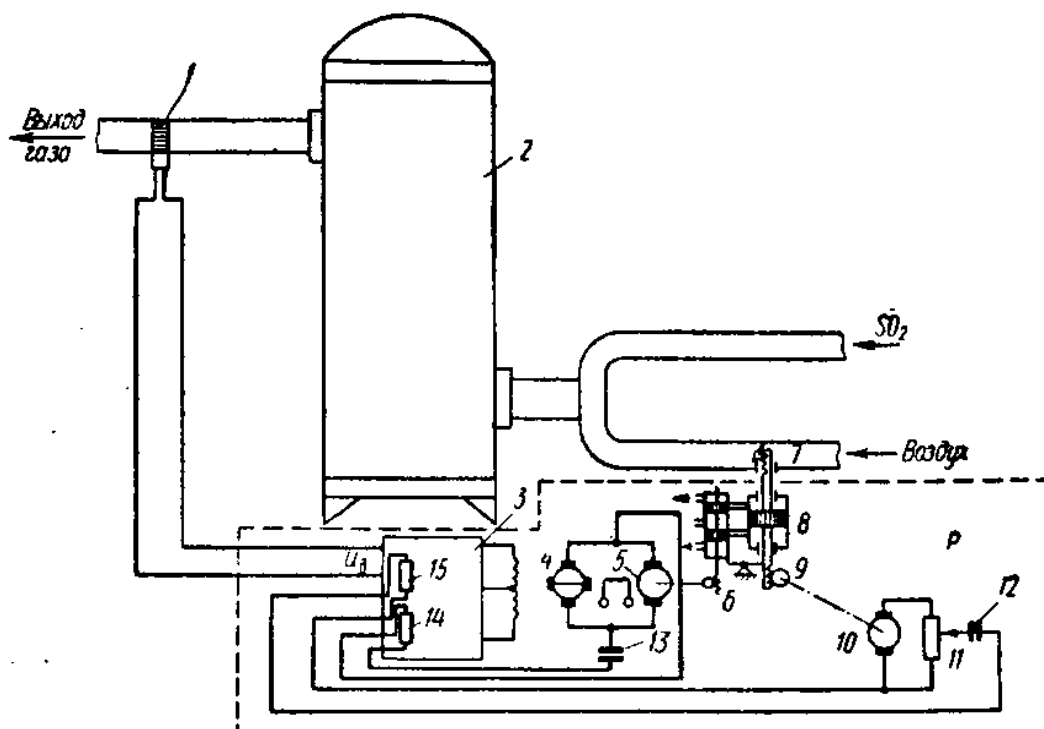


Рис. 13. Система автоматического регулирования концентрации сернистого газа на заводах серной кислоты

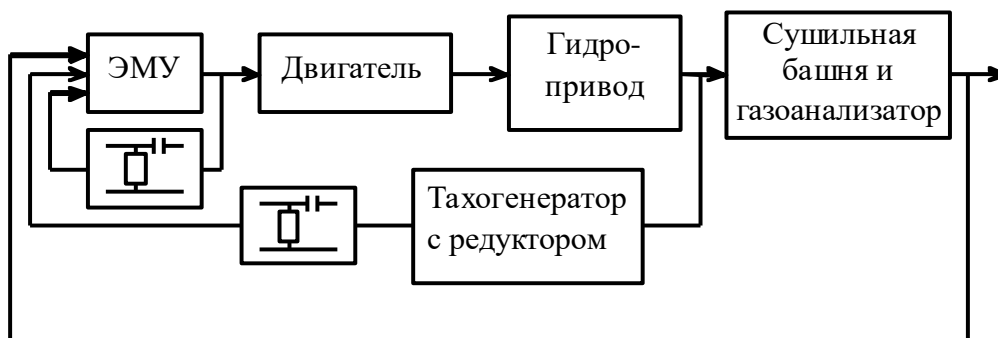


Рис. 14. Блок-схема системы регулирования концентрации сернистого газа

Таблица 6

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Сушильная башня	$T_1, \text{с}$	10	15	10
	$T_2, \text{с}$	5	8	8
	$k_B, \frac{\text{В}}{\text{М}}$	1	1	1
Гидропривод	$T_{\Gamma}, \text{с}$	0,001	0,001	0,001
	$k_{\Gamma}, \text{с}^{-1}$	1000	500	500

Тахогенератор	$k_T, \frac{В \cdot с}{рад}$	0,05	0,1	0,1
Электромашинный усилитель с электронным усилителем	$T_y, с$	0,1	0,05	0,05
	k_y	10	10	10
Двигатель	$T_d, с$	0,1	0,05	0,1
	$k_d, (с \cdot В)^{-1}$	10	10	10
Редукторы 6 и 9	$k_R, рад/м$	100	50	50

Примечание: постоянные времени корректирующих RC-цепочек равны $T_K=0,01с$.

4. Схема программного регулятора температуры теплообменника

На рис. 15 изображена упрощенная принципиальная схема программного регулятора температуры теплообменника. Система состоит из задатчика температуры (потенциометра) 3 и термометра сопротивления 4, включенных в электрический измерительный мост. Напряжение разбаланса моста u_m поступает на вход электронного усилителя 2, а затем – на магнитный усилитель 1. Нагрузкой магнитного усилителя является двухфазный асинхронный двигатель 14, который через редуктор 13 перемещает струйную трубку 12.

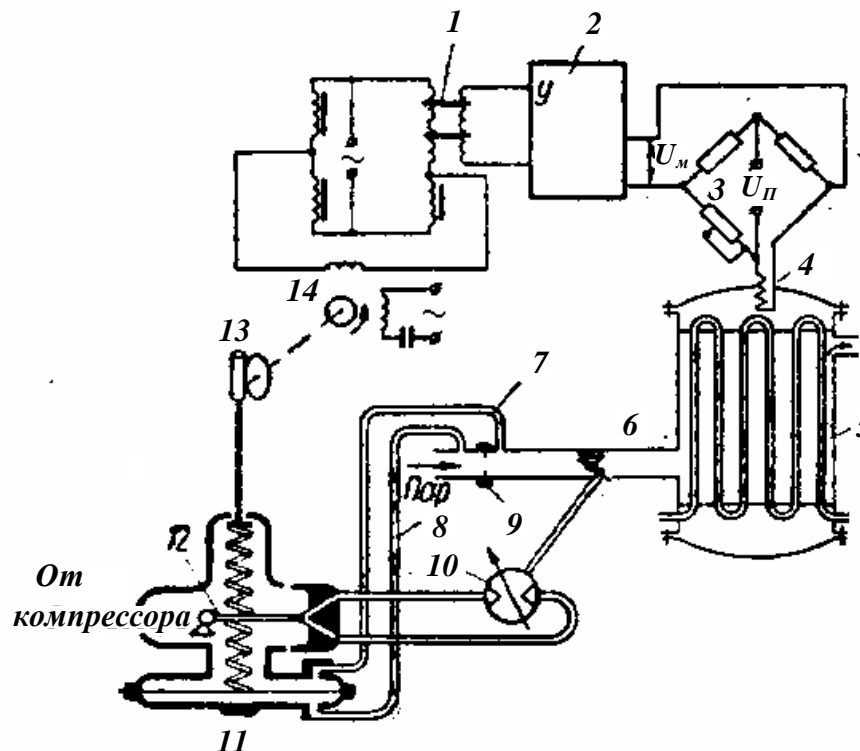


Рис. 15. Упрощенная принципиальная схема системы программного регулирования температуры теплообменника

Расход пара измеряется мерной шайбой 9. По трубопроводам 7 и 8 пар поступает на мембранный двигатель 11, который перемещает струйную трубку.

Регулирующим органом 6 управляет серводвигатель 10, в который поступает сжатый воздух от компрессора через струйную трубку 12.

Система работает следующим образом. При движении в соответствии с программой щетки потенциометра 3 образуется разбаланс моста, и электродвигатель 14 переместит струйную трубку. Сжатый воздух поступит к серводвигателю 10, который будет поворачивать регулирующий орган 6, изменяя подачу пара в теплообменник 5 до тех пор, пока температура в теплообменнике не станет равной заданной температуре по программе.

Блок-схема этой системы регулирования изображена на рис. 16.

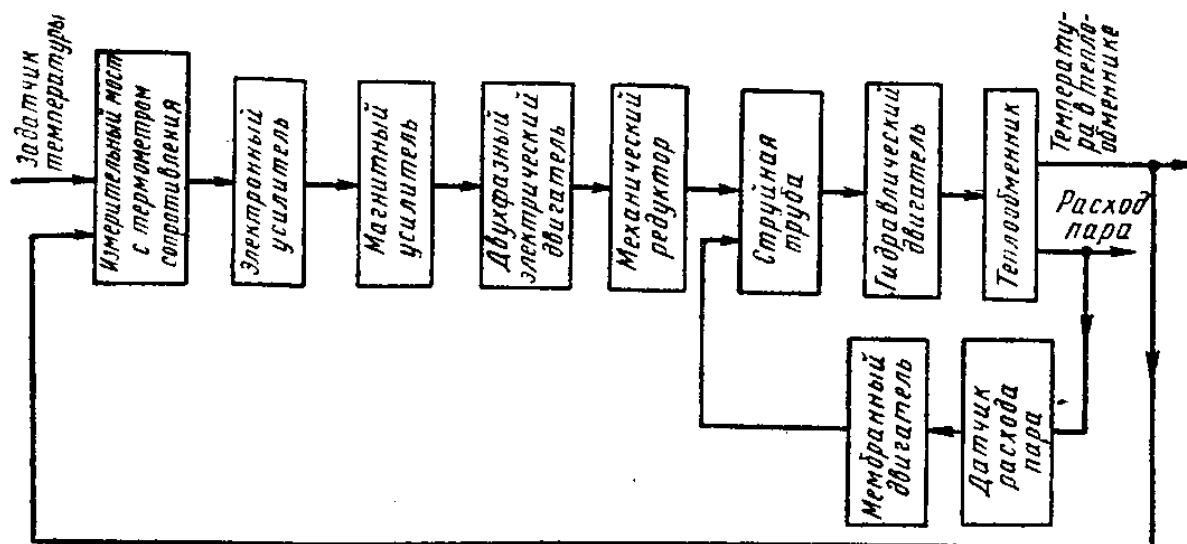


Рис. 16. Блок-схема системы программного регулирования температуры теплообменника

Таблица 7

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Теплообменник 5	$k_{ТО}$, °C/рад	50	40	60
	T_1 , с	20	15	12
	T_2 , с	2	2	2
Струйная трубка 12	k_C , Па/м	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$
Термосопротивление в мостовой схеме 4	k_T , В/°C	0,1	0,2	0,3
Двухфазный двигатель 14	k_D , рад/с·В	5	5	5
	T_D , с	0,3	0,2	0,2
Усилители (магнитный и электронный)	k_U	20	30	40
	T_M , с	0,1	0,1	0,05
Редуктор 13	k_R , м/рад	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
Поворотный двигатель 10	k_P , рад/Па	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Примечание: пружины прикреплены к центру струйной трубки 12 и имеют одинаковую жесткость.

5. Система автоматической стабилизации продольного канала самолета (автопилот)

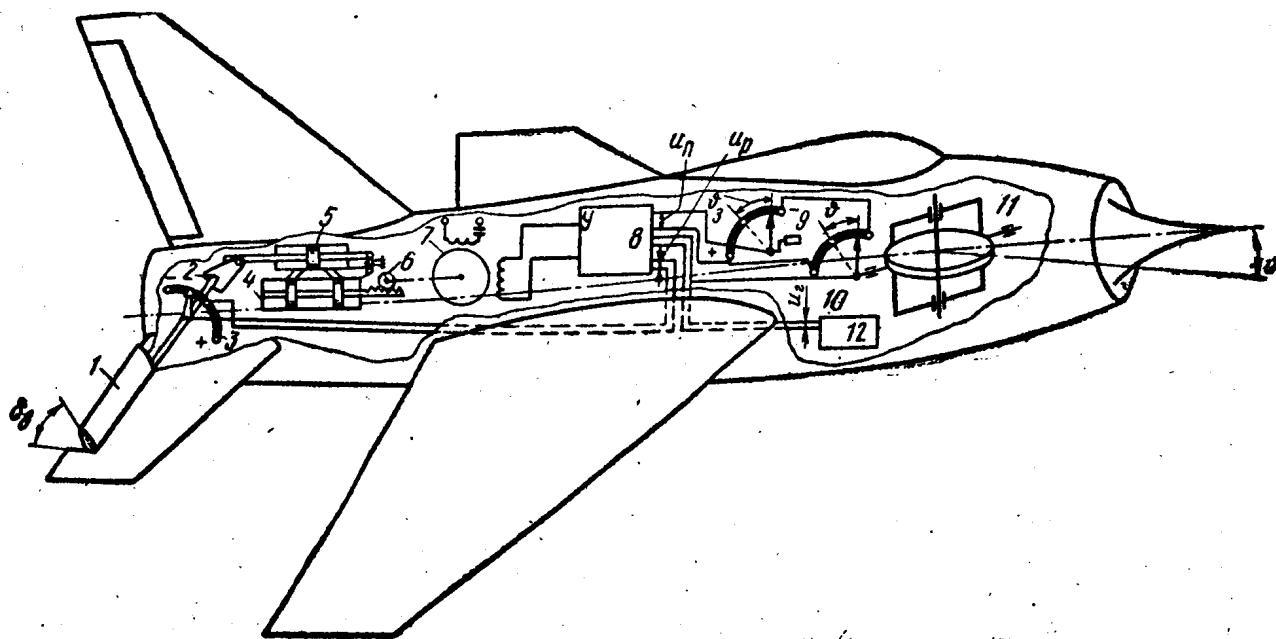


Рис. 17. Упрощенная принципиальная схема автопилота самолета

Система автоматической стабилизации продольного канала самолета (автопилот) показана на рис. 17. Гироскопический блок 11, ось которого направлена вдоль вертикальной оси самолета, имеет выходной потенциометр 10. Этот потенциометр неподвижно закреплен на фюзеляже, и при отклонении горизонтальной оси самолета на некоторый угол ϑ (угол тангажа) корпус потенциометра поворачивается на тот же угол, так как гироскоп стремится сохранить свое положение неизменным.

Потенциометр 10 соединен электрически с задающим потенциометром 9. При перемещении ползунка задающего потенциометра 9 на угол ϑ_3 , (заданный угол тангажа) в потенциометрической системе образуется напряжение рассогласования u_p , которое поступает на усилитель 8.

Выходной каскад усилителя питает двухфазный электродвигатель переменного тока 7, приводящий в движение через редуктор 6 золотник гидроусилителя 4. Гидравлический усилитель и силовой поршень цилиндра 5 образуют гидравлическую рулевую машинку. При смещении золотника поршень цилиндра 5 перемещается и поворачивает через рычаг 2 руль высоты 1. С рулем высоты связан потенциометр обратной связи 3, с которого снимается напряжение u_n , соответствующее углу поворота руля δ_v . Самолет под действием руля высоты будет перемещаться до тех пор, пока его ось не повернется на угол ϑ_3 . В этом случае напряжение рассогласования станет равным нулю, и самолет будет набирать высоту под заданным углом тангажа. Датчик угловой скорости 12 измеряет угловую скорость самолета $\dot{\vartheta}$ и с помощью автоматической системы демпфирует колебания самолета в вертикальной плоскости.

На рис. 18 показана блок-схема продольного канала автопилота (система автоматической стабилизации). Исходные данные приведены в табл. 8.

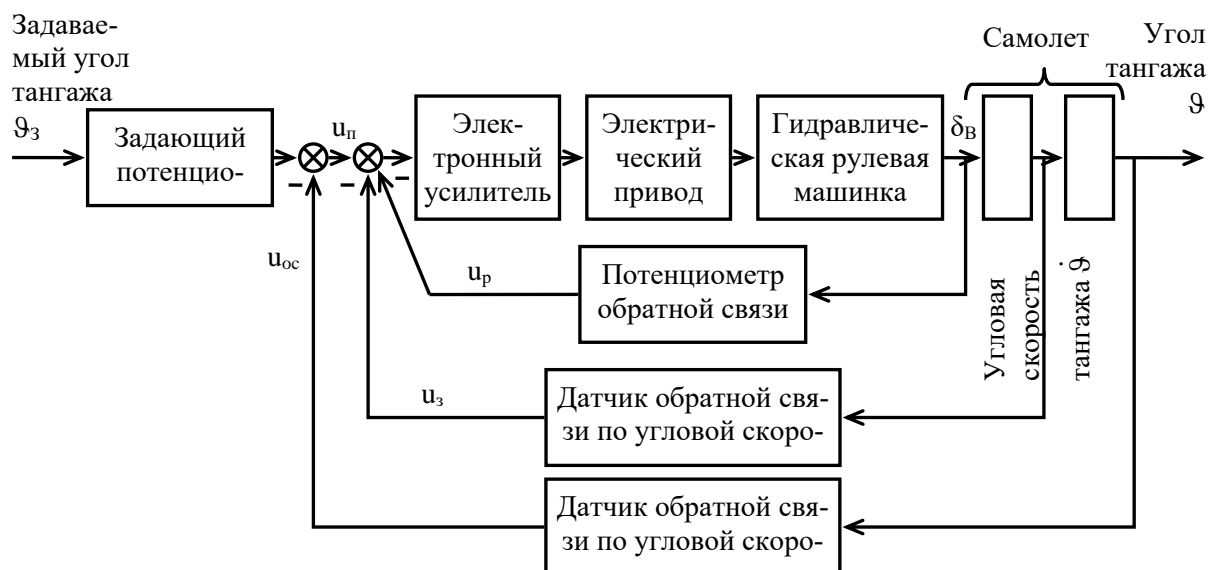


Рис. 18. Блок-схема продольного канала автопилота самолета

Таблица 8

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Потенциометры 9 и 10	k_{Π} , В/рад	1	2	3
Электронный усилитель 8	k_y	100	50	50
Двухфазный двигатель 7	k_d , $\frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{В}}$	1	1	1
	T_d , с	0,1	0,1	0,1
Редуктор 6	k_P , м/рад	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
Гидропривод 5	k_G , с^{-1}	1000	500	500
	T_G , с	0,001	0,001	0,001
Длина рычага 2	l , м	0,2	0,15	0,2
Самолет	k_C	1	1	1
	T_C , с	5	3	7
	T_{C1} , с	0,5	0,4	0,6

6. Система стабилизации напряжения генератора

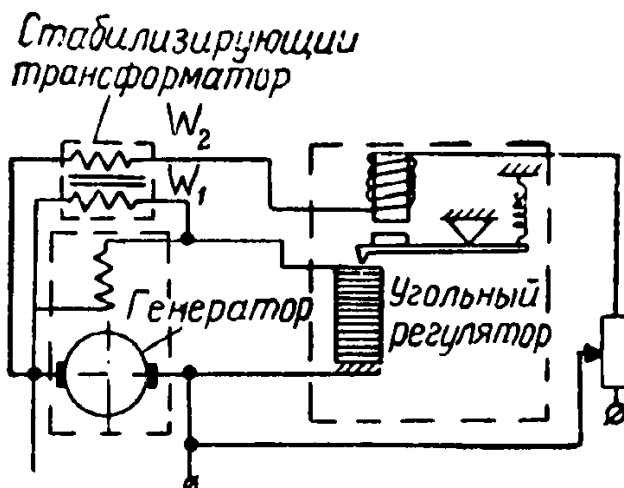


Рис. 19. Принципиальная схема регулирования напряжения генератора постоянного тока

На рис. 19 приведена схема стабилизации напряжения самолетного генератора постоянного тока с угольным регулятором. Угольный регулятор представляет собой столбик из угольных шайб, сжатых пружиной. Натяжение пружины и сжатие угольного столба изменяются с помощью электромагнита. Обмотка электромагнита подключена к щеткам генератора, а угольный столб включен последовательно с обмоткой возбуждения и вместе с ней также подключен к щеткам генератора. Сопротивление угольного столба меняется в зависимости от величины сжатия. Как видно из схемы, с помощью электромагнита можно изменять сжатие и сопротивление столба, а следовательно, и ток возбуждения и напряжения на щетках генератора. Пусть, например, в результате падения скорости вращения или возрастания нагрузки напряжение генератора упало. Уменьшение напряжения приведет к снижению силы электромагнита, к сжатию угольного столба пружиной, к уменьшению электрического сопротивления столба, к возрастанию тока возбуждения и в результате – к восстановлению прежнего значения напряжения (с определенной точностью). При повышении напряжения описанный процесс пойдет в обратном направлении и опять приведет к восстановлению заданного значения напряжения. Заданное значение (уровень) напряжения $u_{вх}$ можно изменить с помощью реостата, включенного последовательно с обмоткой возбуждения.

Изображенный на схеме регулятор снабжен изодромной обратной связью. Изодромная связь реализуется с помощью стабилизирующего трансформатора.

Первичной обмоткой трансформатор включен на вводы обмотки возбуждения, вторичная обмотка включена последовательно с обмоткой электромагнита регулятора.

Блок-схема регулятора приведена на рис. 20. Линеаризованные уравнения регулятора и генератора составляются для определенного значения напряжения u_0 . Угольный столб с электромагнитом представлен в виде колебательного звена. После линеаризации уравнений динамические свойства генератора обычно с

достаточной точностью аппроксимируются инерционным звеном. Исходные данные приведены в табл. 9.

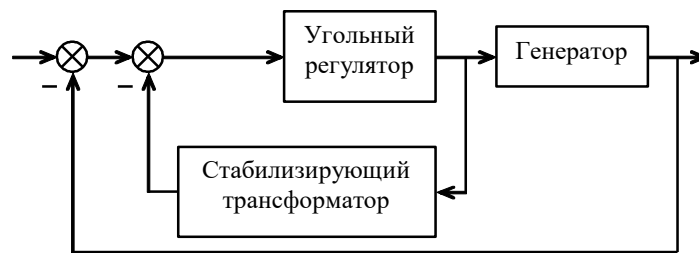


Рис. 20. Блок-схема регулирования напряжения генератора постоянного тока

Таблица 9

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Угольный регулятор	$k_y, \text{ Ом/В}$	20	30	20
	$T_y, \text{ с}$	0,1	0,1	0,1
	ξ_y	0,1	0,1	0,05
Генератор	$k_G, \text{ В/А}$	1	2	3
Трансформатор	$T_T, \text{ с}$	0,02	0,01	0,02
	k_T	5	5	10
Сопротивление обмотки возбуждения	$R_{ОВ}, \text{ Ом}$	10	20	25
Сопротивление угольного столба	$R_y, \text{ Ом}$	100	100	100
Сопротивление обмоток трансформатора	$R_1, \text{ Ом}$	10	10	10
	$R_2, \text{ Ом}$	100	50	80

7. Следящая система копировально-фрезерного станка

На рис. 21 показана схема следящей системы копировально-фрезерного станка. Схема обеспечивает слежение фрезы 6 за движением копировального пальца 1. Если $g(t)$ – перемещение копировального пальца, $x(t)$ – перемещение фрезы, то $\varepsilon = g(t) - x(t)$ – рассогласование или ошибка следящей системы.

Рассогласование ε измеряется трансформаторным индуктивным датчиком 2 и в виде напряжения $u_\varepsilon = k_1 \cdot \varepsilon$ через электронный усилитель 3 электромашинный усилитель 4. Выходное напряжение усилителя u_2 питает двигатель 5, который через редуктор перемещает фрезу в сторону уменьшения рассогласования ε . Одновременно с фрезой 6 перемещается корпус, на котором помещены сердечники индуктивного датчика 2. Когда сердечники займут положение, симметричное относительно якоря, движение системы прекратится.

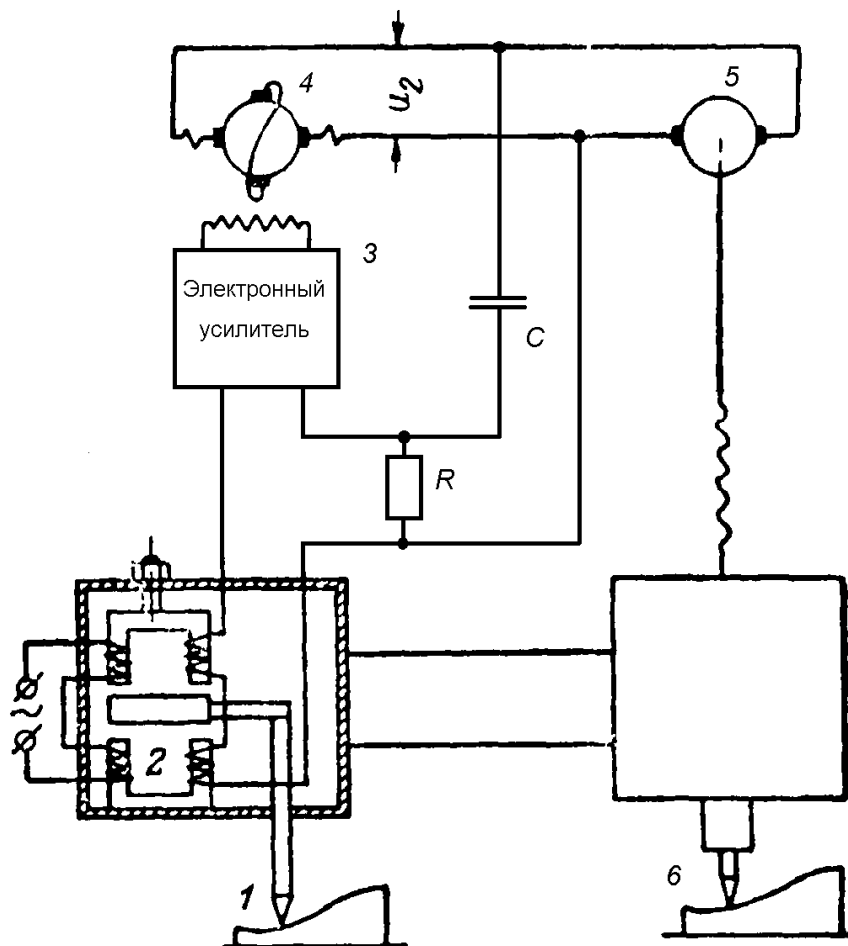


Рис. 21. Схема следящей системы копировально-фрезерного станка

Для повышения устойчивости и качества следящей системы усилители охвачены изодромной обратной связью. Напряжение с выхода электромашинного усилителя через RC-цепочку подается обратно на вход электронного усилителя. Блок-схема следящей системы приведена на рис. 22. Исходные данные приведены в табл. 10.

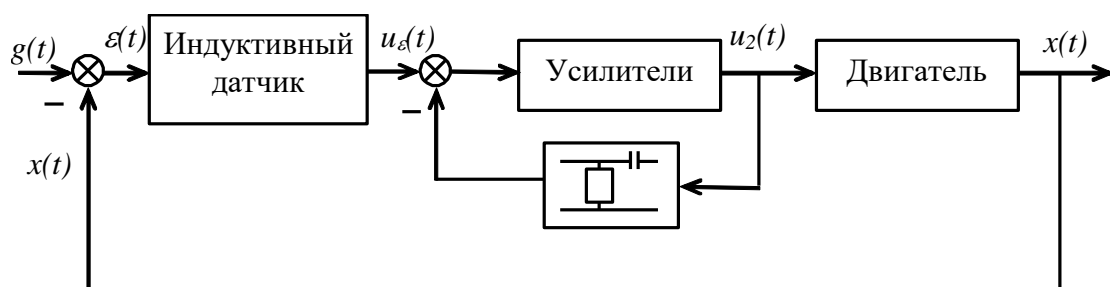


Рис. 22. Структурная схема следящей системы копировально-фрезерного станка

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Индуктивный датчик 2	k_D , В/м	10^4	10^4	10^4
Электронный усилитель 3 с ЭМУ 4	T_y , с	0,1	0,05	0,05
	k_y	100	100	50
Электродвигатель 5 с редуктором	$T_{дв}$, с	0,01	0,02	0,03
	$k_{дв}$, м/В	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
Корректирующая RC-цепь	T_K , с	0,01	0,02	0,02

8. Регулятор скорости вращения электрического двигателя

Система регулирования скорости электрического двигателя с электромашиным усилителем показана на рис. 23а.

Здесь объектом регулирования является некоторый механизм 1, приводимый в движение электрическим двигателем постоянного тока. В данном случае объект и исполнительный механизм 6 представляют единое целое. Скорость вращения вала двигателя должна изменяться по заданному закону или поддерживаться постоянной. Для измерения скорости вращения вала служит тахометрический генератор 2, напряжение на зажимах которого u_r пропорционально скорости вращения вала. Это напряжение сравнивается с заданным значением u_0 и разность $e = u_0 - u_r$, полученная в контуре 4, подается на обмотку возбуждения электромашиного усилителя 5. Электромашиный усилитель питает якорь двигателя 1, служащего регулируемым объектом.

Блок-схема рассматриваемой системы изображена на рис. 23б. Внешним возмущением в этой схеме является изменение момента нагрузки M на валу рабочего двигателя. Каждому значению регулируемой скорости ω соответствует определенное значение напряжения рассогласования e между заданным напряжением u_0 и напряжением тахогенератора u_r . Рассогласование оказывается тем больше, чем больше момент нагрузки на валу двигателя M .

Исходные данные приведены в табл. 11.

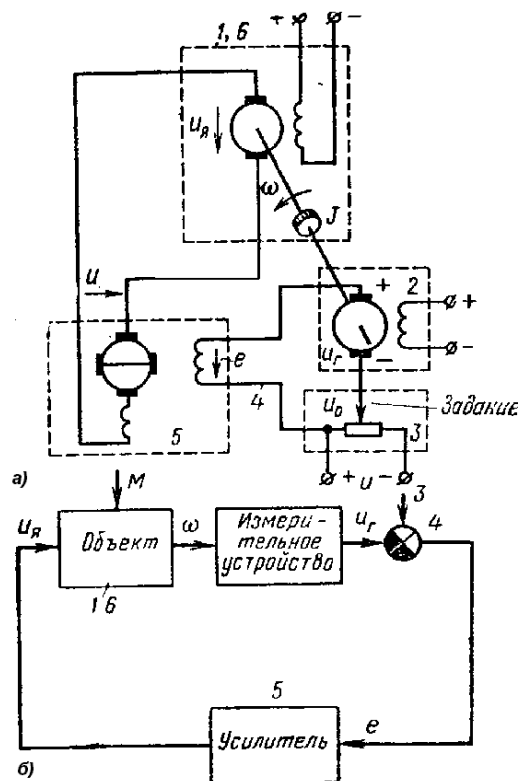


Рис. 23. Регулятор скорости вращения электрического двигателя

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Тахогенератор 2	$k_T, \text{В} \cdot \text{с/рад}$	0,1	0,1	0,1
ЭМУ 5	$T_y, \text{с}$	0,01	0,02	0,03
	k_y	5	10	8
Электродвигатель с исполнительным механизмом	$T_{дв}, \text{с}$	0,05	0,02	0,05
	$k_{дв}, \text{рад/(с} \cdot \text{В)}$	1	2	2

9. Электрогидравлическая следящая система

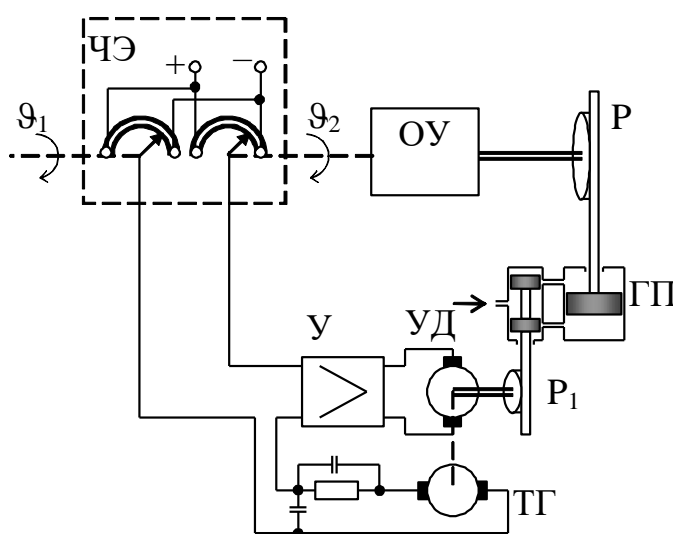


Рис. 24. Электрогидравлическая следящая система

Следящая система (рис. 24) представляет собой замкнутую систему регулирования угла поворота вала (отрабатывающей оси) объекта управления (ОУ) ϑ_2 , управляемого гидроприводом ГП через редуктор Р. Задающее воздействие устанавливается путем поворота некоторого задающего вала (задающей оси) на угол ϑ_1 . Два потенциометра чувствительного элемента ЧЭ соединены с задающей и отрабатывающей осями. Напряжение, снимаемое с каждого из делителей, пропорционально углу поворота оси потенциометра ϑ_1 или ϑ_2 . Разность этих напряжений (напряжение рассогласования) подается на усилитель У, питающий обмотку якоря управляющего двигателя УД. При любом несоответствии положения задающей и отрабатывающей осей в цепи усилителя появляется напряжение рассогласования e , и в обмотке якоря рабочего двигателя возникает ток. Вал двигателя через редуктор P_1 управляет золотником гидропривода ГП и вращается до тех пор, пока угол поворота отрабатывающей оси не станет равным углу поворота задающей оси и напряжение рассогласования не снизится до нуля.

Для обеспечения устойчивости всей системы и повышения качества переходных процессов применяется корректирующая цепь КЦ, содержащая тахо-

метрический генератор ТГ, измеряющий скорость вращения вала двигателя. Напряжение коррекции, пропорциональное скорости вала, подается в цепь сравнения и складывается с напряжением рассогласования. В динамическом режиме корректирующая цепь несколько замедляет разгон двигателя, однако при этом она заглушает автоколебания в системе. Функциональная схема рассматриваемой системы показана на рис. 25. Исходные данные приведены в табл. 12.

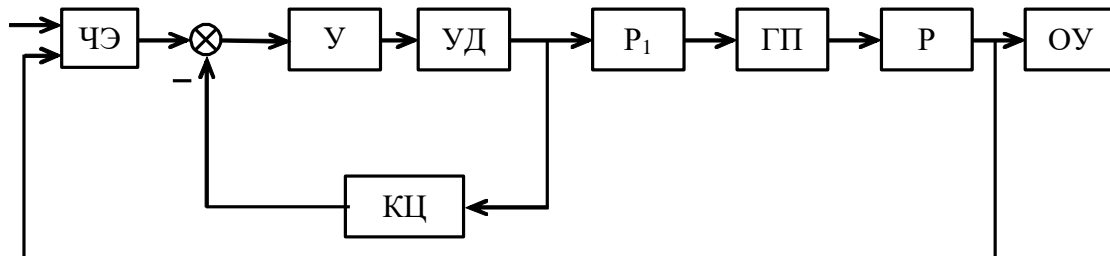


Рис. 25. Блок-схема следящей системы

Таблица 12

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Задающий и принимающий потенциометры	$k_{\text{П}}$, В/рад	1	0,8	2
Усилитель	$k_{\text{У}}$	30	25	40
Управляющий электродвигатель с редуктором P_1	$T_{\text{Д}}$, с	0,1	0,08	0,15
	$k_{\text{Д}}$	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
Гидропривод с редуктором P_2 и объектом управления ОУ	$T_{\text{Г}}$, с	0,5	0,8	1,0
	$k_{\text{Г}}$, рад/м	10	8	8

10. Электрогидравлическая следящая система с электромагнитом

Следящая система (рис. 26) представляет собой замкнутую систему регулирования угла поворота вала (отрабатывающей оси) объекта управления (ОУ) ϑ_2 , управляемого гидроприводом ГП через редуктор Р. Задающее воздействие устанавливается путем поворота некоторого задающего вала (задающей оси) на угол ϑ_1 . Два потенциометра чувствительного элемента ЧЭ соединены с задающей и отрабатывающей осями. Напряжение, снимаемое с каждого из делителей, пропорционально углу поворота оси потенциометра ϑ_1 или ϑ_2 . Разность этих напряжений (напряжение рассогласования) подается на усилитель У, питающий обмотку электромагнита ЭМ. При любом несоответствии положения задающей и отрабатывающей осей в цепи усилителя появляется напряжение рассогласования. В обмотке электромагнита возникает ток и магнитная сила смещает золотник гидропривода ГП, который вращает объект управления ОУ до тех пор, пока угол поворота отрабатывающей оси не станет равным углу поворота задающей оси и напряжение рассогласования не снизится до нуля.

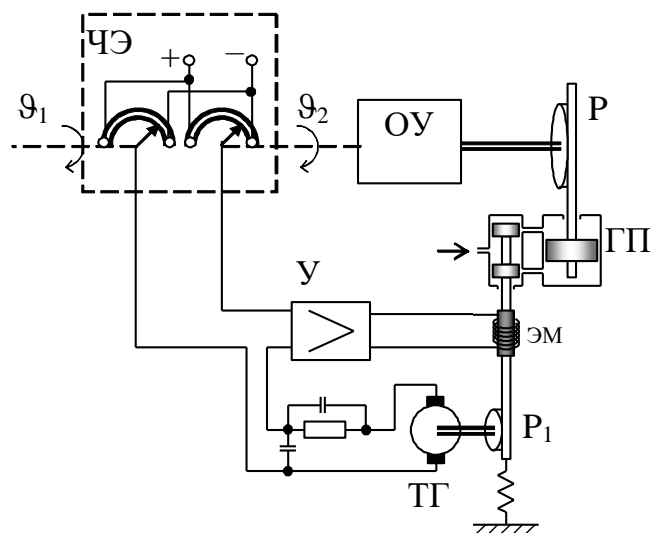


Рис. 26. Электрогидравлическая следящая система с электромагнитом

Для обеспечения устойчивости всей системы и повышения качества переходных процессов применяется корректирующая цепь КЦ, содержащая тахометрический генератор ТГ, измеряющий скорость движения золотника гидропривода. Напряжение коррекции, пропорциональное скорости золотника, подается в цепь сравнения и складывается с напряжением рассогласования. В динамическом режиме корректирующая цепь несколько замедляет разгон двигателя, однако при этом она заглушает автоколебания в системе. Функциональная схема рассматриваемой системы показана на рис. 27. Исходные данные приведены в табл. 13.

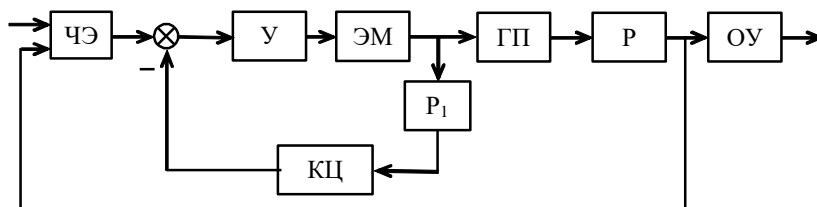


Рис. 27. Блок-схема следящей системы

Таблица 13

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Задающий и принимающий потенциометры	k_P , В/рад	1	2	1,5
Усилитель	k_U	30	40	25
Электромагнит	k_M , м/В	0,001	0,001	0,002
Гидропривод с редуктором P_2 и объектом управления ОУ	T_T , с	0,5	0,8	1,0
	k_G , рад/м	10	15	10

11. Система автоматического регулирования давления

На рис. 28 показана система автоматического регулирования давления.

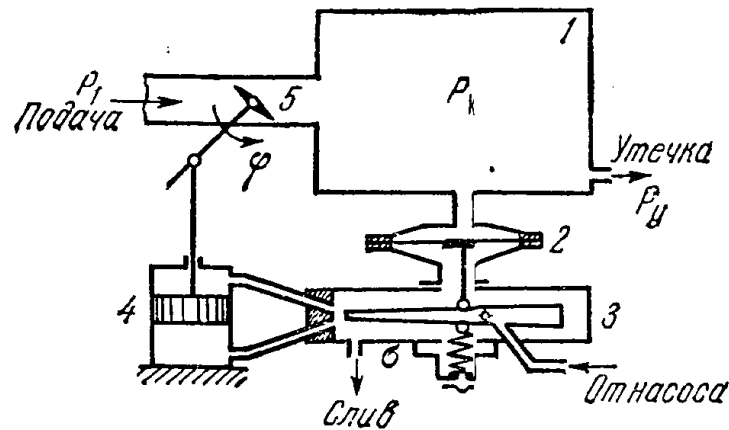


Рис. 28. Система автоматического регулирования давления

Датчик давления 2 настроен на определенное давление в ресивере 1. При отклонении давления p_k от заданного значения мембрана датчика 2 прогибается и через шток смещает трубку струйного усилителя 3. В результате возникает разность давлений в цилиндре гидравлического двигателя 4 и поршень двигается, поворачивая заслонку 5, таким образом изменяется подача газа, чтобы привести давление p_k к заданному значению. Работа мембранного датчика с трубкой струйного усилителя описывается уравнением $x = k_M \Delta p$, где x – смещение конца струйной трубки, Δp – отклонение давления от заданного, которое определяется настройкой датчика, k_M – коэффициент пропорциональности.

Блок-схема системы представлена на рис. 29. Исходные данные приведены в табл. 14.

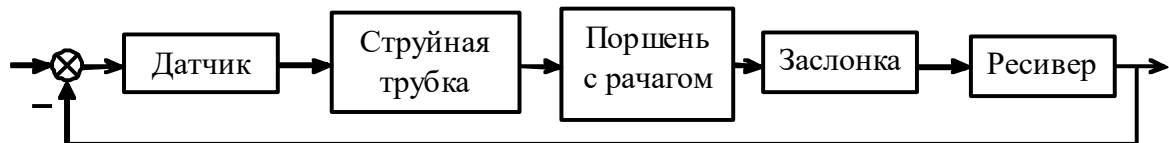


Рис. 29. Блок-схема системы автоматического регулирования давления.

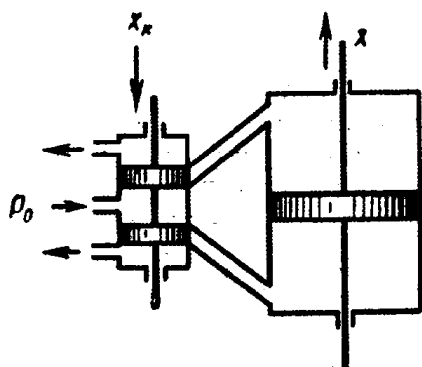
Таблица 14

Исходные данные

Звено	Параметр	Значение		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Мембранный датчик с трубкой	k_M , м/Па	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}
Струйная трубка	k_C , Па/м	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$
Поршень с рычагом и заслонкой	k_P , рад/Па	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Ресивер	T_P , с	10	12	15
	k_P , Па/рад	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$

3. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ САУ

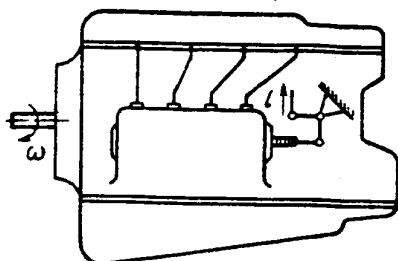
Ниже приведены уравнения элементов систем автоматического управления, которые используются при построении систем в вариантах заданий п. 2.



Гидравлический серводвигатель (гидропривод)

$$T_{\Gamma} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = k_D x_k,$$

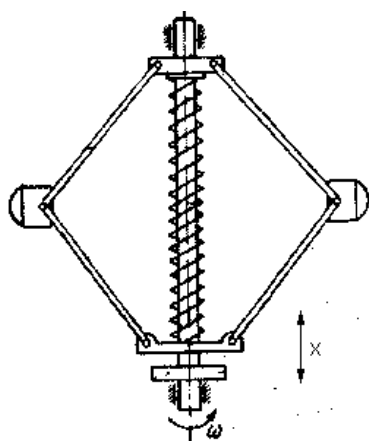
где x – перемещение штока поршня;
 x_k – перемещение штока золотника;
 T_{Γ} – постоянная времени;
 k_D – коэффициент передачи.



Дизель

$$T_D \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_D l,$$

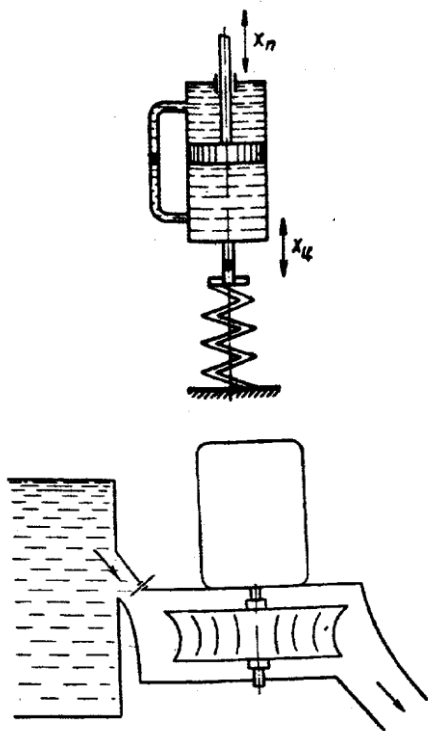
где l – положение рейки топливного насоса;
 ω – угловая скорость вращения вала дизеля;
 T_D – постоянная времени дизеля;
 k_D – коэффициент передачи дизеля.



Центробежный тахометрический датчик

$$T^2 \frac{d^2x}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx}{dt} + x = k\omega,$$

где x – перемещение нижней ползушки;
 ω – угловая скорость вращения;
 T, ξ, k – параметры датчика.



Гидравлическое корректирующее устройство изодромного типа (изодром)

$$T_{\text{И}} \frac{dx_{\text{ц}}}{dt} + x_{\text{ц}} = T_{\text{И}} \frac{dx_{\text{п}}}{dt},$$

где $T_{\text{И}}$ – постоянная времени изодрома.

Гидротурбина

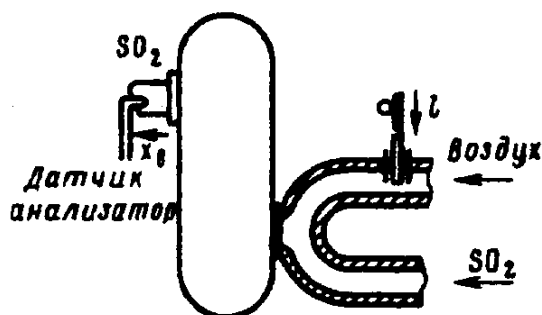
Уравнение турбины в отклонениях от установившегося режима

$$T_0 \frac{dy}{dt} + \gamma(t) = \mu(t),$$

где $\gamma = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ – относительное отклонение угловой скорости от установившегося значения ω_0 ;

$\mu = \frac{\Delta z}{z_0}$ – относительное перемещение задвижки z , z_0 – положение задвижки в установившемся режиме;

$T_0 = \frac{J_{\text{П}} \omega_0}{M_0}$ – постоянная времени гидротурбины, где $J_{\text{П}}$ – момент инерции турбины; M_0 – момент сопротивления в установившемся режиме.



Сушильная башня для производства серной кислоты

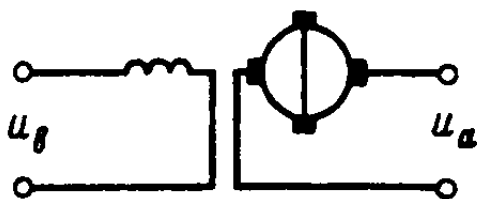
$$T_1 T_2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = k l(t),$$

где $x(t)$ – напряжение с газоанализатора, пропорциональное относительной концентрации газа SO_2 в смесителе;

$l(t)$ – положение заслонки;

T_1, T_2 – постоянные времени;

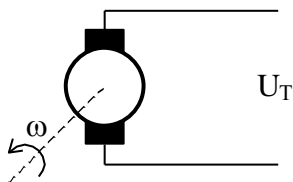
k – коэффициент передачи.



Электромашинный усилитель

$$\left(T_y \frac{dU_a}{dt} + U_a \right) = k_y U_B ,$$

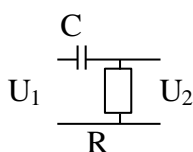
где k_y – коэффициент усиления ЭМУ;
 T_y – постоянная времени.



Тахогенератор

$$U_T = k_T \omega ,$$

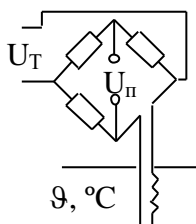
где ω – угл. скорость вращения вала;
 U_T – напряжение;
 k_T – коэффициент передачи.



Корректирующая RC-цепь

$$T_K \frac{dU_1}{dt} = T_K \frac{dU_2}{dt} + U_2 ,$$

где U_1 – входное напряжение;
 U_2 – выходное напряжение;
 $T_K = R \cdot C$ – постоянная времени цепи.

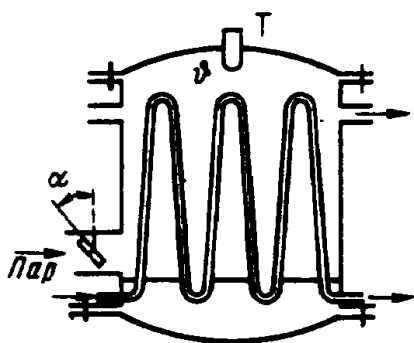


Термосопротивление в мостовой схеме

$$U_T = k_T \Delta \vartheta ,$$

где k_T – коэффициент передачи измерителя;
 $\Delta \vartheta$ – отклонение температуры от номинального значения;

U_T – напряжение.



Теплообменник

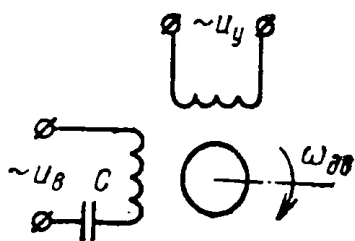
$$T_1 T_2 \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = k_{TO} \alpha ,$$

где k_{TO} – передаточный коэффициент теплообменника;

T_1, T_2 – постоянные времени теплообменника;

ϑ – температура;

α – угол поворота заслонки.

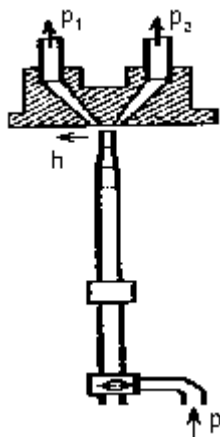


Электрический двухфазный двигатель переменного тока

$$T_D \frac{d\omega_{дв}}{dt} + \omega_{дв} = k_D u_y ,$$

где T_D – постоянная времени двигателя;
 k_D – коэффициент передачи двигателя;
 u_y – напряжение на управляющей обмотке;

$\omega_{дв}$ – угл. скорость вращения вала.



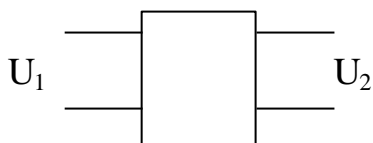
Струйная трубка

$$\Delta p = p_1 - p_2 = k_c h ,$$

где h – отклонение конца трубки от среднего положения;

p_1, p_2 – значения давлений в выходных каналах;

k_c – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции трубки и входного давления.



Электромагнитный усилитель

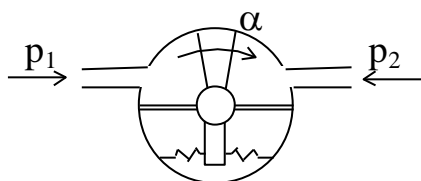
$$T_M \frac{dU_2}{dt} + U_2 = k_M U_1 ,$$

где U_1 – входное напряжение;

U_2 – выходное напряжение;

k_M – коэффициент усиления;

T_M – постоянная времени магнитного усилителя.



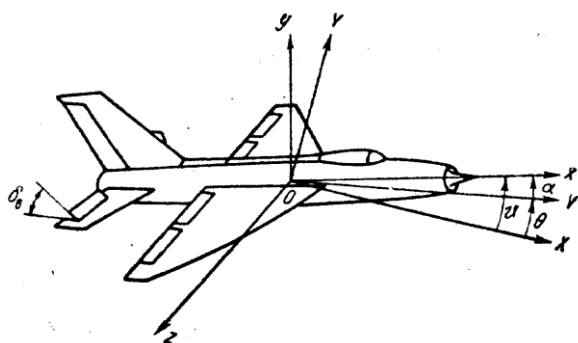
Поворотный пневматический двигатель

$$\alpha = k_{\Pi} \Delta p ,$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ – перепад давлений;

α – угол поворота вала двигателя;

k_{Π} – коэффициент передачи двигателя.



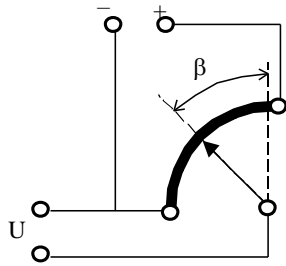
Самолет (угол тангажа)

$$T_C^2 \frac{d^2 \vartheta(t)}{dt^2} + 2\xi_C T_C \frac{d\vartheta(t)}{dt} + \vartheta(t) = k_C \left(T_{C1} \frac{d\delta_B(t)}{dt} + \delta_B(t) \right) ,$$

где ϑ – угол тангажа;

δ_B – угол отклонения руля высоты;

k_C, T_C, T_{C1}, ξ_C – параметры самолета.



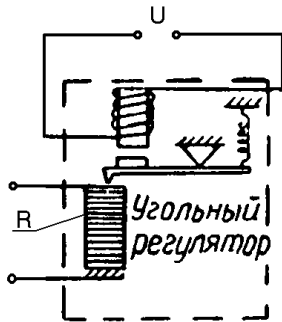
Потенциометр

$$U = k_{\pi} \beta,$$

где U – напряжение;

β – угол поворота движка потенциометра;

k_{π} – коэффициент передачи.



Угольный регулятор

$$T_y \frac{d^2 R}{dt^2} + 2 \xi_y T_y \frac{dR}{dt} + R = k_y U,$$

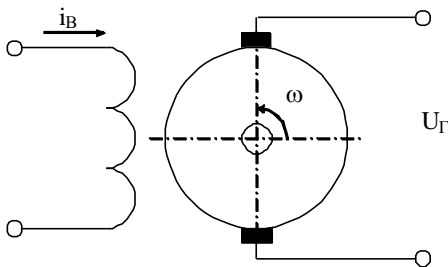
где U – напряжение на обмотке электромагнита;

R – сопротивление угольного столба;

T_y – постоянная времени;

ξ_y – коэффициент затухания;

k_y – коэффициент передачи.

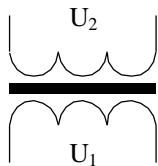


Генератор постоянного тока

напряжение генератора U_{Γ} пропорционально току в обмотке возбуждения i_B и частоте вращения вала генератора ω :

$$U_{\Gamma} = c \omega i_B = k_{\Gamma} i_B,$$

где $k_{\Gamma} = c \omega$ – коэффициент передачи генератора (частоту вращения ω считаем постоянной).



Трансформатор

$$T_T \frac{dU_2}{dt} + U_2 = k_T \frac{dU_1}{dt},$$

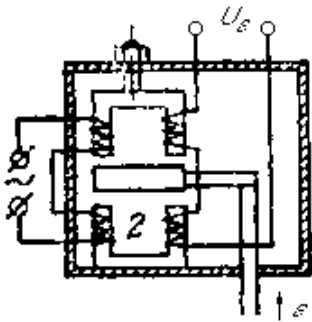
где U_1 – входное напряжение;

U_2 – выходное напряжение;

$$T_T = L_{TP} / R_{TP};$$

L_{TP} , R_{TP} – индуктивность и сопротивление первичной обмотки трансформатора;

$$k_T = \frac{w_2}{w_1} T_T \text{ – коэффициент трансформатора, где } w_1, w_2 \text{ – число витков первичной и вторичной обмоток.}$$



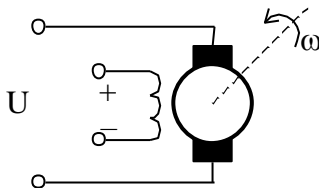
Индуктивный датчик

$$U_{\varepsilon} = k_{\text{д}} \varepsilon,$$

где ε – смещение;

U_{ε} – выходное напряжение датчика.

Электрический двигатель постоянного тока



$$T_{\text{д}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_{\text{д}} U,$$

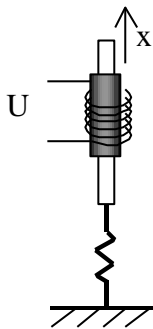
где $T_{\text{д}}$ – постоянная времени двигателя;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент передачи двигателя;

U – напряжение на управляющей обмотке;

ω – угловая скорость вращения вала.

Электромагнит



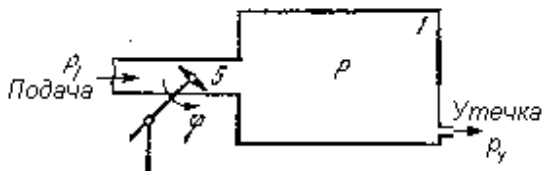
$$x = k_{\text{м}} U,$$

где x – перемещение сердечника магнита;

U – напряжение на обмотке магнита;

$k_{\text{м}}$ – коэффициент передачи электромагнита.

Ресивер



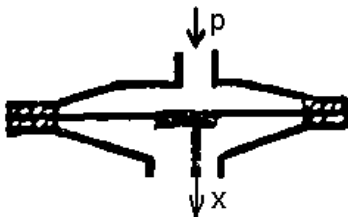
$$T_{\text{р}} \frac{dp}{dt} + p = k_{\text{р}} \varphi,$$

где p – давление в ресивере;

φ – угол поворота заслонки;

$T_{\text{р}}, k_{\text{р}}$ – параметры ресивера.

Мембранный датчик давления



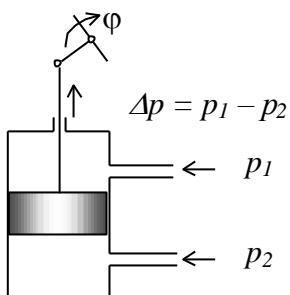
$$x = k_{\text{д}} \Delta p,$$

где Δp – отклонение давления от заданного значения;

x – перемещение мембраны;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент передачи датчика.

Поршень с рычагом и заслонкой



$$\varphi = k_{\text{п}} \Delta p,$$

где φ – угол поворота заслонки;

Δp – перепад давлений на поршне;

$k_{\text{п}}$ – коэффициент передачи.

Контрольные вопросы

1. Как получить передаточную функцию САУ, зная ее дифференциальное уравнение?
2. Как получить дифференциальное уравнение САУ, зная ее передаточную функцию?
3. В чем отличие между передаточными функциями разомкнутой и замкнутой системами?
4. Как получить передаточную функцию САУ по ее структурной схеме?
5. Что называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)?
6. Что такое фазо-частотная характеристика (ФЧХ)?
7. Как построить амплитудно-фазовую характеристику (АФХ)?
8. Чем отличаются частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) от логарифмических частотных характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ)?
9. Что такое переходная характеристика?
10. Как составляется главный определитель Гурвица?
11. Какую передаточную функцию (замкнутой или разомкнутой системы) необходимо использовать в критерии а) Гурвица? б) Михайлова? в) Найквиста?
12. Каким образом судить об устойчивости по кривой Михайлова?
13. Как должна проходить АФХ разомкнутой системы, чтобы САУ была устойчивой?
14. Как определить частоту среза системы?
15. Как найти запасы устойчивости а) по АФХ системы? б) по ЛЧХ?
16. Что называют коэффициентами ошибок?
17. Как их определить?
18. Как найти установившуюся ошибку, если известны коэффициенты ошибок?
19. Как определить а) время регулирования САУ? б) перерегулирование? в) колебательность переходного процесса?

Библиографический список

1. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
2. Егоров К.В. Основы теории автоматического регулирования. М.: Энегррия, 1967. – 648 с.
3. Теория автоматического управления / Под ред. Соломенцева Ю.М., М.: Высшая школа, 2000. – 268 с.
4. Теория автоматического управления / Под ред. Нетушил А.В., М.: Высшая школа, 1976. – 400 с.
5. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989. – 301 с.
6. Аверьянов Г.С., Туровец А.Г., Яковлев А.Б. Управление в технических системах. Омск: ОмГТУ, 2000. – 80 с.

