

**УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ
ДЛЯ ВЫСШИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

И. Ф. БОРОДИН, Н. И. КИРИЛИН



ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ АВТОМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ



Допущено Главным управлением высшего и среднего сельскохозяйственного образования Министерства сельского хозяйства СССР в качестве учебного пособия для студентов сельскохозяйственных высших учебных заведений по специальностям «Электрификация сельского хозяйства» и «Механизация сельского хозяйства»



МОСКВА «КОЛОС» 1974

631.3

Б 83

УДК 631.171—52+631.3—52](075.8)

Рецензенты:

доктор технических наук И. И. Мартыненко (УСХА),
кандидаты технических наук Ю. А. Тимошенко (УСХА),
Ю. Н. Новиков и Ю. М. Осадчий (Кубанский СХИ).

Редактор — инженер И. С. Сороко.

Главы I, II, IV и X, § 2 главы III, § 1 главы VII, §§ 3 и 4 главы VIII, лабораторные работы 1—5, 7 и 8 главы IX написаны И. Ф. Бородиным, остальные материалы — Н. И. Кирилин.

Бородин Иван Федорович и Кирилин Николай Иванович.

Б 83 Практикум по основам автоматики и автоматизации производственных процессов. М., «Колос», 1974.

255 с. с ил. (Учебники и учеб. пособия для высш. с.-х. учеб. заведений).

Основная цель данного пособия — научить студентов применять знания общетеоретического характера для решения практических задач, развить в них навыки и умения проектирования и расчета устройств и систем автоматического управления и подготовить их таким образом к будущей самостоятельной работе. Поэтому центральное место в пособии занимают конкретные примеры решения обширного круга тематически разнообразных задач по автоматике. Наряду с этим в книгу введен курс лабораторно-практических работ.

Книга может оказаться полезной и для инженерно-технических работников, связанных по роду деятельности с автоматизацией сельскохозяйственного производства.

40204
Б $\frac{035(01)-74}{238-74}$

631.3

ВЫБОР И РАСЧЕТ СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ



§ 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ВЫБОРУ СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ

Любое автоматическое устройство состоит из отдельных связанных между собой элементов, в которых происходит количественное и качественное преобразование физических величин.

Несмотря на то что элементы автоматики серийно изготавливаются промышленностью и могут быть выбраны по соответствующим каталогам, в ряде практических случаев приходится делать проверочные расчеты некоторых из них.

Дело в том, что для контроля разнообразных параметров, специфически присущих сельскому хозяйству, еще не разработаны датчики и (частично) исполнительные органы. К таким параметрам относятся многие неэлектрические величины, характеризующие или технологический процесс или качество сельскохозяйственной продукции (например, содержание жира, белка, кислот и солей в молоке, степень свежести мяса и яиц, степень спелости овощей и фруктов, содержание влаги, белка и крахмала в зерне и т. п.). Кроме того, сельскохозяйственному производству необходимо большое количество специальных датчиков для контроля и управления физиологическими процессами жизнедеятельности животных и растений.

Что же касается остальных средств, то они в меньшей степени испытывают специфику сельскохозяйственной технологии и могут быть выбраны по справочникам, предназначенным для общепромышленной автоматики.

Наиболее важной частью датчика является его первичный преобразователь — воспринимающий орган, который непосредственно реагирует на контролируемый параметр и преобразует его в необходимый сигнал. Естественно, что воспринимающие органы систем автоматики в большей степени, чем какие-либо другие, подвержены различным влияниям как окружающей среды (широкий диапазон изменения температуры и влажности, агрессивные газы, абразивная пыль, солнечная радиация, коррозия и др.), так и вредным воздействием со стороны автоматизируемого объекта (вибрации, толчки, термические и механические перегрузки, электромагнитные поля и т. п.).

Поскольку электрические датчики неэлектрических величин, как наиболее удобные, универсальные и дешевые, чрезвычайно широко используются в устройствах автоматики стационарных и мобильных сельскохозяйственных установок, машин и агрегатов, в данной главе приводятся в основном примеры расчета датчиков именно этого типа.

Более надежными и современными средствами автоматики являются новые бесконтактные элементы, в частности полупроводниковые, которые получили массовое распространение в последнее десятилетие. На их

основе изготавливаются логические элементы автоматики, которые с успехом могут заменить, как показано ниже в примерах, существующие релейно-контактные схемы автоматики.

§ 2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ

Пример 1. Рассчитать потенциометрический датчик (рис. 1) для дистанционного измерения механической силы $F = 50$ Н с погрешностью не более 0,1 Н. Пружина, используемая в качестве воспринимающего элемента, при изменении силы $\Delta F = 1$ Н перемещает движок потенциометра на $\Delta x = 2$ мм, то есть чувствительность пружины

$$k = \frac{\Delta x}{\Delta F} = 2 \frac{\text{мм}}{\text{Н}}.$$

Решение. Выбираем вторичный прибор — вольтметр магнитоэлектрической системы со шкалой до 250 В, сопротивлением $r_{\Pi} = 5 \cdot 10^4$ Ом. Статический коэффициент преобразования — чувствительность датчика $k_d = 4$ В/Н. Значит, при силе 50 Н показания вольтметра $U_{\Pi} = 200$ В.

Определив длину рабочей части потенциометра

$$x_{\max} = Fk = 50 \cdot 2 = 100 \text{ мм}, \text{ из выражения}$$

$$\frac{x_{\max}}{l} = \frac{U_{\Pi}}{U}$$

найдем длину всей намотки потенциометра

$$l = \frac{U}{U_{\Pi}} x_{\max} = \frac{220}{200} \cdot 100 = 110 \text{ мм}.$$

При выборе обмоточного провода необходимо помнить, что его диаметр не может быть больше шага намотки. Шаг намотки Δl определяют по чувствительности k и заданной погрешности измерения (0,1 Н):

$$\Delta l = 0,1 k = 0,2 \text{ мм}.$$

Принимаем нихромовый провод: диаметр $d = 0,15$ мм (в изоляции $d_{\text{пр}} = 0,17$ мм, сечение $q = 0,0177$ мм²). Удельное сопротивление нихрома $\rho = 1,1$ Ом·мм²/м.

Общее число витков потенциометра

$$\omega = \frac{l}{\Delta l} = \frac{110}{0,2} = 550 \text{ витков}.$$

При определении сопротивления r потенциометра следует учесть, что для получения линейной характеристики

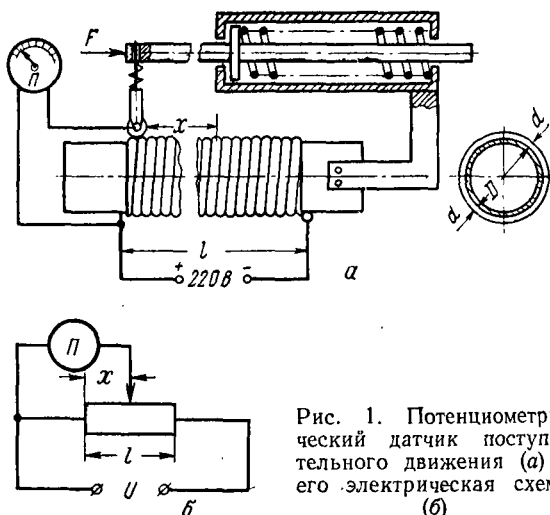


Рис. 1. Потенциометрический датчик поступательного движения (а) и его электрическая схема (б)

оно должно быть в пределах $\frac{r_{\Pi}}{8 \div 10}$. Принимаем $r = \frac{5 \cdot 10^4}{10} = 5 \cdot 10^3$ Ом. Тогда сопротивление рабочей части потенциометра

$$r_x = r \frac{x_{\max}}{l} = 5 \cdot 10^3 \frac{100}{110} = 4550 \text{ Ом.}$$

Длина обмоточного провода

$$l_{\text{об}} = \frac{r q}{\rho} = \frac{5000 \cdot 0,0177}{1,1} = 80 \text{ м.}$$

Длина одного витка

$$l_{\text{сп}} = \frac{l_{\text{об}}}{\omega} = \frac{80 \cdot 10^3}{550} = 145 \text{ мм.}$$

Диаметр D каркаса находим из уравнения

$$l_{\text{сп}} = \pi (D + d); D = \frac{l_{\text{сп}} - \pi d}{\pi} = \frac{145}{3,14} - 0,15 = 46 \text{ мм.}$$

Плотность тока в потенциометре

$$\Delta = \frac{U}{r q} = \frac{220}{5000 \cdot 0,0177} = 2,5 \text{ А/мм}^2.$$

Допустимая плотность тока потенциометров составляет $2 \div 3 \text{ А/мм}^2$.

Найдем удельную боковую поверхность охлаждения, которая должна быть $\sigma_0 \geq 5 \div 7 \text{ см}^2/\text{Вт}$, если температура обмотки потенциометра превышает температуру окружающей среды не более чем на 40°C .

Мощность, выделяемая потенциометром

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{220^2}{5 \cdot 10^3} = 9,7 \text{ Вт.}$$

Боковая поверхность намотки

$$S = \pi D l = 3,14 \cdot 4,6 \cdot 11 = 159 \text{ см}^2.$$

Удельная боковая поверхность охлаждения

$$\sigma_0 = \frac{S}{P} = \frac{159}{9,7} = 16,4 \text{ см}^2/\text{Вт}.$$

Таким образом, рассчитанный потенциометр будет находиться в нормальном тепловом режиме.

Пример 2. Рассчитать параметры и характеристику индуктивного датчика, изображенного на рисунке 2, а, при изменении воздушного зазора δ от 1 до 10 мм под действием силы F . Напряжение питания датчика $U_c = 24 \text{ В}$. Размеры магнитной системы таковы: $a = b = c = 1 \text{ см}$, $h = 2 \text{ см}$ (рис. 2, б). В качестве вторичного прибора используется миллиамперметр переменного тока. При расчете разрешается

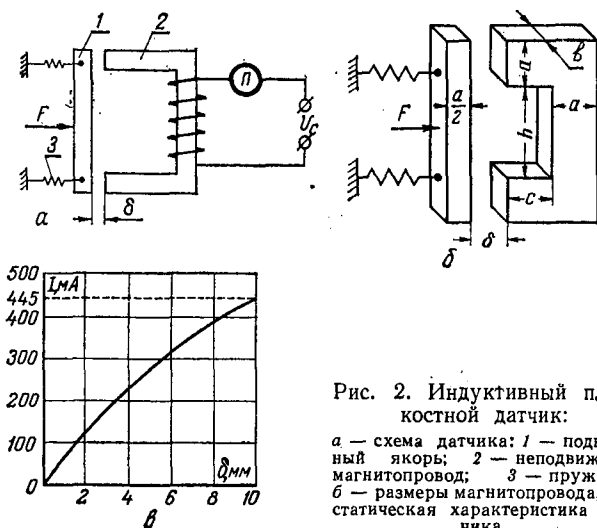


Рис. 2. Индуктивный плоскостной датчик:

a — схема датчика: 1 — подвижный якорь; 2 — неподвижный магнитопровод; 3 — пружина; b — размеры магнитопровода; c — статическая характеристика датчика.

пренебречь магнитным сопротивлением магнитопровода и сопротивлением миллиамперметра.

Решение. Площадь окна катушки с учетом площади каркаса обмотки, толщина которого равна 0,1 см: $Q = hc - 0,1(h + 2c) = 2 \cdot 1 - 0,1(2 + 2) = 1,6 \text{ см}^2$.

Определяем число витков обмотки. Принимаем, что обмотка выполняется проводом марки ПЭ диаметром $d = 0,49 \text{ мм} = 0,049 \text{ см}$, для которого из справочных таблиц или по кривым находим коэффициент заполнения $f_0 = 0,5 \div 0,6$.

Число витков обмотки

$$w = f_0 \frac{Q}{q} = 0,55 \frac{1,6}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,049^2} \approx 468,$$

где q — площадь поперечного сечения провода, см^2 . Принимаем $w = 460$ витков.

Активное сопротивление обмотки

$$r = \rho \frac{l_{\text{ср}} w}{q} = 0,0175 \frac{0,08 \cdot 460}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,49^2} = 34,2 \text{ Ом},$$

где средняя длина витка

$$l_{\text{ср}} = 2(c + a) + 2(c + b) = 2 \cdot 2 + 2 \cdot 2 = 8 \text{ см}.$$

Определяем индуктивность L и индуктивное сопротивление датчика:

$$L = \frac{2\pi w^2 S \cdot 10^{-9}}{\delta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 460^2 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-9}}{\delta} = \frac{1,33}{\delta} \cdot 10^{-3} \text{ Г};$$

$$x = \omega L = 314 \frac{1,33}{\delta} \cdot 10^{-3} = \frac{0,418}{\delta} \text{ Ом},$$

где S — сечение магнитопровода, м^2 ;
 $\omega = 2\pi f$ — угловая частота (при $f = 50 \text{ Гц}$ $\omega = 314$).

Находим зависимость тока I_n от воздушного зазора:

$$I_n = \frac{U_c}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} = \frac{24}{\sqrt{34,2^2 + \left(\frac{0,418}{\delta}\right)^2}} \text{ А}.$$

Задаваясь значениями δ от 0 до 0,01 м (через каждые $\Delta\delta = 0,001 \text{ м}$), определяем соответствующие значения I_n :

$\delta, \text{ мм}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_n, \text{ мА}$	0	57,0	114	168	218	284	312	350	385	415	445

а затем строим характеристику (рис. 2, в).

Чувствительность датчика без учета активного сопротивления

$$k_d = \frac{dI_n}{d\delta} = \frac{U \cdot 10^5}{2\pi\omega^2\omega S} = \frac{24 \cdot 10^5}{6,28 \cdot 460^2 \cdot 314 \cdot 10^{-4}} = 57 \text{ А/м.}$$

Максимальная плотность тока в обмотке датчика

$$\Delta = \frac{I_n}{q} = \frac{0,445}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,49^2} = 2,36 \text{ А/мм}^2.$$

Следовательно, плотность тока находится в допустимых пределах.

Пример 3. Определить чувствительность по току плоскостного емкостного датчика перемещения для $\delta = 1 \text{ мм}$ и ее увеличение при переводе питающего напряжения $U = 220 \text{ В}$ с частоты 50 кГц на 500 кГц . Построить зависимость тока и чувствительности датчика от величины воздушного зазора. Датчик выполнен в виде воздушного конденсатора с переменным расстоянием между пластинами, площадь которых $S = 113 \text{ см}^2$ (рис. 3, а).

Решение. Определяем ток I_n конденсатора по формуле

$$I_n = \frac{U_c}{x} = \frac{U_c \omega \epsilon_0 S}{\delta},$$

где $x = \frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление датчика;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ — диэлектрическая постоянная воздуха;

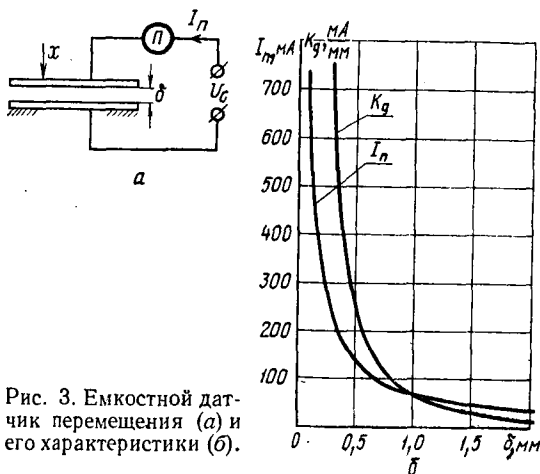


Рис. 3. Емкостной датчик перемещения (а) и его характеристики (б).

а) при $f = 50$ кГц

$$I_n = \frac{220 \cdot 2\pi \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0113}{\delta} = \frac{6,9}{\delta} \text{ мА};$$

б) при $f = 500$ кГц

$$I_n = \frac{69}{\delta} \text{ мА}.$$

Определяем чувствительность датчика при $\delta = 1$ мм по формуле

$$k_d = \frac{dI_n}{d\delta} = -\frac{U_c \omega \epsilon_0 S}{\delta^2}:$$

а) при $f = 50$ кГц

$$k_d = \frac{69}{\delta^2} = -6,9 \text{ мА/мм};$$

б) при $f = 500$ кГц

$$k_d = -\frac{69}{\delta^2} = -69 \frac{\text{мА}}{\text{мм}}.$$

Строим графики зависимостей тока I_n и чувствительности k_d от величины перемещения δ при $f = 500$ кГц (рис. 3, б).

Таким образом, чувствительность емкостного датчика прямо пропорциональна частоте источника питания и обратно пропорциональна квадрату расстояния между пластинами.

Пример 4. Выбрать параметры двухтактной мостовой схемы емкостного датчика с плоскими пластинами и воздушным диэлектриком (рис. 4, а) и найти зависимость тока нагрузки и чувствительности датчика от перемещения x . Напряжение $U_c = 220$ В, частота $f = 50$ кГц, площадь пластин $S = 113 \text{ см}^2$, начальный воздушный зазор $\delta_0 = 1$ мм.

Решение. Выбираем параметры схемы из условия получения равноплечего моста и полной компенсации его реактивностей:

$$x_C = x_L = r_n = \frac{1}{2} r_1 = \frac{1}{2} r_2,$$

где $x_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление дросселя;
 r_n и r_1, r_2 — сопротивление нагрузки и плеч моста;

x_c — емкостное сопротивление датчика:

$$x_c = \frac{1}{2\omega C_0} = \frac{1 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 6,28 \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 100} = 15,9 \text{ кОм};$$

C_0 — первоначальная емкость плеча:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{\delta_0} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0113}{0,001} \Phi = 100 \text{ пФ}.$$

Принимаем $r_H = 16 \text{ кОм}$; $r_1 = r_2 = r = 2 r_H = 32 \text{ кОм}$ номинальной мощностью в 1 Вт.

Фактическая мощность

$$\frac{U_1^2}{r_1} = \frac{U_2^2}{r_2} = \frac{\left(\frac{220}{2}\right)^2}{32 \cdot 10^3} = 0,38 \text{ Вт}.$$

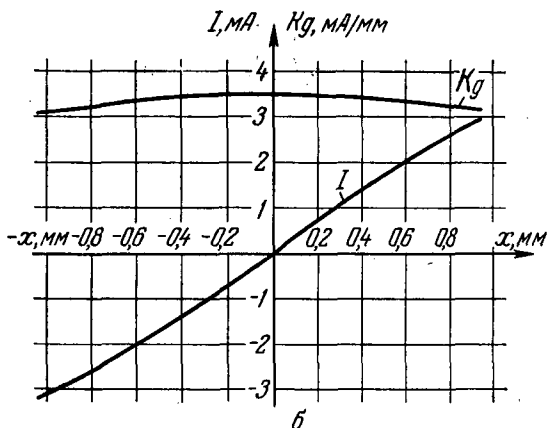
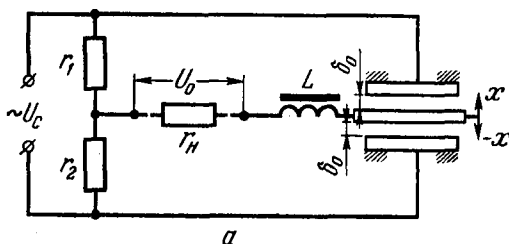


Рис. 4. Схема двухтактного мостового емкостного датчика с плоскими пластинами (а) и его характеристики (б).

Индуктивность

$$L = \frac{16 \cdot 10^3}{\omega} = \frac{16 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^4} = 0,51 \text{ Г.}$$

Определяем зависимость выходного напряжения от величины воздушного зазора двухтактного конденсатора, то есть от перемещения x средней пластины. При этом емкость верхнего промежутка $C_B = \frac{\epsilon_0 S}{\delta_0 - x}$, а нижнего $C_H = \frac{\epsilon_0 S}{\delta_0 + x}$.

Напряжение на выходе в режиме холостого хода ($r_H = \infty$)

$$U_0 = U_c \frac{x_H}{x_H + x_B} = U_c \frac{r_1}{r_1 + r_2}$$

или

$$U_0 = \frac{C_B - C_H}{C_B + C_H} \cdot \frac{U_c}{2}.$$

С учетом выражений для C_B и C_H получим $U_0 = \frac{1}{2} \frac{x}{\delta_0} U_c$, то есть статическая характеристика при $r_H = \infty$ линейна на всем диапазоне x от $-\delta_0$ до $+\delta_0$.

Зависимость тока в нагрузке r_H от перемещения x

$$I = \frac{U_0}{r_H + Z_B},$$

где Z_B — внутреннее сопротивление схемы:

$$Z_B = \frac{r}{2} + j \left[x_L - \frac{1}{\omega (C_B + C_H)} \right] = \frac{r}{2} + j \left(x_L - \frac{1 - \frac{x^2}{\delta_0^2}}{2\omega C_0} \right).$$

Тогда

$$I = \frac{1}{2} \frac{x}{\delta_0} \frac{U}{r_H + \frac{r}{2} + j \left(x_L - \frac{1 - x^2/\delta_0^2}{2\omega C_0} \right)}.$$

При $\delta_0 = 1 \text{ мм}$ $x_C = r_H = \frac{r}{2} = x_L = 16 \text{ кОм}$ и

$$I = \frac{110x}{32 \cdot 10^3 + j16 \cdot 10^3 x^2} = \frac{0,11x}{\sqrt{32^2 + 16^2 x^4}} \text{ А.}$$

Чувствительность датчика

$$k_d = \frac{dI}{dx} = \frac{0,11(32 + j16x^2) - j0,11x^2 \cdot 2 \cdot 16}{(32 + j16x^2)^2}$$

или

$$k_d = \frac{3,52 - j 1,76x^2}{(32 + j 16x^2)^2} = \frac{\sqrt{3,52^2 + 1,76^2 x^4}}{32^2 + 16^2 x^4} \text{ А/мм.}$$

Графически зависимости тока I в нагрузке и чувствительности k_d датчика от перемещения x показаны на рисунке 4, б, а в цифровом выражении — приведены ниже.

x , мм	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1
I , мА	3,12	63	2,04	1,37	0,7	0	-0,7	-1,37	-2,04	-2,63	-3,1
k_d , мА/мм	3,13	27	3,35	3,4	3,43	3,44	3,43	3,4	3,31	3,27	3,1

Сравнение характеристик на рисунках 3,б и 4,б позволяет сделать вывод о том, что мостовая схема датчика обеспечивает практически равномерную шкалу вторичного прибора, который отражает зависимость $I = f(x)$, и постоянную чувствительность датчика.

Пример 5. Определить коэффициент статической чувствительности мостовой схемы для измерения деформации изделия с константановыми тензодатчиками в двух противоположных плечах (рис. 5), одновременно испытывающих сжатие или растяжение. Мост согласованный:

$$r_1 = r_2 = r_{d1} = r_{d2} = r_H = 1,7 \text{ кОм.}$$

Допустимая удельная поверхность охлаждения при наклеке тензодатчиков на металл $\sigma_0 = 2 \text{ см}^2/\text{Вт}$; $l = 2 \text{ см}$ и $h = 1 \text{ см}$ (рис. 5, а).

Решение. Напряжение питания моста находим из формулы

$$\sigma_0 = \frac{S}{P_d},$$

где $S = 2hl$ — поверхность охлаждения датчика, см^2 ;

$P_d = \frac{U^2}{4r_d}$ — мощность, рассеиваемая в датчике, Вт.

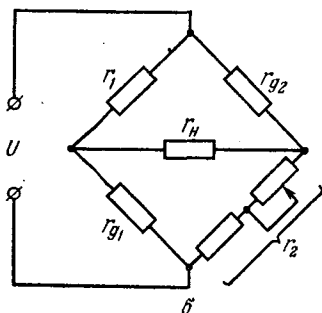
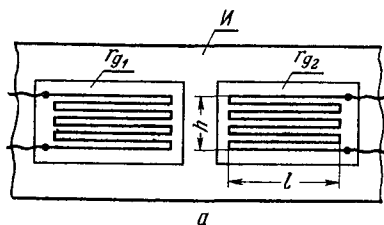


Рис. 5. Схема наклепки тензодатчиков r_{d1} и r_{d2} на изделие II (а) и мостовая схема их включения (б).

Подставляя эти выражения в основную формулу, получим:

$$U = \sqrt{\frac{8kl \cdot r_d}{\sigma_0}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1,7 \cdot 10^3}{2}} = 116 \text{ В.}$$

Принимаем $U = 110 \text{ В}$, что положительно сказывается на увеличении σ_0 .

Коэффициент статической чувствительности моста без учета сопротивления коротких сторон петель тензодатчика определяют по формуле

$$k = \frac{1}{4} n \frac{r_n}{r_n + r_d} \bar{k} U,$$

где $\bar{k} = \frac{\Delta r / r_d}{\Delta l / l}$ — относительный коэффициент чувствительности датчика (для константана $\bar{k} = 2,2$);
 n — число активных плеч моста ($n = 1, 2$ или 4);

Δr и Δl — изменение сопротивления и деформация длинных сторон датчика.

Следовательно,

$$k = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \frac{1,7 \cdot 10^3}{(1,7 + 1,7) \cdot 10^3} \cdot 2,2 \cdot 110 = 60,5 \text{ В}$$

при деформации $\Delta l = l$, или $0,605 \text{ В}$ на 1% относительной деформации.

Мощность, выделяемая в одном плече моста,

$$P_d = \frac{U^2}{4 \cdot r_d} = \frac{110^2}{4 \cdot 1,7 \cdot 10^3} = 1,78 \text{ Вт,}$$

а всей схемой $P \approx 4P_d = 7,15 \text{ Вт}$.

Значит, сопротивления r_1 и r_2 должны быть по мощности не менее 2 Вт .

Пример 6. Рассчитать статические характеристики датчиков температуры, состоящих из двух термпар, для АСУ температурой на уровне $\Theta_a = 600^\circ \text{ С}$ (рис. 6, а) и из одной термпары для дистанционного измерения температуры в пределах от 0 до 700° С (рис. 6, б). Определить коэффициенты статической чувствительности датчиков.

Сопротивление прибора Π (милливольтметра) равно входному сопротивлению АСУ: $r_n = 100 \text{ Ом}$. Длина соединительных проводов $l_n = 20 \text{ м}$. Входная температура может изменяться в пределах $\Theta_n = 500 \div 700^\circ \text{ С}$, температура помещения, в котором установлен прибор, $\Theta_0 = 20^\circ \text{ С}$.

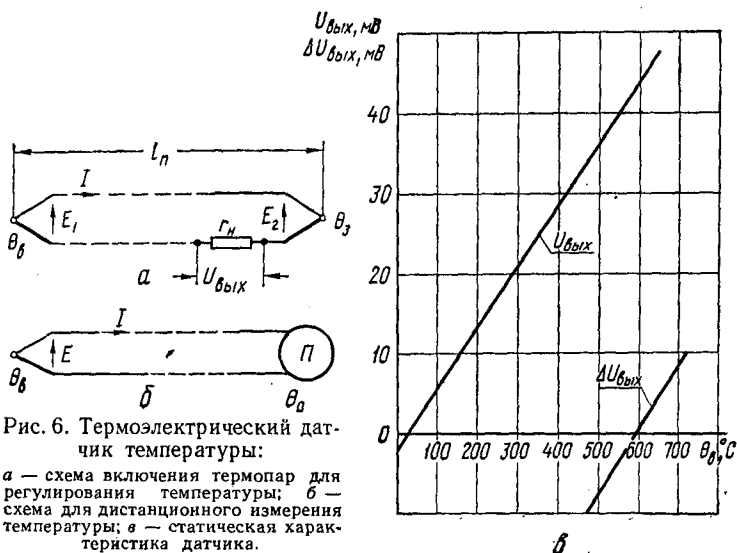


Рис. 6. Термоэлектрический датчик температуры:

a — схема включения термопар для регулирования температуры; *б* — схема для дистанционного измерения температуры; *в* — статическая характеристика датчика.

Для регулирования температуры применяется схема датчика, изображенная на рисунке 6, *a*. При отклонении температуры объекта Θ_b от заданной Θ_a на выходе схемы в режиме холостого хода ($r_n = \infty$) появляется напряжение $U_0 = E_1 - E_2 = k(\Theta_b - \Theta_a)$, где E_1 и E_2 — термоэлектродвижущие силы, соответственно пропорциональные температурам Θ_b и Θ_a ; k — коэффициент статической чувствительности термопар, В/град.

При наличии нагрузки напряжение на выходе схемы

$$U_{вых} = I r_n = \frac{U_0}{r_n + r_n} \cdot r_n = \frac{E_1 - E_2}{1 + \frac{r_n}{r_n}},$$

где r_n — сопротивление соединительных проводов.

При дистанционных измерениях провода присоединяют к клеммам магнитоэлектрического милливольтметра Π (рис. 6, *б*), шкала которого тарируется в градусах Θ_b в соответствии со статической характеристикой $U_{вых} = f(\Theta_b)$.

Решение. По максимальной температуре $\Theta_{b_{max}} = 700^\circ \text{C}$ выбираем из справочника [15] наиболее распространенную термопару хромель-копель с диаметром проводов 2 мм (сечение $q = 3,14 \text{ мм}^2$). Удельное сопротивление

копеля $\rho_k = 0,504$, а хромеля $\rho_x = 0,61 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. Сопротивление соединительных проводов

$$r_n = \rho_k \frac{l_n}{q} + \rho_x \frac{l_x}{q} = (0,504 + 0,61) \frac{20}{3,14} = 7,1 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем статическую характеристику датчика (рис. 6, а) в пределах отклонения $\Delta\Theta_B = \pm 100^\circ \text{С}$. Учитывая, что при $\Theta_B = 600^\circ \text{С}$ $E_2 = 49 \text{ мВ}$ [15], по вышеприведенной формуле, находим:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{E_1 - 49}{1 + \frac{7,1}{100}} = \frac{E_1 - 49}{1,07} \text{ мВ.}$$

Для датчика, изображенного на рисунке 6,б, при $\Theta_B = \Theta_0 = 20^\circ \text{С}$ и $E_2 = 1,31 \text{ мВ}$

$$U_{\text{вых}} = \frac{E_1 - 1,31}{1,07} \text{ мВ.}$$

Графики, отражающие эти зависимости, показаны на рисунке 6, в, а данные, по которым они построены, приведены ниже.

$\Theta_B, ^\circ\text{С}$	0	20	100	200	300	400	500	550	600	650	700
$E_1, \text{мВ}$	0	1,31	6,95	14,65	22,9	31,48	40,15	44,5	49	53,4	57,7
$\Delta U_{\text{вых}}, \text{мВ}$							-8,3	-4,2	0	4,1	8,2
$U_{\text{вых}}, \text{мВ}$	-1,22	0	5,27	12,45	20,15	28,1	36,2	40,4	44,5	48,7	52,7

Статический коэффициент чувствительности датчика (рис. 6, а)

$$k = \frac{d(\Delta U_{\text{вых}})}{d\Theta_B} \approx \frac{\Delta U}{\Delta \Theta_B} = \frac{8,2 + 8,3}{700 - 500} = 8,25 \cdot 10^{-2} \text{ мВ/град.}$$

Статический коэффициент чувствительности датчика (рис. 6, б): минимальный при $\Theta_B = 0 \div 20^\circ \text{С}$

$$k_{\min} = \frac{1,22}{20} = 6,1 \cdot 10^{-2} \text{ мВ/град,}$$

максимальный при $\Theta_B = 600 \div 700^\circ \text{С}$

$$k_{\max} = \frac{8,3}{700 - 600} = 8,3 \cdot 10^{-2} \text{ мВ/град.}$$

Пример 7. Определить температурную характеристику и чувствительность полупроводникового терморезистора типа КМТ-4 с номинальным сопротивлением 30 кОм, если его сопротивление при 323К составляет 7,5 кОм.

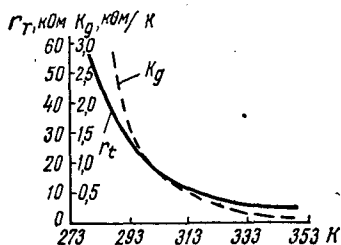


Рис. 7. Зависимость сопротивления r_T и коэффициента чувствительности k_d терморезистора КМТ-4 от температуры T .

Решение. Зависимость сопротивления терморезисторов от температуры T выражается уравнением $r_T = r_\infty e^{\frac{B}{T}}$, где r_∞ и B — постоянные коэффициенты. Используя эту зависимость, составим два уравнения для известных T_1 , T_2 , r_{293} и r_{323} :

$$r_{293} = r_\infty e^{\frac{B}{T_1}} \text{ и } r_{323} = r_\infty e^{\frac{B}{T_2}}.$$

Определяем значения B из решения этих уравнений:

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{r_{293}}{r_{323}} = \frac{293 \cdot 323}{30} \ln \frac{30}{7,5} = 4400 \text{ К.}$$

Подставляя значения B в одно из исходных уравнений, найдем, что

$$r_\infty = r_{293} e^{-\frac{B}{293}} = 30 e^{-\frac{4400}{293}} = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Задавая значение T , вычисляем r_T по приведенной выше формуле, строим температурную характеристику КМТ-4 (рис. 7), которая хорошо совпадает с экспериментальной.

Пользуясь аналитической зависимостью для коэффициента чувствительности терморезистора (Ом/К)

$$k_d = \frac{dr_T}{dT} = -\frac{B}{T^2} r_T = -\frac{4400}{T^2} \cdot 9,2 \cdot 10^{-3} e^{\frac{4400}{T}},$$

строим на том же рисунке график $k_d = f(T)$.

Пример 8. Рассчитать мостовую схему воспринимающего органа температуры и определить температурную зависимость напряжения и тока в нагрузке (рис. 8, а) при напряжении питания моста $U = 12 \text{ В}$ и отклонении температуры от 20°С для двух случаев: 1) датчиком является медный термометр сопротивления; 2) датчиком служит полупроводниковый терморезистор КМТ-4.

Зависимость сопротивления меди от температуры в пределах $\Theta = 0 \div 100^\circ \text{С}$ выражается уравнением

$$r_\theta = r_{\theta_0} [1 + \alpha (\theta - \theta_0)],$$

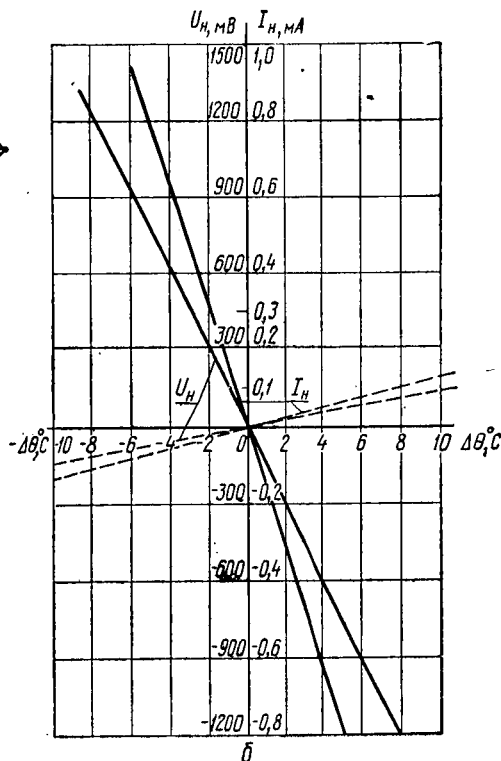
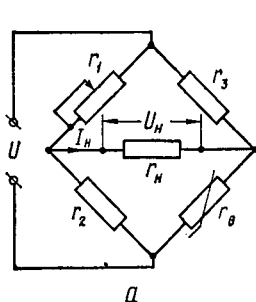


Рис. 8. Мостовая схема воспринимающего органа температуры (а) и зависимость напряжения U_H и тока I_H нагрузки (б):

сплошные линии для полупроводникового термодатчика, пунктирные — для медного термометра сопротивления.

где $\alpha = 42,8 \cdot 10^{-41}/^\circ\text{C}$ — температурный коэффициент сопротивления меди; r_{θ_0} — сопротивление датчика при θ_0 .

Решение. Принимаем соотношение сопротивлений плеч моста из условия получения наибольшей мощности на его выходе:

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_H.$$

Силу тока через датчик выбираем в пределах $I = 10 \div 15$ мА. Следовательно, r_{θ} при равновесии моста и $\theta = 20^\circ\text{C}$

$$r_{\theta} = \frac{U}{2I} = \frac{12}{2 \cdot 12 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ Ом}.$$

Определяем зависимость напряжения нагрузки моста с медным термометром сопротивления при отклонении тем-

пературы от начальной $\Delta\Theta = \Theta - \Theta_0 = \pm 10^\circ \text{C}$:

$$U_H = \frac{U}{r_1 + r_2} r_1 - \frac{U}{r_3 + r_0} r_3 =$$

$$= 12 \left[\frac{500}{500 + 500} - \frac{500}{500 + 500 (1 + 4,28 \cdot 10^{-4} \Delta\Theta)} \right] =$$

$$= 6 \left(1 - \frac{1}{1 + 0,00214 \Delta\Theta} \right) \text{ В}$$

и зависимость тока в нагрузке:

$$I_H = \frac{U_H}{r_H + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} + \frac{r_3 \cdot r_0}{r_3 + r_0}} = \frac{U_H}{500 + 250 + \frac{500 (1 + 4,28 \cdot 10^{-4} \Delta\Theta)}{2 + 4,28 \cdot 10^{-4} \Delta\Theta}} =$$

$$= \frac{U_H (2 + 4,28 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta\Theta)}{2000 + 5,35 \cdot \Delta\Theta} \text{ А.}$$

Определяем эти же зависимости при замене термометра сопротивления полупроводниковым терморезистором того же номинального сопротивления. Уравнение температурной зависимости терморезистора установлено в предыдущем примере, а коэффициент

$$r_\infty = 9,2 \cdot 10^{-3} \frac{500}{30\,000} = 1,53 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

$$U_H = 12 \left(\frac{1}{2} - \frac{500}{500 + 1,53 \cdot 10^{-4} e^{\frac{4400}{293 + \Delta\Theta}}} \right) =$$

$$= 6 - \frac{12}{1 + 0,3 \cdot 10^{-6} e^{\frac{4400}{293 + \Delta\Theta}}} \text{ В.}$$

$$I_H = \frac{U_H}{750 + \frac{500 \cdot 1,53 \cdot 10^{-4} e^{\frac{4400}{293 + \Delta\Theta}}}{4400}} =$$

$$= \frac{\left(1 + 0,3 \cdot 10^{-6} e^{\frac{4400}{293 + \Delta\Theta}} \right) U_H}{750 + 3,83 \cdot 10^{-4} e^{\frac{4400}{293 + \Delta\Theta}}} \text{ А.}$$

Рассчитанные по этим формулам температурные зависимости, которые графически показаны на рисунке 8, б, позволяют сделать вывод о том, что воспринимающий орган с полупроводниковым термодатчиком по напряжению и току имеет чувствительность в $10 \div 12$ раз большую, чем воспринимающий орган с медным термометром сопротивления.

Пример 9. Выбрать значение напряжения U_c постоянного тока на фотореле, чтобы оно срабатывало при освещенности $E=200$ лк. Фотореле объединяет фоторезистор ФС-К1 и реле типа РПН (рис. 9). Из паспортных данных известно: сопротивление обмотки РПН $r_p=4$ кОм; ток срабатывания $I_{cp}=3$ мА; чувствительность фоторезистора $k_0=6$ мА/лм·В; площадь окна $S=28,8$ мм²; максимальная мощность рассеяния $P_{max}=0,2$ Вт.

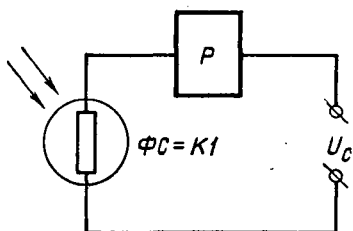


Рис. 9. Электрическая схема фотореле.

Решение. Напряжения на реле РПН при его срабатывании

$$U_p = I_{cp} r_p = 3 \cdot 4 = 12 \text{ В.}$$

Определяем напряжение на фоторезисторе из уравнения

$$I = k_0 U_\phi S E^\alpha$$

при $\alpha=0,81$:

$$U_\phi = \frac{3}{6 \cdot 28,8 \cdot 10^{-6} \cdot 200^{0,81}} = 24 \text{ В.}$$

Искомое значение постоянного напряжения

$$U_c = 24 + 12 = 36 \text{ В.}$$

Расчетная мощность рассеяния

$$P_{расч} = U I_{cp} = 24 \cdot 0,003 = 0,072 \text{ Вт.}$$

Следовательно, условие $P_{расч} < P_{max}$ выполнено.

Различные значения освещенности срабатывания фотореле устанавливают при помощи переменного сопротивления, включенного последовательно с фоторезистором, или изменяя напряжение питания.

Пример 10. Определить зависимость напряжения на выходе измерительного органа относительной влажности воздуха от изменения влажности в пределах $\Delta\phi = \pm 20\%$, если мост уравновешен при влажности воздуха $\phi = 40\%$ и температуре $\Theta_{окр} = 20^\circ \text{С}$ (рис. 10).

Мост измерительного органа содержит термокомпенсационный резистор R_k и резистор датчика R_d типа КМТ-4 с номинальным сопротивлением 30 кОм. Сопротивление резистора $r = 3,3$ кОм.

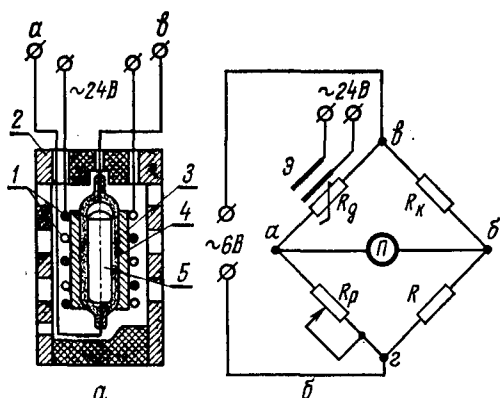


Рис. 10. Температурно-равновесный полупроводниковый датчик влажности воздуха:

a — конструкция датчика: 1 — подогревные электроды; 2 — каркас; 3 — стеклоцулок, пропитанный хлористым литием; 4 — фторопленка; 5 — полупроводниковый терморезистор; *б* — электрическая схема измерительного органа относительной влажности воздуха; R — резистор постоянного сопротивления; R_p — регулировочный резистор; R_k — термокомпенсационный резистор; R_d — терморезистор датчика влажности; Э — подогревные электроды.

Решение. Определяем величину сопротивления регулировочного резистора R_p из условия равновесия моста

$$R_p = \frac{R \cdot R_d}{R_k}.$$

Уравнение температурной характеристики терморезисторов R_d и R_k типа КМТ-4 сопротивлением 30 кОм определено в примере 7. Используя уравнение, связывающее температуру разогрева Θ_p хлористо-литиевого датчика с относительной влажностью φ и температурой окружающей среды Θ [3]: $\Theta_p = 23,3 \ln 5 \varphi + 1,35 \Theta_0$ °C, найдем при $\Theta_{окр} = 20^\circ \text{C}$, что

$$R_p = 3,3 \frac{9,2 \cdot 10^{-8} \frac{4400}{273 + 23,3 \ln 5 \cdot 0,4 + 1,35 \cdot 20}}{9,2 \cdot 10^{-8} \frac{4400}{273 + 20}} = 1,1 \text{ кОм}.$$

Определяем зависимость выходного напряжения моста от его параметров при холостом ходе ($r_{\pi} = \infty$) по уравнению:

$$U_{\text{вых}} = U \left(\frac{R_k}{R + R_k} + \frac{R_d}{R_d + R_p} \right) =$$

$$= 6 \cdot \left(0,9 - \frac{9,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4400}{e^{300 + 23,3 \ln 5\phi}}}{1,1 + 9,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4400}{e^{300 + 23,3 \ln 5\phi}}} \right) \text{ В,}$$

где $U = 6$ В — напряжение питания моста.

Задавая значениями $\phi = 0,2; 0,25 \dots 0,55$ и $0,6$ и подставляя их в последнее выражение, найдем соответствующие значения выходного напряжения

$\phi, \%$	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$	-280	-220	-140	-60	0	58	114	180	250

Средняя чувствительность измерительного органа относительной влажности

$$k_d = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta \phi} = \frac{530}{40} = 13,3 \text{ мВ/\%,}$$

то есть достаточно высока.

§ 3. ПРИМЕРЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ

При проектировании систем автоматики стремятся создать надежно работающую схему с минимальным количеством аппаратуры. Однако очень часто это делают интуитивно, и при решении одного и того же схемного вопроса проектировщики предлагают различные варианты.

Использование аналитической теории релейных устройств позволяет получить схему с минимальным количеством аппаратуры уже на первом этапе разработки и проектирования системы автоматики.

В основу аналитической формы записи релейных схем положены следующие обозначения:

$A, B, \dots, X, Y, \dots$ — воспринимающие, промежуточные и исполнительные элементы (обычно их рабочие обмотки);

$\overline{a}, \overline{b}, \dots, \overline{x}, \overline{y}, \dots$ — замыкающие контакты;

$a, b, \dots, x, y, \dots$ — размыкающие контакты;

$a+b$ — параллельное соединение контактов;

$a \cdot b$ — последовательное соединение контактов;

1 — постоянно замкнутая цепь;

0 — постоянно разомкнутая цепь;

f — структурная формула контактов;

F — структурная формула всей схемы.

При анализе и упрощении структурных формул одноконтных релейных устройств пользуются следствиями законов алгебры логики, основные из которых таковы:

$$\begin{array}{ll}
a \cdot 1 = a, & a + 1 = 1, \\
\cancel{a \cdot 0 = 0}, & a + 0 = a, \\
a \cdot a \cdot a = a, & a + a + a = a, \\
a + ab = a(1 + b) = a, & a \cdot (a + b) = a, \\
a + \bar{a}b = a + b, & \bar{a} + a\bar{b} = \bar{a} + \bar{b}.
\end{array}$$

Процесс анализа автоматических устройств с целью упрощения схем и их синтеза аналитическим способом поясним несколькими примерами.

Пример 11. Упростить схему включения реле P , приведенную на рисунке 11, а.

Решение. Записав структурную формулу этой схемы

$$F = (a + b + \bar{c})(\bar{a}\bar{b} + \bar{a}c) P$$

и перемножив выражения в скобках, получим:

$$F = (a\bar{a}\bar{b} + a\bar{a}c + a\bar{b}\bar{b} + \bar{a}b\bar{c} + \bar{a}b\bar{c} + \bar{a}c\bar{c}) P.$$

Члены $a\bar{a}\bar{b} = 0$; $a\bar{b}\bar{b} = 0$; $\bar{a}c\bar{c} = 0$; $a\bar{a}\bar{b} = \bar{a}\bar{b}$ и, следовательно,

$$F = [\bar{a}\bar{b}(1 + \bar{c}) + \bar{a}bc] P.$$

Так как выражение $(1 + \bar{c}) = 1$, то окончательный вид формулы будет

$$F = (\bar{a}\bar{b} + \bar{a}bc) P.$$

В соответствии с этой формулой построена схема на рисунке 11, б.

Пример 12. Дана структурная формула контактной схемы:

$$\begin{aligned}
F = & \{x[(y + b)x + y(z + \bar{x}y)] + \\
& + \bar{x}[(y + c)x + (a + \bar{a}\bar{x})y]\} P.
\end{aligned}$$

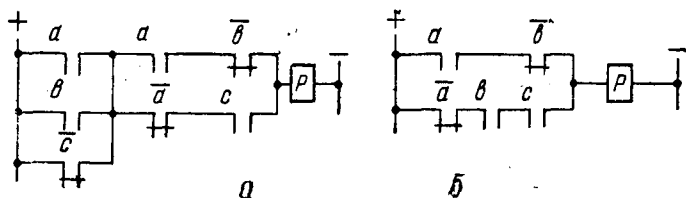


Рис. 11. Исходная (а) и упрощенная (б) схемы к примеру 11.

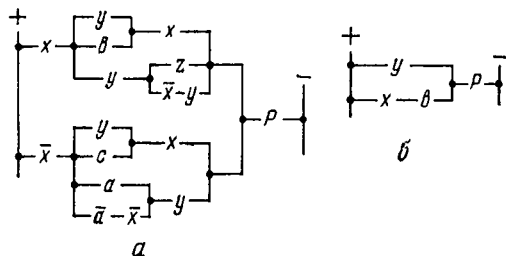


Рис. 12. Исходная (а) и упрощенная (б) схемы к примеру 12.

Требуется начертить соответствующую ей релейную схему включения реле P и, преобразовав ее, найти эквивалентную упрощенную.

Решение. Схема, соответствующая исходной структурной формуле, показана на рисунке 12,а. Как принято в теории, вместо контактов здесь поставлены их условные обозначения.

Раскроем скобки в формуле для контактов

$$f = xy + xb + xyz + \bar{x}\bar{y}u + \bar{x}xy + \bar{x}xc + \bar{x}au + \bar{a}\bar{x}u.$$

Отсюда

$$f = xy(1 + z) + \bar{x}y(a + \bar{a}) + xb = y + xb.$$

Упрощенная схема, соответствующая окончательному виду формулы, показана на рисунке 12,б. Она по своему действию эквивалентна исходной, но число ее контактов в пять раз меньше, чем исходной, и, следовательно, схема дешевле, проще и надежнее.

Пример 13. Составить схему управления исполнительным элементом X так, чтобы он срабатывал при замыкании любого одного или двух из трех контактов релейных датчиков A , B и C .

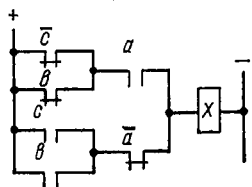


Рис. 13. Схема к примеру 13.

Решение. Условия срабатывания исполнительного элемента при замыкании контактов одного датчика и замыкании контактов двух других датчиков дают структурную формулу контактов

$$f_1 = \bar{a}\bar{b}c + \bar{a}b\bar{c} + \bar{a}bc.$$

По этой формуле исполнительный элемент X , включенный последовательно со схемой f_1 , будет срабатывать только при замыкании контакта или a , или b , или c .

Аналогичным образом записывается структурная формула контактов для включения X любыми двумя контактами:

$$f_2 = abc + \bar{a}bc + \bar{a}b\bar{c}.$$

Объединяя оба условия, получаем структурную формулу всей исходной схемы:

$$F = (\bar{a}\bar{b}c + \bar{a}b\bar{c} + \bar{a}bc + abc + \bar{a}bc + \bar{a}b\bar{c})X.$$

Упрощая исходную формулу F , получим схему с шестью контактами (рис. 13):

$$F = [a(\bar{c} + \bar{b}) + \bar{a}(c + b)]X.$$

Пример 14. Составить электрическую схему звуковой и световой сигнализации предельного положения дроссельной заслонки, регулирующей подачу теплоносителя в зерносушилку. В схеме должны быть использованы два концевых выключателя A и B с переключающими контактами, сирена C и две сигнальные лампы: красного цвета K для сигнализации о максимальном открытии и зеленого цвета $З$, сигнализирующей о минимальном открытии заслонки.

Решение. Обозначим a , b , $\bar{a}$ и $\bar{b}$ — соответственно замыкающие и размыкающие контакты концевых выключателей A и B .

Запишем условия выключения красной лампы и сирены выключателем A :

$$F_1 = \bar{a}bK + aC$$

и условия включения зеленой лампы и сирены выключателем B :

$$F_2 = \bar{a}bЗ + bC.$$

Объединяя эти условия, получим структурную формулу всей схемы:

$$F = F_1 + F_2 = \bar{a}bK + \bar{a}bЗ + (a + b)C.$$

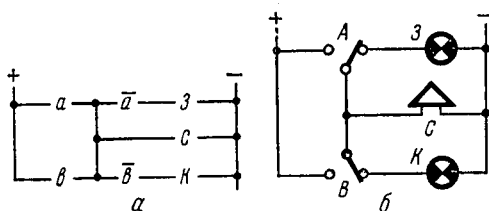


Рис. 14. Схемы к примеру 14.

Схема, соответствующая этой формуле, вполне работоспособна, но требует у переключателей *A* и *B* наличия трех контактов. Схему можно упростить, прибавив к последнему выражению два нулевых члена аналогично существующим приемам обычной алгебры: $b\bar{b}K = 0$ и $a\bar{a}Z = 0$. Тогда

$$F = (a + b)\bar{b}K + (a + b)\bar{a}Z + (a + b)C$$

или

$$F = (a + b)(\bar{b}K + \bar{a}Z + C).$$

Схемы, соответствующие полученной структурной формуле, показаны на рисунке 14.

При полностью открытой заслонке концевой выключатель *A* включает красную лампу *K* и сирену *C*, а при закрытой заслонке выключатель *B* включает зеленую лампу *З* и ту же сирену *C*.

Пример 15. Составить схему, состоящую из пяти реле P_1, P_2, P_3, P_4 и P_5 , так, чтобы при срабатывании приемного элемента *A* реле поочередно включались, а затем в том же порядке отключались. Этот цикл работы реле должен непрерывно повторяться, пока включен приемный элемент *A*.

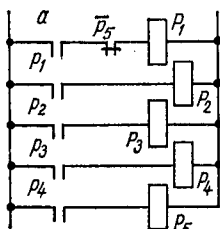
Данный тип схем относится к многотактным, в которых в отличие от выше рассмотренных одноктактных схем предусматривается определенная последовательность действия во время отдельных элементов.

Для упрощения процесса составления пользуются таблицей включений, где последовательно записывают изменения состояний всех элементов схемы, причем включенное состояние элементов обозначают знаком (+), а отключенное — знаком (—). Для анализа многотактных схем применяют диаграммы времени.

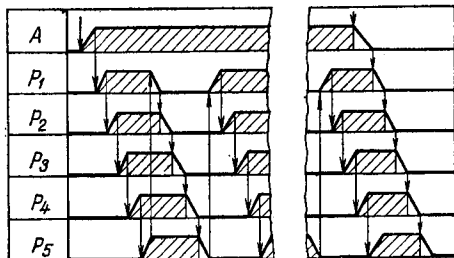
Составление таблицы включений. Все поочередно срабатывающие элементы записывают в первый

Элементы	Такты работы														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	-	+													
P_1	-		+					-					+		
P_2	-			+					-					+	
P_3	-				+					-					+
P_4	-					+					-				
P_5	-						+					-			

a



б



в

Рис. 15. Таблица включения (*a*), электрическая схема (*б*) и временная диаграмма (*в*) к примеру 15.

столбец таблицы, а в отдельных столбцах отмечают их состояния в соответствующие такты (рис. 15, *a*). В нулевом такте все элементы отключены, что показано знаком минус. В первом такте срабатывает приемный элемент A , который вызывает во втором такте включение реле P_1 . Реле P_1 в третьем такте осуществляет включение реле P_2 и т. д. Затем с седьмого такта все реле в том же порядке поочередно отключаются, а с двенадцатого такта цикл работы всех реле повторяется.

Иногда применяют другой способ составления таблицы включений, при котором символы элементов вписывают только в столбец нулевого такта, а все периоды включения элементов отмечают толстой линией. Так, например, для реле P_1 первый период включения будет отмечен толстой линией от второго такта до шестого включительно, а второй период — начиная с двенадцатого такта.

Синтез схемы. Составим структурную формулу схемы сначала для реле P_2, P_3, P_4 и P_5 , формулы которых наиболее просты, а затем и для реле P_1 .

Элемент P_2 включается контактами реле P_1 , следовательно,

$$F_2 = p_1 P_2.$$

Аналогично получаем

$$F_3 = p_2 P_3; F_4 = p_3 P_4 \text{ и } F_5 = p_4 P_5.$$

Реле P_1 , как видно из таблицы включений, срабатывает при замыкании контактов элемента A и размыкании контактов реле P_5 , следовательно,

$$F_1 = a \bar{p}_5 P_1.$$

Структурная формула всей схемы:

$$F = a \bar{p}_5 P_1 + p_1 P_2 + p_2 P_3 + p_3 P_4 + p_4 P_5.$$

Схема, соответствующая полученной формуле, изображена на рисунке 15, б, а временная диаграмма работы схемы — на рисунке 15, в.

§ 4. ПРИМЕРЫ ПЕРЕВОДА РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ НА БЕСКОНТАКТНЫЕ СХЕМЫ С ЛОГИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Замена релейно-контактной аппаратуры бесконтактными устройствами позволяет повысить надежность работы и быстродействие элементов автоматики, существенно снизить эксплуатационные расходы и увеличить срок службы.

При помощи бесконтактных элементов реализуются различные логические функции в схемах автоматического управления: ИЛИ, И, НЕ, ИЛИ—НЕ, И—НЕ, ИМПЛИКАЦИЯ, ЗАПРЕТ, ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ, ПАМЯТЬ, ЗАДЕРЖКА, УСИЛЕНИЕ и др.

Методика перевода контактной схемы в бесконтактную сводится к следующим операциям.

1. В релейно-контактной схеме выделяют входные элементы с условным обозначением контактов датчиков, реле или просто сигналов: например, малыми буквами a, b, c, d ; а исполнительные (выходные) и промежуточные элементы $X, Y, \dots, P$ с их контактами $x, y, \dots, p$. Входные, промежуточные и выходные сигналы на бесконтактной схеме обозначаются так же, как контакты схемы релейного варианта. К входным сигналам относят сигналы соответствующих датчиков, кнопок управления, концевых и промежуточных выключателей.

2. Сокращают число входных сигналов путем возможного объединения сигнала в бесконтактной схеме; например, последовательные или параллельные сигналы от блок-контактов могут быть заменены соответственно логическими функциями И или ИЛИ.

3. Выявляют и сгруппировывают в одном месте все сигналы, появляющиеся при срабатывании промежуточных элементов схемы. Промежуточные сигналы подразделяют на группу сигналов без обратных связей и группу с обратными связями. Здесь под обратной связью понимается наличие контактов от элементов, управляемых промежуточными сигналами, или блок-контактов выходных элементов.

4. Выявляют и сгруппировывают также все выходные сигналы, действующие на исполнительные и регулирующие органы.

5. Пользуясь основными положениями алгебры логики, записывают структурные уравнения для контактов и для всей релейной схемы. Составлять алгебраические выражения рекомендуется в такой последовательности: сначала для входных, затем для промежуточных без обратных и с обратными связями, а потом для выходных сигналов. После этого, преобразуя уравнения, приводят их к упрощенной структурной формуле схемы. По полученным структурным формулам вычерчивают принципиальную бесконтактную схему на логических элементах в условных обозначениях.

6. Выбирают типы логических элементов и корректируют структурно-принципиальную схему с целью минимизации количества типовых элементов. Логические элементы группируют по функциональным узлам для облегчения их монтажа и подвода питания.

7. На структурно-принципиальных бесконтактных схемах показывают только логические связи элементов, а цепи питания логических элементов и другие второстепенные элементы опускают.

Пример 16. Преобразовать релейно-контактную схему (рис. 11, б) в бесконтактную на полупроводниковых логических элементах.

Решение. Структурная формула схемы включения реле P

$$F_P = (a\bar{b} + \bar{a}bc) P.$$

Этой формуле соответствует бесконтактная схема на логических элементах $И_1$, $И_2$, $НЕ_1$, $НЕ_2$, **ИЛИ** и **УСИЛЕНИЕ** ($У$) (рис. 16). Элементы $И_1$ и $НЕ_1$ выполняют операцию логического умножения $a\bar{b}$; элементы $И_2$ и $НЕ_2$ — операцию $\bar{a}bc$, а элемент **ИЛИ** выполняет логическое сложение членов $a\bar{b} + \bar{a}bc$. Усилитель $У$ усиливает сигнал с элемента **ИЛИ** до величины, достаточной для управления реле P .

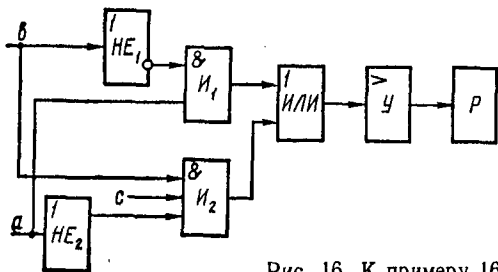


Рис. 16. К примеру 16.

Пример 17. Требуется заменить релейно-контактную аппаратуру в схеме автоматизации водоперекачивающей станции (рис. 17, а) логическими элементами.

Релейно-контактная схема управляет двумя электронасосами водоперекачивающей станции (на рисунке насосы не показаны), которые включаются линейными контакторами 1Л и 2Л соответственно через промежуточные реле P_1 и P_2 . Реле включаются от датчиков нижнего уровня воды НУ, среднего уровня СУ и верхнего уровня ВУ.

Когда уровень воды находится между нижним и средним контролируемыми уровнями, контактором 1Л включен один рабочий насос. Если рабочий насос не успевает перекачивать поступающую воду, то вода поднимается и достигает верхнего контрольного уровня. В этом случае замыкаются контакты ВУ и контактор 2Л включает второй насос. Лампы L_1 и L_2 сигнализируют о работе насосов. При снижении уровня воды насосы отключаются датчиками уровня СУ и НУ.

Решение. Заменяв двухбуквенное обозначение элементов на однобуквенное (рис. 17, б), запишем структурную формулу для схемы управления насосами:

$$F_1 = n(c + p_1) P_1 + p_1 (1Л + Л_1) \text{ и} \\ F_2 = c(b + p_2) P_2 + p_2 (2Л + Л_2).$$

В соответствии с этими формулами на рисунке 17, в изображена бесконтактная схема управления. Элемент 1 ИЛИ реализует функцию $c + p_1$, а совместно с 1И — функцию $n(c + p_1)$. На выходе этих элементов появляется сигнал p_1 , который через усилитель $У_1$ включает контактор 1Л первого насоса и сигнальную лампу L_1 и одновременно бло-

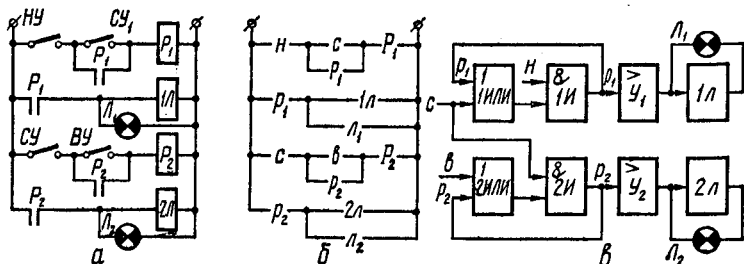


Рис. 17. Контактная (а и б) и бесконтактная (в) схемы управления водоперекачивающей станции.

кирует работу датчика $СУ_1$, образуя логическую операцию **ПАМЯТЬ**. Второй насос включается аналогично первому от датчика среднего уровня с при наличии выхода с элемента 2 **ИЛИ** и блокируется сигналом p_2 .

Пример 18. Перевести релейно-контактную схему (рис. 18, а) управления транспортерами кормораздатчика (двигатели 1Д и 2Д) и транспортерами для уборки навоза (двигатели 3Д и 4Д) на логические элементы.

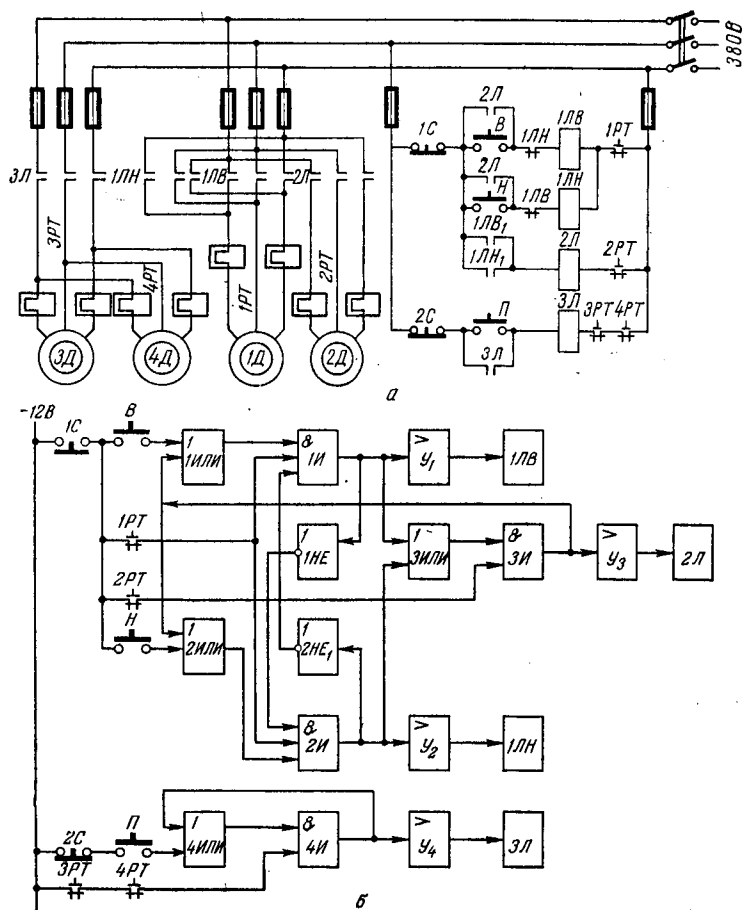


Рис. 18. Контактная схема (а) и схема на логических элементах (б) управления транспортерами для уборки навоза и раздачи корма.

Наклонный транспортер, приводимый электродвигателем 2Д, передает корма из камеры хранения на горизонтальный транспортер, который снабжен реверсивным электроприводом 1Д. Горизонтальный транспортер при нажатии кнопки В, двигаясь в одном направлении, раздает сухие корма, а при нажатии кнопки Н, двигаясь в противоположном направлении, раздает сочные корма. Наклонный транспортер включается блок-контактами пускателей 1ЛВ или 1ЛН после включения электропривода 1Д. Электроприводы 3Д и 4Д транспортеров для уборки навоза управляются кнопками Пуск (П) и Стоп (2С).

Решение. По аналогии с предыдущим примером составляем бесконтактную схему (рис. 18, б) на логических элементах серии «Логика Т». Напряжение питания — 12 В подается на логические элементы через кнопки управления. Например, при нажатии кнопки В на выходе элемента 1ИЛИ появляется сигнал, который поступает на вход 1И. На выходе элемента 1И сигнал появится только в том случае, когда будет замкнут контакт теплового реле 1РТ и поступит инверсный сигнал с выхода элемента 2И, что соответствует условию замыкания контактов 1ЛН в схеме, изображенной на рисунке 18, а. Подобным же образом работают элементы 2ИЛИ и 2И.

Контактор 2Л включается только при наличии выходного сигнала, поступающего с элементов 1И или 2И при замкнутых контактах реле 2РТ. Бесконтактное блокирование кнопок В и Н осуществляется с выхода элемента 3И.

Схема управления электроприводом транспортера для уборки навоза выполняется на элементах 4ИЛИ, 4И и У₄ аналогично схемам управления насосами, рассмотренным в примере 17. Как видно из рисунка 18, б, блок-контакты контакторов 1ЛВ, 1ЛН, 2Л и 3Л не требуются.

Пример 19. Составить на бесконтактных логических элементах структурно-принципиальную схему управления головкой станка, релейно-контактный вариант которой приведен на рисунке 19, а.

Решение. Введем следующие обозначения: для входных сигналов: а — реле автоматической работы РА; в — реле цикла РЦ; с — путевой переключатель подачи КП; d — путевой переключатель исходного положения КИ; е — путевой переключатель обратного хода КХ; для промежуточного сигнала р — реле обратного хода ОХ; для выходных сигналов: z, УП — блок-контакты и обмотка контактора ускоренного подвода; у, УО — блок-кон-

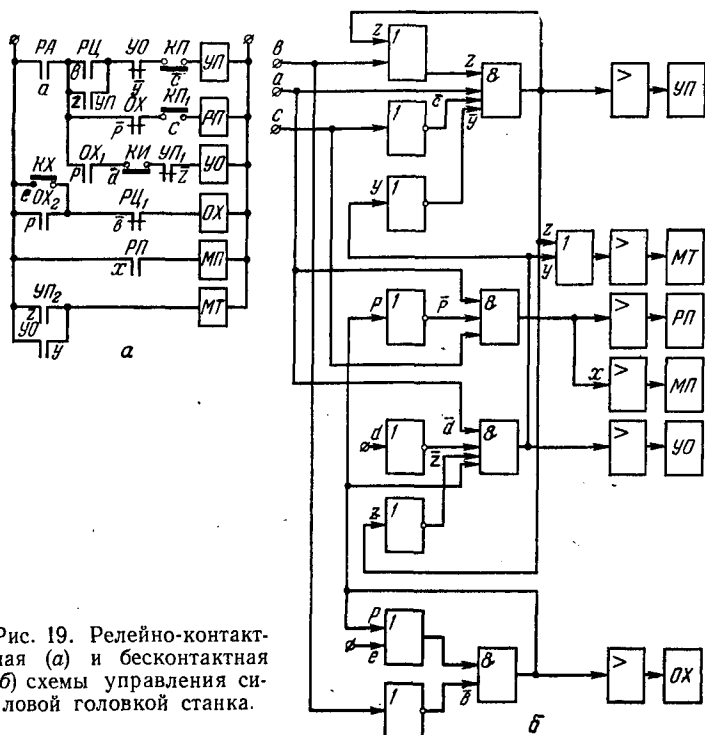


Рис. 19. Релейно-контактная (а) и бесконтактная (б) схемы управления силовой головкой станка.

такты и обмотка контактора ускоренного отвода; x , $РП$ — блок-контакты и обмотка контактора рабочей подачи; $МП$ — муфта рабочей подачи и $МТ$ — тормозная муфта.

Запишем структурные формулы контактов для включения выходных элементов

$$\begin{aligned} f(YP) &= a(b+z)\bar{c}\bar{y}; & f(RP) &= a\bar{p}c; \\ f(YO) &= ap\bar{d}\bar{z}; & f(OX) &= (e+p)\bar{b}; \\ f(MP) &= x; & f(MT) &= z+y. \end{aligned}$$

По этим уравнениям составлена структурная схема на логических элементах **ИЛИ**, **НЕ**, **И** (рис. 19, б), принцип работы которой можно уяснить из рисунка. Например, контактор ускоренного подвода YP включается при помощи логического элемента **ИЛИ**, реализующего функцию $b+z$, двух элементов **НЕ**, инвертирующих сигналы c и y на $\bar{c}$ и $\bar{y}$, одного элемента **И**, выполняющего логическое умножение $a(b+z)\bar{c}\bar{y}$, и усилителя.

Глава II

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ



§ 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ СХЕМ АВТОМАТИКИ

Схема является главным документом, поясняющим принцип действия и взаимодействия различных элементов, устройств или в целом систем автоматики. В зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав автоматической установки, схемы разделяют на электрические, гидравлические, пневматические и кинематические, которые, согласно ГОСТ 2.701—68, обозначаются соответствующими буквами, Э, Г, П и К.

В соответствии с назначением схемы подразделяют на следующие типы: принципиальные, соединения (монтажные), подключения, функциональные и структурные. Наименование схемы определяется ее видом и типом, например, схема электрическая принципиальная или схема гидравлическая подключения.

Схемы вычерчивают без соблюдения масштаба и часто без учета действительного пространственного расположения составных элементов установки. Они должны быть выполнены четко и компактно, но без ущерба для ясности и удобства чтения. При этом необходимо стремиться к минимальному числу пересечений и изломов линий. Для сложных установок схема может быть изображена на нескольких листах. Линии, которые показывают связь элементов, расположенных на отдельных листах, обрывают за пределами изображения схемы. Около места обрыва наносят условные обозначения одними и теми же буквами или цифрами, по которым легко определяются связи и продолжения линий на других листах.

Принципиальные электрические схемы иллюстрируют порядок соединения между собой отдельных элементов установки. На них изображают все элементы и все связи между ними, которые показывают входные и выходные цепи. Схемы вычерчивают для положения установок в отключенном состоянии. Другими словами, изображение элементов должно соответствовать обесточенному состоянию всех цепей схемы и отсутствию внешних механических воздействий на аппаратуру.

Для удобства чтения схема должна быть логически последовательной и читаться слева направо или сверху вниз. Элементы автоматики на электрических схемах следует обозначать в соответствии с ГОСТ 2.721—68 — 2.751—68.

Условные графические обозначения элементов вычерчивают в горизонтальном или вертикальном положении, а в отдельных случаях допускается обозначение поворачивать на угол, кратный 45° .

При больших форматах для облегчения нахождения элементов сложные схемы разбивают на отдельные зоны, которые указывают в перечне элементов. Если на одной схеме изображают различные по функциональному назначению цепи, то их вычерчивают линиями разной толщины (от 0,2 до 1 мм).

Каждому элементу схемы присваивают буквенное или цифровое позиционное обозначение. Буквенное обозначение обычно представляет собой сокращенное наименование элементов, например: РВ — реле времени, Тр — трансформатор, МП — магнитный пускатель. Цифровые номера следуют в порядке их возрастания, начиная с единицы, например, РВ1, РВ2 и т. д., R1, R2 и т. д. Последовательность номеров соответствует последовательному расположению на схеме основных элементов, считая слева направо или сверху вниз. При необходимости отдельно изображенные части элементов соединяют линией, указывающей на принадлежность их к одному конструктивному элементу. К сложной схеме, как правило, дается перечень элементов, в котором приведены основные данные об элементах.

Номиналы резисторов от 0 до 999 Ом на схемах пишутся без указания единицы измерения, от 1 до 999 кОм — с обозначением единицы измерения буквой «к», а свыше 1 Мом — буквой «М». Для конденсаторов емкость в пикофарадах записывают числом без указания единицы измерения, а в микрофарадах емкость записывают в виде дробных величин или целым числом, проставляя после него через запятую знак нуля, например 0,02; 0,2; 20,0.

Если параметры резисторов, конденсаторов и других элементов выбираются при наладке изделия, то в позиционных обозначениях таких элементов на схеме проставляют звездочки, например R2*, C4*.

Различают совмещенные и разнесенные (развернутые) принципиальные схемы.

На совмещенной схеме составные части элементов изображают совместно в непосредственной связи друг с другом и каждый элемент обозначают своим условным символом. Связь между отдельными элементами показывают линиями, идущими от одного элемента к другому. Преимущество совмещенных схем заключается в их наглядности и простоте чтения при небольшом количестве межэлементных связей.

На разнесенной схеме условные обозначения составных частей элементов изображают в разных местах схемы. Обычно последовательность соединения отдельных элементов аппаратуры показывают по цепи протекания тока от плюса к минусу или от одной фазы к другой. Элементы, входящие в одну цепь, изображают последовательно друг за другом по прямой, а отдельные цепи — одну под другой в виде параллельных горизонтальных или вертикальных строк (строчным способом). Схемы этого типа выполняют отдельно по цепям постоянного напряжения, переменного напряжения или переменного тока. Для облегчения нахождения элементов параллельные строки нумеруют последовательно возрастающими порядковыми цифрами. В ряде случаев в схемах постоянного тока начало цепей положительной полярности нумеруют нечетными цифрами, а отрицательной полярности — четными. На свободном поле рядом со схемой часто помещают разъяснение условного шифра элемента или его функционального назначения и основные технические данные.

Разнесенные схемы отличают простота изображения и наглядность взаимодействия элементов, возможность быстрого обнаружения обрывов и обходных ложных цепей.

Схема соединений изображает либо внешние соединения между отдельными узлами устройства, либо соединения между элементами внутри устройства. Схему, показывающую внешние подключения установки, называют схемой подключения. Такие схемы служат рабочими чертежами, по которым делают монтаж аппаратуры, поэтому их еще называют монтажными.

Для правильного соединения проводов при монтаже и для облегчения эксплуатации на схеме соединений изображают все элементы с их входными и выходными зажимами или разъемами, к которым присоединяются провода, а также показывают связи между элементами. Для упрощения схемы провода, идущие в одном направлении, объединяют в одну общую линию, а при подходе к зажимам каждый провод показывают отдельно. Элементы вычерчивают в различной форме: в виде прямоугольника или в условном графическом обозначении, а иногда в форме внешних очертаний прибора. Внутри или около изображения элемента указывают его наименование или тип, а на входных и выходных клеммах — определенную маркировку. Маркировка состоит из букв и цифр и в условном виде обозначает функциональное назначение и характеризует положение проводов и аппаратов в схеме. Она показывает, откуда приходит провод и куда подключается. Поэтому маркируют оба конца провода и переносят это обозначение на схему. Номера кабелей проставляют на схеме в окружностях вблизи от мест разветвления жил. На электрической схеме иногда указывают марки, сечения и расцветку проводов, если они не обозначены в других конструкторских документах к данной установке.

При автоматизации мобильных сельскохозяйственных машин и стационарных механизмов наряду с электрическими часто приходится иметь дело с кинематическими, гидравлическими и пневматическими схемами, на которых изображают соответственно кинематические элементы (шестерни, звездочки, шкивы, кулачки) и их механические и немеханические соединения (валы, стержни, шатуны, оси и т. п.), гидравлические и пневматические приводы, системы охлаждения и смазки, топливные системы, системы газо- и водоснабжения и др.

§ 2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИКИ

Функциональные и структурные схемы, в построении (но не в назначении) которых много общего, широко используются при изучении теории систем автоматики.

Функциональные схемы (функциональные структуры) автоматики отражают взаимодействие устройств, блоков, узлов и отдельных элементов в процессе их работы в совокупности с системой управления. Графически отдельные узлы или элементы автоматики изображают прямоугольниками, а существующие между ними связи — стрелками, соответствующими направлению прохождения сигнала.

Рассмотрим функциональные схемы автоматических систем управления с регуляторами *прямого* и *непрямого* действия. Принципиальное их различие в том, что работа исполнительного органа у регулятора прямого действия осуществляется за счет энергии воспринимающего органа (датчика), а у регулятора непрямого действия — за счет энергии вспомогательного источника.

Функциональная схема системы с регулятором прямого действия (рис. 20, а) состоит из управляемого объекта $УО$, воспринимающего органа $ВО$, сравнивающего органа $СО$ и исполнительного органа $ИО$. Последние три органа совместно образуют устройство, которое представляет собой регулятор P прямого действия (обведен пунктиром). Сравнивающий орган принято обозначать не прямоугольником, а кружком с секторами. На управляемый объект, находящийся под влиянием возмущающего воздействия $N(t)$, поступает от регулятора управляющее воздействие x_p , противоположное по знаку отклонению управляе-

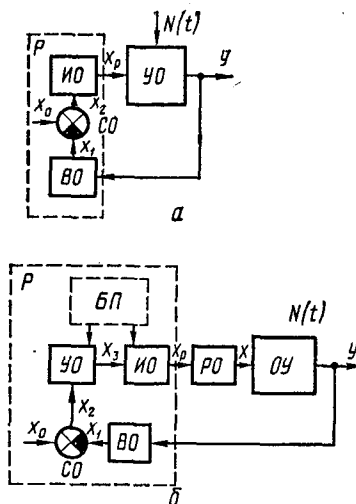


Рис. 20. Функциональные схемы автоматической системы управления:

а — с регулятором прямого действия;
б — с регулятором непрямого действия.

ния БП. Усиленный сигнал x_3 управляет исполнительным органом ИО, который передает воздействие x_p на управляемый объект за счет энергии, получаемой также от блока питания БП. В ряде случаев целесообразно из управляемого объекта выделять ту часть устройства, при помощи которой осуществляется непосредственное управление параметром. Эту часть называют регулирующим органом РО. Аналогично строят функциональные схемы более сложных систем автоматического управления, примеры которых рассмотрены в следующих параграфах.

Структурные схемы показывают взаимосвязь составных частей автоматических систем управления (АСУ) и характеризуют их динамические свойства. Это наиболее удобная графическая форма представления АСУ при исследовании ее динамических свойств, когда отвлекаются от конкретной физической природы регулируемой величины, вида и конструкции аппаратуры, а на схеме изображают лишь математическую модель процесса регулирования.

Исследуемую систему разделяют на части — элементарные звенья направленного действия, передающие сигналы только в одном направлении: от входа к выходу. Связь между звеньями показывают линиями со стрелками, характеризующими направленность взаимодействия звеньев. Разделяют АСУ на звенья в зависимости от вида математического уравнения, связывающего выходную величину с входной каждого звена. На структурной схеме элементы регулятора и управляемого объекта, как и на функциональной схеме, изображают в виде прямоугольника, причем какое-либо одно устройство может быть представлено

мого параметра y от заданного значения. Запись воздействия $N(t)$ отражает то обстоятельство, что оно может изменяться во времени t . Воспринимающий орган измеряет управляемый параметр и преобразует его в сигнал x_1 , удобный для сопоставления с заданным значением x_0 управляемого параметра в сравнивающем органе СО, который является также задатчиком и служит для настройки регулятора на поддержание заданного значения управляемого параметра. Его выполняют часто как самостоятельный элемент, а иногда вводят в структуру воспринимающего органа (датчика). С выхода СО сигнал x_2 , равный разности сигналов x_1 и x_0 , поступает на исполнительный орган ИО, который посредством сигнала x_p воздействует на объект в соответствии с отклонением регулируемого параметра.

У регулятора непрямого действия (рис. 20, б) сигнал x_2 со сравнивающего органа поступает на усилительный орган УО, где происходит значительное усиление за счет энергии специального блока пита-

несколькими звеньями (прямоугольниками) и, наоборот, несколько однотипных устройств могут быть показаны как одно звено.

Следует подчеркнуть, что между структурной и функциональной схемами есть определенная общность: та и другая отражают процесс преобразования и передачи сигнала в замкнутой системе управления. Однако есть и четкое различие. Функциональная схема характеризует систему по составным частям, рассматриваемым по их функциональному назначению, а структурная схема содержит математическое описание динамических свойств системы.

Математическая зависимость выходной величины от входной для каждого звена структурной схемы дается в виде передаточной функции $W(p)$, которая представляет собой записанное в операторной форме и разрешенное относительно изображения выходной величины дифференциальное уравнение данного звена. Структурные схемы составляют на основе принципиальных или функциональных схем автоматики.

§ 3. ПРИМЕРЫ СОСТАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АВТОМАТИКИ

Пример 20. Изучить принцип действия и составить функциональную схему автоматической системы управления загрузки комбайна, принципиальная схема которой показана на рисунке 21, а.

Решение. Система работает следующим образом. Датчик 2 толщины хлебной массы 1, находящейся под плавающим транспортером 3, замеряет количество хлебной массы, подаваемой в молотильный барабан комбайна. Для задания определенной уставки регулятора служит мостовая схема 4, при помощи которой настраивают регулятор на оптимальную подачу хлебной массы. При отклонении толщины хлебной массы от оптимальной изменяется положение ползунка датчика 2 и на выходе моста возникает напряжение, которое усиливается усилителем постоянного тока 5 и подается на реверсивный электродвигатель 6 с редуктором 7. Электродвигатель открывает окна гидрораспределителя 8, по которым масло M под давлением из гидросистемы поступает в гидроцилиндр 9 вариатора скорости 10 комбайна. При увеличении толщины слоя хлебной массы система регулирования действует через вариатор 10 и ведущее колесо 11 на снижение скорости комбайна и, следовательно, на уменьшение толщины слоя. При этом ползунок датчика возвращается в исходное положение, а окна гидрораспределителя закрываются под действием устройства, не показанного на рисунке.

На рисунке 21, б приведена функциональная схема системы. Поскольку процесс управления сводится к изменению скорости комбайна, то объектом управления ОУ яв-

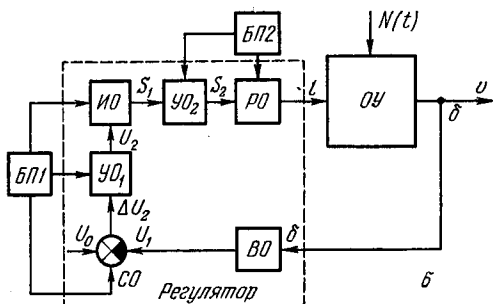
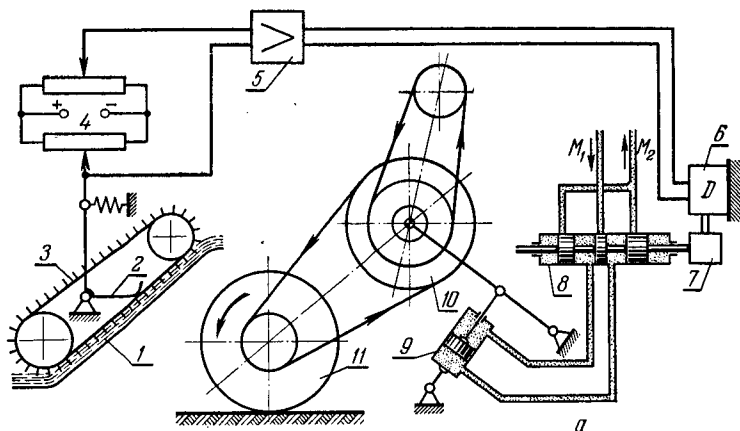


Рис. 21. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы автоматической системы управления загрузкой комбайна.

ляется комбайн, который подвержен возмущениям $N(t)$, возникающим при изменении густоты хлебной массы. Управление осуществляется по толщине δ хлебной массы, которая воспринимается датчиком 2 — воспринимающим органом ВО. Сравнение заданной величины с фактической происходит в сравнивающем органе СО — мосте 4 (рис. 21, а). Усилитель постоянного тока и гидрораспределитель на схеме рисунка 21, б изображены как усилительные органы УО₁ и УО₂. Электродвигатель с редуктором является исполнительным органом ИО, на который подается напряжение U_2 , а с выхода снимается перемещение S_1 . Регулирующим органом РО служит гидроцилиндр 9 и вариатор 10, который воздействует непосредственно на объ-

ект ОУ. Регулятор имеет два блока питания: $БП_1$ — аккумуляторная батарея и $БП_2$ — гидросистема с насосом.

Пример 21. Изучить принцип действия и составить функциональную схему автоматической системы двухпозиционного управления уровнем воды в башенной водокачке, принципиальная схема которой показана на рисунке 22, а.

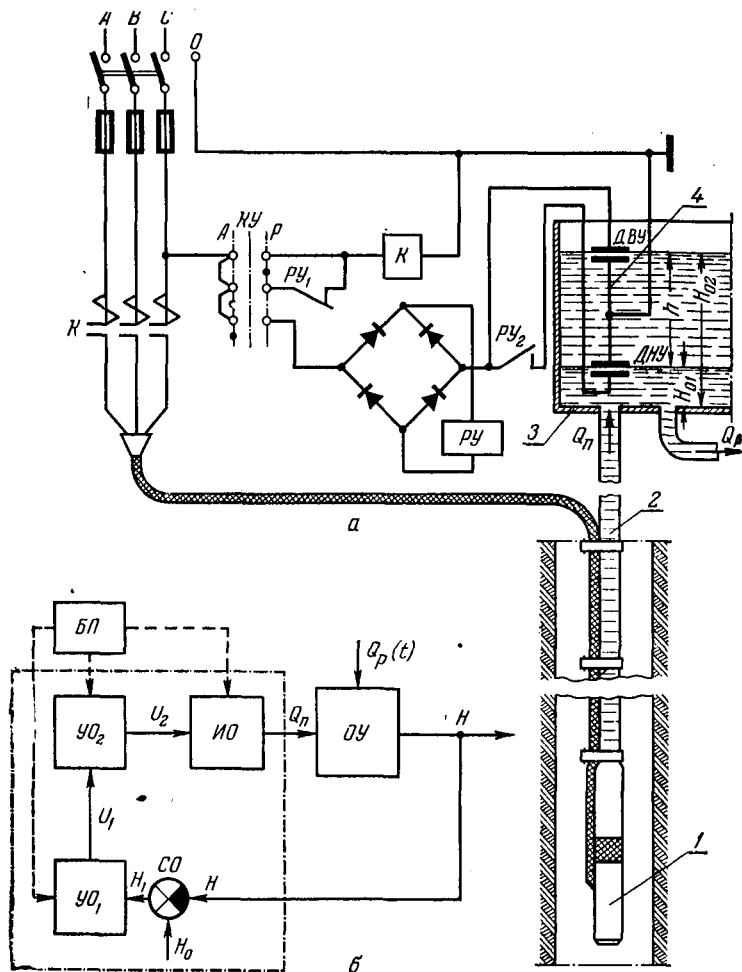


Рис. 22. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы автоматической системы управления башенной водокачкой с погружным электронасосом.

Решение. Схема состоит из электронасоса 1 погружного типа, трубопровода 2, напорного бака 3, электродного датчика 4 нижнего и верхнего уровней воды в баке и электрической схемы управления. При установке ключа управления $KУ$ влево схема действует автоматически. Электронасос включается контактором K , когда вода в баке опустится ниже электродного датчика $ДНУ$ нижнего уровня H_{01} . В этом случае реле уровня $РУ$ обесточится и своими контактами $РУ1$ включит контактор K , а контактами $РУ2$ дополнительно разорвет цепь питания своей обмотки. Реле уровня снова включится только тогда, когда вода достигнет электродов датчика верхнего уровня $ДВУ$. Реле уровня контактами $РУ1$ отключит электронасос, а контактами $РУ2$ перестроит схему на включение электронасоса при снижении уровня воды до датчика $ДНУ$.

Функциональная схема показана на рисунке 22,б. Воспринимающим органом уровня являются датчики $ДВУ$ и $ДНУ$, которые контролируют уровень в водонапорной башне — управляемом объекте $ОУ$. Заданный диапазон h изменения уровня воды зависит от первоначальной высоты установки датчиков. Следовательно, датчики одновременно выполняют роль сравнивающего органа $СО$, поэтому на функциональной схеме показан только элемент $СО$. Реле уровня и контактор служат на функциональной схеме релейными усилителями $УО_1$ и $УО_2$, а электронасос — исполнительным органом $ИО$. В качестве источника (блока) питания $БП$ всей системы выступает электрическая сеть переменного тока. Возмущением на управляемый объект является расход воды $Q_p(t)$ в водопроводной сети.

Пример 22. Изучить принцип действия и составить функциональную схему автоматической системы управления возбуждением синхронного генератора с помощью угольного регулятора, принципиальная схема которой показана на рисунке 23,а.

Решение. Система работает следующим образом. Регулируемое напряжение генератора выпрямляется мостом 1 и подводится к электромагниту 2 угольного регулятора, создавая электромагнитную силу F_1 , которая действует на рычаг 3 и ослабляет усилие сжатия F_0 угольного столбика 4, состоящего из набора угольных шайб. Сила F_0 , развиваемая пружиной 5, противодействует силе F_1 и сжимает угольный столбик. Снижение напряжения на генераторе, последующее уменьшение силы F_1 и сопротивления между шайбами приводит к тому, что ток в обмотке

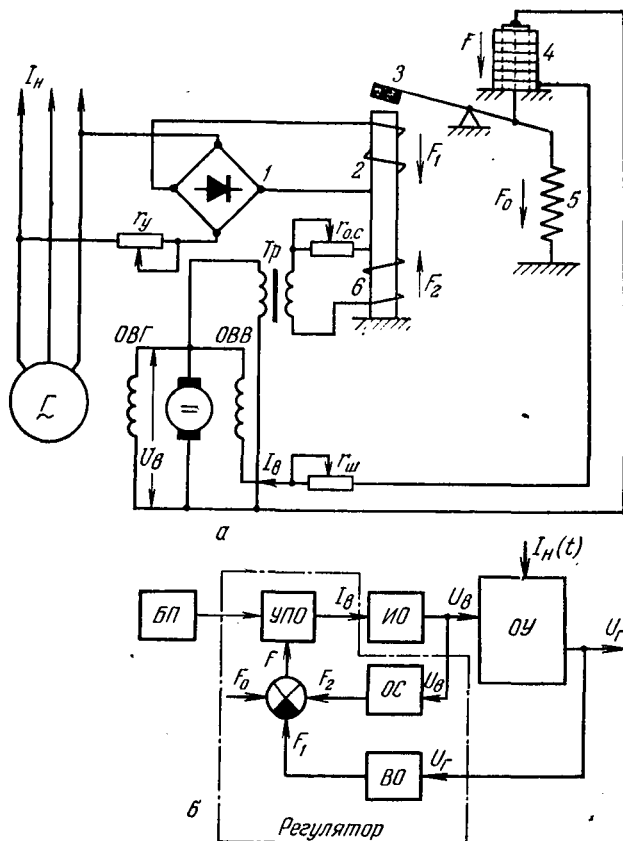


Рис. 23. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы автоматической системы управления возбуждения синхронного генератора при помощи угольного регулятора.

возбуждения возбудителя $ОВВ$ увеличивается, а напряжение генератора возрастает. При повышении напряжения процесс регулирования развивается в обратном порядке.

Управляемым объектом $ОУ$ является синхронный генератор. На него действуют напряжение возбуждения U_θ — управляющее воздействие и ток нагрузки I_H — возмущающее воздействие (рис. 23, б). Управляемая величина — выпрямленное напряжение генератора U_Γ подается на обмотку 2 электромагнита, которая на функциональной схеме обозначена как воспринимающий орган $ВО$. Сравнивающим орга-

ном CO в данном случае является механическая часть регулятора, состоящая из рычага 3, связанного с подвижной частью электромагнита, и пружины 5. Первоначальное натяжение пружины F_0 соответствует заданному напряжению генератора, поэтому воздействие F_0 является задающей величиной.

На элемент CO действуют силы F_0 , F_1 и F_2 , последняя из которых возникает в элементе обратной связи OC только в период переходных процессов, то есть в моменты изменения напряжения возбудителя U_v . В установившихся режимах постоянное напряжение U_v не трансформируется трансформатором Tr .

На принципиальной схеме обратная связь OC объединяет трансформатор Tr , резистор $r_{o.c}$ и обмотку b электромагнита и служит для повышения устойчивости регулирования.

В качестве усилительно-преобразовательного элемента УПО принят угольный столбик, на который действует сила F , равная алгебраической сумме сил F_0 , F_1 и F_2 .

Исполнительным органом ИО является система возбуждения генератора, входная величина которой — ток I_v обмотки возбуждения возбудителя $ОВВ$, а выходная — напряжение возбудителя U_v . Блоком питания БП служит выпрямитель 1, подключенный к напряжению генератора.

Пример 23. Изучить принцип действия и составить функциональную схему автоматической системы управления частотой вращения электропривода постоянного тока для токарного станка.

Решение. Принципиальная электрическая схема системы приведена на рисунке 24, а. Электродвигатель D в системе электропривода типа Г-Д (генератор — двигатель) является управляемым объектом ОУ (рис. 24, б). На него поступает управляющее воздействие в виде напряжения U_r с генератора постоянного тока и возмущающее воздействие — момент сопротивления $M(t)$ со стороны станка.

Частота вращения электропривода D измеряется тахогенератором $ТГ$, который в функциональной схеме представляет собой воспринимающий орган ВО. Сравнивающим органом служит потенциометр $П$, на котором происходит сравнение напряжения тахогенератора $U_{тг}$ и напряжения U_s , задающего требуемую частоту вращения электропривода.

Далее сигнал u поступает на двухкаскадный ламповый усилитель $Л_1—Л_3$, а затем на электромашинный усилитель ЭМУ (оба усилителя на функциональной схеме объедине-

ны в усилительный орган). Исполнительным органом является генератор, вращаемый с постоянной частотой приводным двигателем ПД.

При отсутствии сигнала на входе первого усилителя выходные токи I_1 и I_2 равны между собой и имеют разные знаки. В результате этого напряжения U_B и U_T на выходе ЭМУ и генератора, а следовательно, и частота вращения двигателя остаются неизменными.

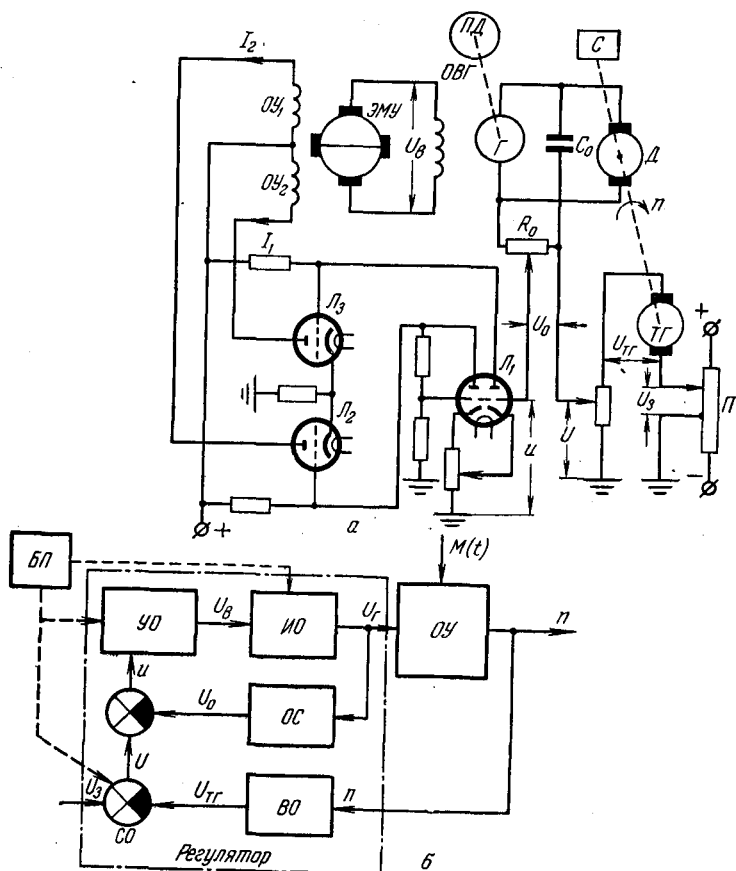


Рис. 24. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы автоматической системы управления частотой вращения электропривода постоянного тока.

При уменьшении скорости двигателя на вход усилителя поступает сигнал с одним знаком, а при увеличении скорости — с другим, в результате чего в первом случае повышается напряжение генератора и пропорционально ему скорость вращения двигателя, а во втором случае эти величины уменьшаются.

Для повышения устойчивости введена обратная связь ОС, состоящая из резистора R_0 и емкости C_0 . Элементы системы подключаются к специальному блоку питания БП.

Пример 24. Изучить принцип действия и составить функциональную схему автоматической системы управления температурой теплоносителя в зерносушилке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 25, а.

Решение. Объектом управления ОУ является шахта зерносушилки 8. Заданная температура теплоносителя поддерживается при помощи заслонки 2, которая поворачивается электродвигателем 4 с редуктором 3. Заслонка, являясь регулирующим органом (РО на рис. 25, б), изменяет соотношение притока холодного воздуха Q_x , забираемого вентилятором из атмосферы, и горячего газа Q_r , поступающего из топки.

Температура массы смешанного воздуха и газа (теплоноситель) измеряется датчиком-терморезистором r_0 , который представляет собой воспринимающий орган ВО. Терморезистор включен в измерительный мост 7, который служит в качестве сравнивающего органа СО. Требуемое значение температуры устанавливается изменением положения ползунка резистора-задатчика r_a .

Для усиления сигнала используется усилитель постоянного тока 5, который обозначен УО.

Когда температура теплоносителя под действием возмущения отклонится от заданной, на выходе моста появляется сигнал разбаланса, который через усилитель 5 управляет реверсивным двигателем 4, являющимся совместно с редуктором 3 исполнительным органом ИО.

Двигатель перемещает регулирующий орган в ту или иную сторону в зависимости от знака отклонения температуры. Для питания исполнительного, усилительного и сравнивающего органов служит блок БП.

Вследствие удаленности воспринимающего органа от регулирующего и его инерционности в системе возникают нежелательные периодические колебания температуры, так как остановка исполнительного органа происходит не в

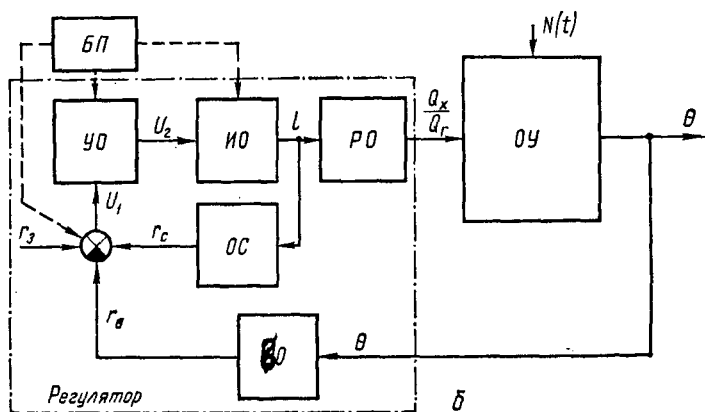
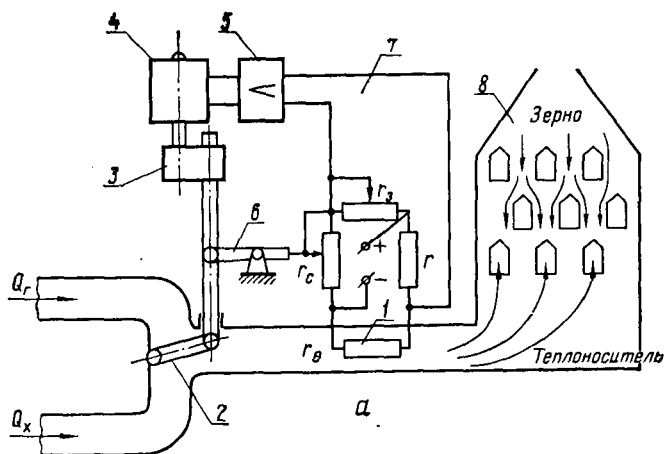


Рис. 25. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы автоматической системы управления температурой теплоносителя зерносушилки.

момент достижения регулирующим органом требуемого положения, а с некоторым запаздыванием.

Для устранения колебаний используется жесткая обратная связь ОС, которая выполнена при помощи резистора r_c переменного сопротивления, ползунок $б$ которого жестко связан с положением заслонки 2. Благодаря этому равновесие в системе наступает несколько раньше, чем заслонка займет конечное положение, а именно, в тот момент, когда

приращение сопротивления r_0 от изменения температуры и приращение сопротивления r_c , возникшее вследствие перемещения ползунка, станут равны друг другу. Затем температура, сопротивление терморезистора r_0 и положение заслонки постепенно достигают установившихся значений, отличающихся от исходных на некоторую допустимую величину, то есть жесткая обратная связь позволяет получить статическую характеристику регулирования.

Регулятор в этом случае называют *статическим*.

Пример 25. Изучить принцип действия и составить функциональную схему автоматической системы управления частотой вращения двигателя внутреннего сгорания с гибкой обратной связью, принципиальная схема которой приведена на рисунке 26, а.

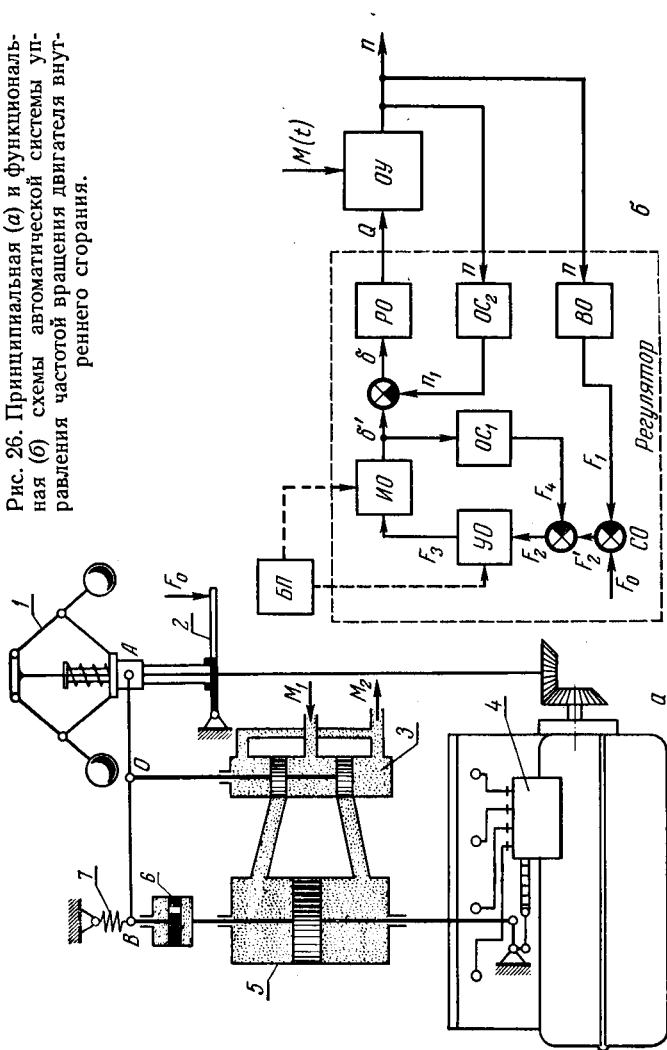
Решение. Работу схемы нетрудно уяснить, пользуясь рисунком 26, а. Воспринимающий орган *ВО* (рис. 26, б) — центробежный маятник 1 через рычаг *АВ* действует на золотник 3, представляющий собой на функциональной схеме усилительный орган *УО*.

Поршнем сервомотора 5 — исполнительным органом *ИО* управляют при помощи золотника. Сервомотор переставляет рейку топливного насоса 4, который по функциональному назначению выполняет роль регулирующего органа *РО*, изменяющего подачу топлива в цилиндры двигателя — управляемого объекта *ОУ*. Блоком питания *БП* является насос гидросистемы.

Система имеет две обратные связи. Гибкая обратная связь *ОС*₁ с выхода исполнительного органа с усилительным органом образуется благодаря рычагу *АВ* и изодрому 6 с пружиной 7. Вторая обратная связь *ОС*₂ с объектом управления на регулирующий орган появляется в результате конструктивной связи топливного насоса с валом двигателя — частота вращения насоса n_1 пропорциональна числу оборотов двигателя n .

Изодромное устройство обеспечивает астатическую характеристику регулирования, то есть точную стабилизацию частоты вращения при изменении в широких пределах возмущения $M(t)$ — момента на валу двигателя. Например, при уменьшении нагрузки частота вращения двигателя увеличится, рычаг *АВ* повернется вокруг точки *В* и переместит поршни золотника 3 вверх. Масло M_1 под давлением поступит в верхнюю полость сервомотора 4, и его поршень, двигаясь вниз, передвинет рейку насоса в сторону уменьшения подачи топлива.

Рис. 26. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы автоматической системы управления частотой вращения двигателя внутреннего сгорания.



Одновременно переместится вниз поршень 6 изодрома и растянется пружина 7, так как масло из нижней полости цилиндра изодрома не успевает быстро перетечь в верхнюю полость через малое отверстие в поршне. При этом рычаг АВ поворачивается вокруг точки А и закрывает окна золотника 3, вследствие чего поршень сервомотора прекращает свое движение при частоте вращения двигателя несколько выше первоначальной. Затем под действием пружины 7 точка В рычага АВ постепенно, по мере перетекания масла в цилиндре 6, поднимается в свое исходное положение и снова открывает окна золотника 3.

Процесс повторяется до тех пор, пока в системе не наступит равновесие, которому соответствует строго определенная частота вращения двигателя. Такой регулятор называют *астиатическим* или *изодромным*.

Пример 26. Ознакомиться с принципом действия и составить функциональную схему автоматической системы двухпозиционного управления температурно-влажностным режимом в инкубаторе «Универсал-45», электрическая схема которой приведена на рисунке 27, а.

Решение. Инкубатор «Универсал-45» состоит из трех подобных друг другу инкубационных шкафов и одного выводного. Каждый инкубационный шкаф имеет два регулятора: регулятор температуры и регулятор влажности, функциональные схемы которых показаны на рисунке 27, б.

Электронагреватели ЭН-1 и ЭН-2, предназначенные для обогрева шкафа, и электродвигатель Д вентилятора питаются от сети 380/220 В, а цепи датчиков температуры и реле — от вторичной обмотки трансформатора 220/24 В. Вентилятор установлен в потолке шкафа и работает непрерывно. Реле 2РП, тумблеры 1В и 2В и электронагреватели ЭН-1 и ЭН-2 включены. Контроль температуры осуществляется монотрическими датчиками температуры 1РО, 2РО и Р_о, которые на функциональной схеме представлены соответствующими воспринимающими и сравнивающими органами ВО₁ и СО₁, ВО₂ и СО₂, ВО₃ и СО₃.

Сравнивающие органы осуществляют сравнение фактических температур Θ_1 , Θ_2 и Θ_3 с заданными $\Theta_{01} = 37,5$; $\Theta_{02} = 37,7$ и $\Theta_{03} = 37,9^\circ \text{C}$, которые задаются рычажными уставками на датчиках температуры. При достижении температуры $37,5^\circ \text{C}$ размыкается контакт 1РО и через промежуточное реле 1РПР отключается электронагреватель ЭН-1, а при температуре $37,7^\circ \text{C}$ датчик 2РО аналогично отключает через реле 2РПР электронагреватель ЭН-2.

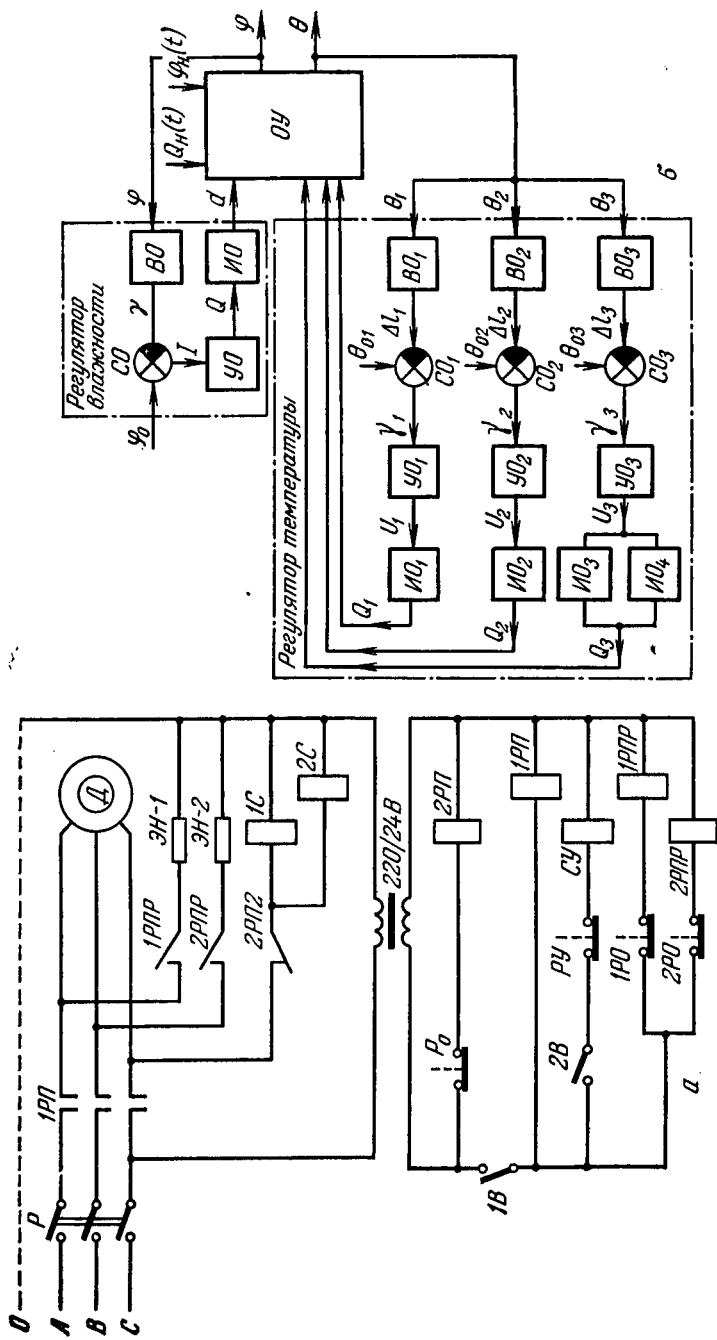


Рис. 27. Принципиальная электрическая (а) и функциональная (б) схемы автоматической системы управления температурно-влажностным режимом инкубатора «Универсал-45».

Для охлаждения инкубационного шкафа используется термореле P_0 , которое размыкает контакты при температуре $37,9^\circ\text{C}$ и отключает промежуточное реле $2PP$. Реле своими контактами $2PP2$ включает соленоиды $1C$ и $2C$ воздушных клапанов, через которые засасывается вентилятором в шкаф более холодный воздух. На функциональной схеме реле $1PPR$, $2PPR$ и $2PP$, выполняющие роль усилителей сигналов, обозначены соответственно $УО_1$, $УО_2$ и $УО_3$.

Исполнительными органами $ИО_1$ и $ИО_2$ являются электронагреватели $ЭН-1$ и $ЭН-2$, а для $ИО_3$ и $ИО_4$ соленоиды $1C$ и $2C$.

Контроль влажности воздуха осуществляется реле увлажнения $РУ$ дилатометрического типа, представленного на функциональной схеме воспринимающим $ВО$ и сравнивающим $СО$ органами. При уменьшении влажности реле $РУ$ замыкает контакты и включает соленоидный кран увлажнения $СУ$, при помощи которого вода подается на вращающийся дисковый увлажнитель (на рисунке не показан).

Таким образом, на функциональной схеме соленоидный кран $СУ$ является усилительным органом $УО$, а увлажнитель — исполнительным органом $ИО$, изменяющим влагосодержание в шкафу.

Глава III

СОСТАВЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНЬЕВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ



§ 1. МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ОПЕРАТОРНЫХ УРАВНЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Физическая природа и конструктивное исполнение АСУ весьма разнообразны. Поведение этих АСУ описывается либо обыкновенными дифференциальными уравнениями, либо дифференциальными уравнениями в частных производных. В дальнейшем будет говориться об АСУ с сосредоточенными параметрами, которые подчиняются обыкновенным дифференциальным уравнениям.

Дифференциальные уравнения АСУ составляют в определенной последовательности. Вначале АСУ разбивают на отдельные функциональные элементы, а потом на структурные звенья. На структурные звенья АСУ разбивают, имея в виду удобство составления дифференциального уравнения.

Для математического описания АСУ выделяют главные обобщенные координаты. Это, как правило, управляющее или возмущающее входное воздействие и выходной управляемый параметр объекта АСУ. Уравнения элементов АСУ обуславливаются их физической природой и составляются на основании законов механики, электротехники, термо- и гидродинамики и т. п.

Реальные физические процессы во многих элементах АСУ достаточно сложны и описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Эти дифференциальные уравнения сводят к линейным уравнениям, приближенным отражающим переходный процесс, то есть линеаризуют. Непрерывные нелинейные функции $f(x)$ линеаризуют, разлагая их в ряд Тейлора [2, 10]:

$$f(x) = f(x)_0 + \frac{f'(x)_0}{1!} \Delta x + \frac{f''(x)_0}{2!} \Delta x^2 + \dots$$

Результат линеаризации обычно ограничивают двумя членами разложения для сравнительно небольшого отклонения возмущающего или регулирующего воздействия $\Delta x = x_0 - x$. Тогда

$$f(x) \approx f(x)_0 + f'(x)_0 \Delta x$$

или в окончательном виде

$$\Delta f(x) = f'(x)_0 \Delta x = k \Delta x.$$

Очевидно, чем меньше величина Δx , тем меньше погрешность разложения.

Для удобства исследования АСУ установлены типовые возмущающие $\Delta x = f(t)$ и управляющее $\Delta x = g(t)$ воздействия. Наиболее широко пользуются скачкообразным воздействием, амплитуда которого равна единице $\Delta x = 1(t)$ и гармоническим воздействием $\Delta x = A_0 \sin \omega t$.

Типовые воздействия на элементы автоматики различной физической природы позволяют описать переходные процессы одними и теми

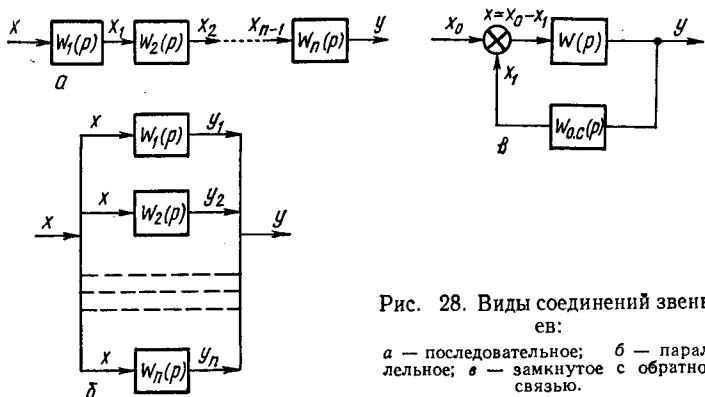


Рис. 28. Виды соединений звеньев:

а — последовательное; б — параллельное; в — замкнутое с обратной связью.

же дифференциальными уравнениями. Это обстоятельство делает возможным типизацию элементов по виду дифференциального уравнения. Уравнения принято записывать в операторной форме, вводя оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$. Из уравнения в операторной форме находят передаточную функцию $W(p)$.

Передаточная функция, согласно ее определению, представляет собой отношение операторного изображения выходной величины $y(p)$ к операторному изображению входной $x(p)$ при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)}.$$

По виду передаточной функции можно выделить шесть простейших типовых позиционных звеньев [3]: первого порядка — безынерционное $W(p) = k$; инерционное, или аperiодическое $W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$, интегрирующее $W(p) = \frac{1}{Tp}$; два дифференцирующих: идеализированное $W(p) = Tp$ и реальное $W(p) = \frac{kTp}{Tp + 1}$; второго порядка — колебательное $W(p) = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$ (при $T_1 < 2T_2$) и (при $T_1 > 2T_2$ — аperiодическое) и чистого запаздывания $W(p) = ke^{-\tau p}$.

При помощи указанных типовых звеньев можно выразить передаточную функцию любого реального элемента и всей АСУ. Функция $W(p)$ является полной характеристикой статических ($p=0$) и динамических ($p>0$) свойств звена при возмущении $\Delta x = 1(t)$. Передаточные функции АСУ составляются либо для отклонения управляемого параметра от заданного значения, то есть ошибки $x(t)$, либо для управляемой величины $y(t)$.

Передаточная функция $W(p)$ системы из n последовательно соединенных звеньев (рис. 28, а) равна произведению передаточных функций отдельных звеньев $W_i(p)$:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p).$$

Передаточная функция $W(p)$ системы из n параллельно соединенных звеньев (рис. 28, б) равна сумме передаточных функций отдельных звеньев $W_i(p)$:

$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p).$$

Передаточная функция (рис. 28, в) звена $W_3(p)$ с обратной связью $W_{o.c.}(p)$

$$W_3(p) = \frac{W(p)}{1 \pm W(p) W_{o.c.}(p)}.$$

В этой формуле знак «+» (плюс) соответствует отрицательной обратной связи, а знак «-» (минус) — положительной обратной связи.

Цепь, соединяющую через воспринимающий орган выход объекта со сравнивающим органом, принято называть *главной обратной связью*, а все другие — *дополнительными обратными связями*.

При гармоническом воздействии $\Delta x = A_0 \sin \omega t$ звено АСУ принято определять амплитудно-фазо-частотной характеристикой, которая представляет собой отношение вектора выходного сигнала к вектору входного возмущения:

$$W(j\omega) = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{a \sin(\omega t \pm \varphi)}{A_0 \sin \omega t} = \frac{a}{A_0} e^{\pm i\varphi}.$$

Приведенное выражение $W(j\omega)$ легко получить в результате формальной подстановки $p = j\omega$ в выражение $W(p)$. Следует подчеркнуть, что функция $W(j\omega)$ в отличие от функции $W(p)$ отражает только установившийся процесс колебаний $y(t)$ при гармоническом возмущении. Графически характеристика $W(j\omega)$ изображается в комплексной плоскости и называется *годографом* [2, 3, 12, 16]. Если на входе изменять частоту возмущения ω от 0 до ∞ , то на выходе значение a может меняться от a_0 до 0 и угол φ сдвига фаз между выходным и входным вектором — от 0 до $\pm \varphi_{\max}$. В этом случае зависимости $\frac{a}{A_0} = f(\omega)$ и $\pm \varphi = f(\omega)$ называют соответственно амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристиками.

Практически полоса пропускания звена оценивается частотой, когда $\frac{a}{A_0} \leq 0,05$. Функции $\frac{a}{A_0}(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ удобно строить в логарифмическом масштабе $20 \lg \frac{a}{A_0} = f(\lg \omega)$ и $\varphi = f(\lg \omega)$. В этом случае их называют соответственно логарифмической амплитудной (ЛАХ) и логарифмической фазовой (ЛФХ) характеристиками. Выражение $20 \lg \frac{a}{A_0}$ обозначают символом L . Единица измерения величины L —

децибел (Дб), одна десятая часть бела (Б). Бел — единица измерения десятичного логарифма коэффициента усиления мощности сигнала. Если коэффициент усиления по мощности $\frac{P}{P_0} = 10$, то $\lg 10 = 1$ Б,

если $\frac{P}{P_0} = 100$, $\lg 100 = 2$ Б; если $\frac{P}{P_0} = 1000$, $\lg 1000 = 3$ Б. Поскольку мощность сигнала пропорциональна квадрату амплитуды $P \equiv a^2$ и $P_0 = A_0^2$, то усиление (в беллах) через отношение амплитуд выражается $\lg \frac{P}{P_0} = \lg \left(\frac{a}{A_0} \right)^2 = 2 \lg \frac{a}{A_0}$. В децибелах это будет $20 \lg \frac{a}{A_0}$. На оси абсцисс даются значения $\lg \omega$. Здесь единицей измерения служит декада. Она соответствует изменению частоты в 10 раз. Октава соответствует изменению частоты в 2 раза.

Логарифмическое изображение ЛАХ в большинстве практических случаев позволяет заменить реальную кривую более простыми ломаными линиями. Логарифмические амплитудные характеристики АСУ, состоящей из последовательно соединенных звеньев, равно сумме ЛАХ отдельных звеньев.

§ 2. ПРИМЕРЫ СОСТАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ АВТОМАТИКИ

И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ В ОБЩЕМ ВИДЕ

Пример 27. Составить структурную схему и определить передаточную функцию автоматической системы управления возбуждением генератора, схема которой показана на рисунке 23.

Решение. Разделим систему на следующие элементы структурной схемы (рис. 29, а) с передаточными функциями:

$$W_0(p) = \frac{U_r}{U_B} \text{ — для управляемого объекта;}$$

$$W_{0.c}(p) = \frac{F_1}{U_r} \text{ — для воспринимающего органа;}$$

$$W_{10.c}(p) = \frac{F_2}{\Delta U_B} \text{ — для дополнительной обратной связи;}$$

$$W_1(p) = \frac{I_B}{F} \text{ — для усилительно-преобразовательного органа;}$$

$$W_2(p) = \frac{U_B}{I_B} \text{ — для исполнительного органа (система возбуждения генератора).}$$

Вначале определим передаточную функцию части системы, охваченной дополнительной обратной связью:

$$W_3(p) = \frac{W_1(p) W_2(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_{10.c}(p)},$$

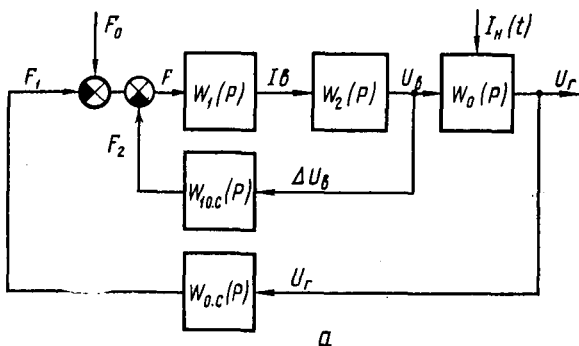
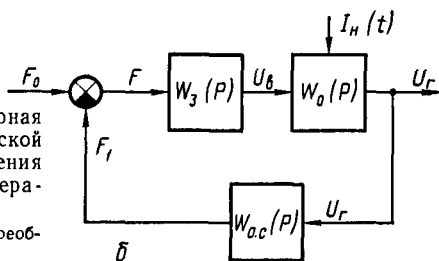


Рис. 29. Структурная схема автоматической системы управления напряжением генератора:

a — исходная; *б* — преобразованная.



а затем по той же формуле, исходя из преобразованной структурной схемы (рис. 29, б), — передаточную функцию всей системы:

$$W(p) = \frac{W_3(p) W_0(p)}{1 + W_3(p) W_0(p) W_{0.c}(p)} =$$

$$= \frac{W_1(p) W_2(p) W_0(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) [W_{10.c}(p) + W_0(p) W_{0.c}(p)]}.$$

Пример 28. Составить структурную схему и определить передаточную функцию автоматической системы управления частотой вращения электропривода токарного станка, схема которой приведена на рисунке 24.

Решение. Разделим систему на следующие элементы структурной схемы (рис. 30) с передаточными функциями:

$$W_0(p) = \frac{n}{U_r} \text{ — для управляемого объекта;}$$

$$W_{0.c}(p) = \frac{U_{г.г}}{n} \text{ — для воспринимающего органа;}$$

$$W_1(p) = \frac{U_{в}}{u} \text{ — для усилительного органа;}$$

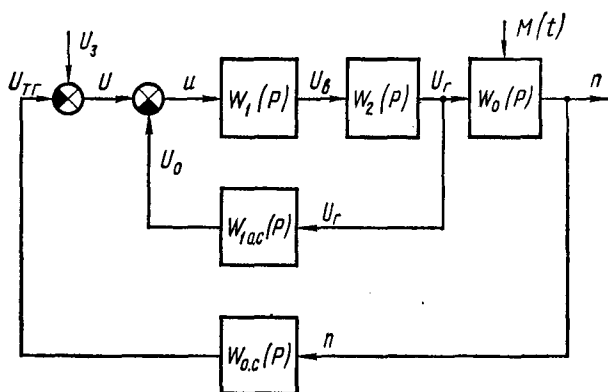


Рис. 30. Структурная схема автоматической системы управления частотой вращения электропривода токарного станка.

$W_2(p) = \frac{U_r}{U_b}$ — для исполнительного органа;

$W_{i.o.c}(p) = \frac{U_0}{U_r}$ — для дополнительной обратной связи.

Как и в предыдущем примере, сначала определим передаточную функцию для части, охваченной дополнительной обратной связью:

$$W_3(p) = \frac{W_1(p) W_2(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_{i.o.c}(p)},$$

а затем для всей системы:

$$W(p) = \frac{W_1(p) W_2(p) W_0(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) [W_{i.o.c}(p) + W_0(p) W_{o.c}(p)]}.$$

Из двух последних примеров видно, что структурные схемы и передаточные функции могут быть одинаковы в общем виде, хотя системы имеют различные принципиальные схемы и предназначены для разных целей.

Пример 29. Составить структурную схему и определить передаточную функцию автоматической системы управления температурой зерносушилки, схема которой приведена на рисунке 25.

Решение. Выделим в системе следующие элементы структурной схемы (рис. 31) с передаточными функциями:

$W_{o1}(p) = e^{-P\tau}$ — для звена чистого запаздывания (теплопровод);

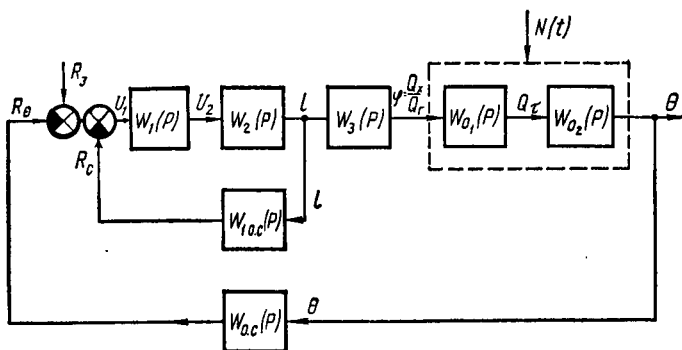


Рис. 31. Структурная схема автоматической системы управления температурой зерносушилки.

$W_{o2}(p) = \frac{\theta}{\varphi}$ — для управляемого объекта (зерносушилка);

$W_{o.c}(p) = \frac{R_\theta}{\theta}$ — для воспринимающего органа (терморезистор);

$W_1(p) = \frac{U_2}{U_1}$ — для усилительного органа;

$W_2(p) = \frac{l}{U_2}$ — для исполнительного органа (электродвигатель с редуктором);

$W_3(p) = \frac{\varphi}{l}$ — для регулирующего органа (заслонка);

$W_{10.c}(p) = \frac{R_c}{l}$ — для дополнительной обратной связи (рычаг b , резистор r_c).

Вначале, как и в предыдущих примерах, определим передаточную функцию для части системы с дополнительной обратной связью:

$$W_4(p) = \frac{W_1(p) W_2(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_{10.c}(p)},$$

а затем для всей системы:

$$W(p) = \frac{W_4(p) W_3(p) W_{o1}(p) W_{o2}(p)}{1 + W_4(p) W_3(p) W_{o1}(p) W_{o2}(p) W_{o.c}(p)}$$

или

$$W(p) = \frac{W_1(p) W_2(p) W_3(p) W_{o1}(p) W_{o2}(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) [W_{10.c}(p) + W_3(p) W_{o1}(p) W_{o2}(p) W_{o.c}(p)]}.$$

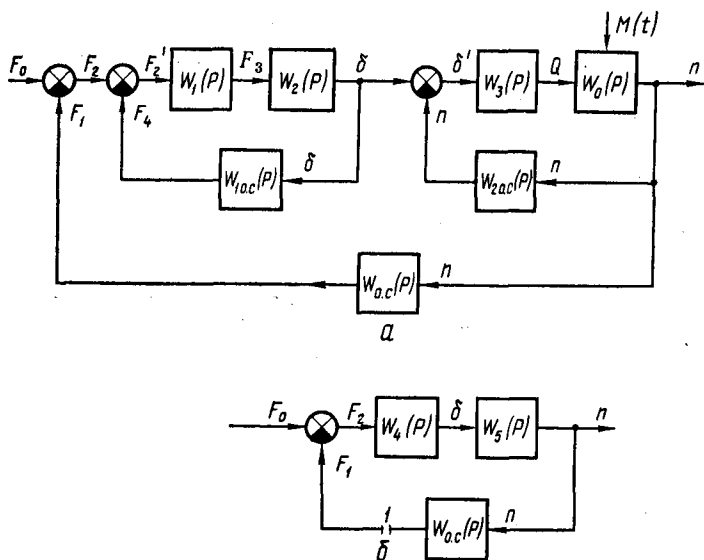


Рис. 32. Структурная схема автоматической системы управления частотой вращения двигателя внутреннего сгорания:

а — исходная; б — преобразованная.

Пример 30. Составить структурную схему и определить передаточную функцию автоматической системы управления частотой вращения двигателя внутреннего сгорания, схема которой приведена на рисунке 26.

Решение. Выделим в системе следующие элементы (рис. 32) с передаточными функциями:

$W_0(p) = \frac{n}{Q}$ — для управляемого объекта (двигатель);

$W_{o.c}(p) = \frac{F_1}{n}$ — для воспринимающего органа (центробежный маятник);

$W_1(p) = \frac{F_3}{F_2'}$ — для усилительного органа (золотник);

$W_2(p) = \frac{\delta}{F_3}$ — для исполнительного органа (сервомотор);

$W_3(p) = \frac{Q}{\delta'}$ — для регулирующего органа (топливный насос);

$W_{10. c}(p) = \frac{F_4}{\delta}$ — для дополнительной обратной связи (изодромное устройство);

$W_{20. c}(p) = \frac{n_1}{n}$ — для дополнительной обратной связи (насос с двигателем).

Определим передаточные функции для двух частей системы, имеющих дополнительные отрицательные обратные связи:

$$W_4(p) = \frac{W_1(p) W_2(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_{10. c}(p)}$$

и

$$W_5(p) = \frac{W_3(p) W_0(p)}{1 + W_3(p) W_0(p) W_{20. c}(p)}$$

и получим преобразованную структурную схему — рисунок 32, б, по которой находим передаточную функцию системы:

$$W(p) = \frac{W_4(p) W_5(p)}{1 + W_4(p) W_5(p) W_{0. c}(p)}.$$

§ 3. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ И ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ЗВЕНЬЕВ АСУ

Пример 31. Определить уравнение движения и передаточную функцию изодромного механизма — звена OC_1 обратной связи АСУ, изображенной на рисунке 26.

Решение. Уравнение движения изодрома без учета сил инерции движущихся его масс:

$$F_n + F_k = 0,$$

где $F_n = b \Delta z$ — сила пружины изодрома;

b — коэффициент жесткости;

Δz — перемещение пружины;

$F_k = v \frac{d\Delta z_k}{dt} - k_n v \frac{d\Delta z_n}{dt}$ — сила катаракта;

v — коэффициент пропорциональности, зависящий от вязкости масла и проходного сечения полостей катаракта;

Δz_k — перемещение полости катаракта;

Δz_n — перемещение полости поршня;

k_n — коэффициент пропорциональности, показывающий, во сколько раз z_n отличается от z_k .

Раскрыв слагаемые исходного уравнения, получим:

$$b \Delta z_k + v \frac{d \Delta z_k}{dt} - k_n v \frac{d \Delta z_n}{dt} = 0 \quad \Delta z = \Delta z_k$$

или

$$(T_k p + 1) \Delta z_k = k_n T_k p \Delta z_n,$$

откуда

$$W(p)_{\text{ио.с}} = \frac{\Delta z_k}{\Delta z_n} = \frac{k_n T_k p}{T_k p + 1},$$

где

$$T_k = \frac{v}{b}, \quad k_n = \frac{\Delta z_{k.0}}{\Delta z_{n.0}}.$$

Пример 32. Определить передаточную функцию сервомотора 5 с двусторонним отсечным золотником для АСУ, изображенной на рисунке 26.

Решение. Уравнение движения поршня сервомотора составляют с учетом направления его движения. Например, для движения поршня вверх уравнение имеет вид:

$$S_2 q_2 - S_1 q_1 + F_p = 0,$$

где q_1, q_2 — соответственно высокое и низкое давление в полостях цилиндра;

S_1, S_2 — площади поршня со стороны областей низкого и высокого давления;

F_p — сила сопротивления управляющего органа.

Уравнения неразрывности для плоскостей 1 и 2 таковы:

$$S_1 \frac{d \Delta z_n}{dt} = \Delta x a \mu \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (q_1 - q_c)},$$

$$S_2 \frac{d \Delta z_n}{dt} = \Delta x a \mu \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (q_n - q_2)},$$

где q_c, q_n — давление в плоскости слива и низкое давление картера;

Δz_n — координата движения поршня;

Δx — координата движения золотника;

a — ширина золотникового отверстия;

μ — коэффициент пропорциональности истечения;

g — ускорение свободного падения;

γ — плотность рабочей жидкости.

Определив из этих уравнений значения q_1 и q_2 и подставив их в формулу, после окончательных преобразований

получим

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\gamma (S_1^3 + S_2^3)}{2g(S_2 q_n - S_1 q_c + F_p) a^2 \mu^2}} \frac{d \Delta z_n}{dt}$$

или

$$\Delta x = T_c \frac{dz_n}{dt} = T_c p \Delta z_n,$$

где T_c — постоянная времени сервомотора.

Отсюда передаточная функция

$$W(p) = \frac{\Delta z_n}{\Delta x} = \frac{1}{T_c p}.$$

Пример 33. Составить уравнение движения и найти передаточную функцию двигателя внутреннего сгорания (ДВС) — управляемого объекта АСУ (рис. 26).

Решение. Крутящий момент M_d двигателя уравновешивается моментом сопротивления M_c и моментом инерции $J \frac{d\omega}{dt}$

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Крутящий момент ДВС

$$M_d = 75 \frac{\gamma z^{3,27}}{k_1 g_e \omega},$$

где γ — плотность топлива;

k_1 — конструктивный коэффициент;

z — полезный ход рейки топливного насоса;

g_e — удельный эффективный расход топлива;

$\omega = \frac{\pi n}{60}$ — частота вращения ДВС.

Момент сопротивления

$$M_c = B \omega^m,$$

где B и m — некоторые постоянные, определяемые рабочей машиной.

Линеаризовав при помощи ряда Тейлора уравнения и решив их, получим в приращениях:

$$J \frac{d \Delta \omega}{dt} + \left(75 \frac{\gamma z_0^{3,27}}{k_1 g_e \omega_0^3} + m B \omega_0^{m-1} \right) \Delta \omega = 245 \frac{\gamma z_0^{2,27}}{k_1 g_e \omega_0} \Delta z$$

или

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} + F_g \Delta\omega = k_g \Delta z,$$

откуда

$$\frac{J}{F_g} \frac{d\Delta\omega}{dt} + \Delta\omega = \frac{k_g}{F_g} \Delta z,$$

где F_g — фактор устойчивости ДВС;

k_g — степень изменения момента M_d при перемещении рейки топливного насоса.

В окончательном виде

$$(T_d p + 1) \Delta\omega = k_d \Delta z,$$

где T_d и k_d — постоянная времени и коэффициент усиления ДВС.

Передаточная функция ДВС

$$W(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta z} = \frac{k_d}{T_d p + 1}.$$

Пример 34. Составить дифференциальное уравнение и найти передаточную функцию центробежного маятника 1 (ЦМ) — воспринимающего органа АСУ (рис. 26).

Решение. Уравнение равновесия сил, приведенных к муфте ЦМ, можно записать в приращениях:

$$\Delta F_{ц} = \Delta F_{п} + \Delta F_{ж} + \Delta F_{т}.$$

Приращение центробежной силы грузов

$$\Delta F_{ц} = am_r \frac{l_1}{l_2} \left(r_m + \frac{l_1}{l_2} z_0 \right) i^2 2\omega_0 \Delta\omega + am_r \left(\frac{l_1}{l_2} i\omega_0 \right)^2 \Delta z,$$

где a — конструктивный коэффициент ЦМ;

m_r , l_1 , l_2 — масса грузов и геометрические размеры их расположения;

r_m — минимальный радиус вращения ЦМ;

i — передаточное число частоты вращения от коленчатого вала двигателя к валу ЦМ;

z_0 — начальное значение перемещения муфты ЦМ;

ω — частота вращения вала двигателя.

Приращение силы противодействия пружин приращению $\Delta F_{ц}$

$$\Delta F_{п} = b\Delta z,$$

где b — коэффициент жесткости пружин.

Приращение силы инерции всех движущихся масс m' ЦМ

$$\Delta F_{\text{и}} = m' \frac{d^2 \Delta z}{dt^2}.$$

Приращение силы вязкого трения муфты ЦМ

$$\Delta F_{\text{т}} = v \frac{d\Delta z}{dt},$$

где v — коэффициент вязкого трения.

Подставив значение $\Delta F_{\text{и}}$; $\Delta F_{\text{п}}$; $\Delta F_{\text{и}}$ и $\Delta F_{\text{т}}$ в уравнение равновесия сил и выполнив преобразование относительно Δz и $\Delta \omega$, получим:

$$\begin{aligned} m' \frac{d^2 \Delta z}{dt^2} + v \frac{d\Delta z}{dt} + \left[b - am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i\omega_0 \right)^2 \right] \Delta z = \\ = am_{\Gamma} \frac{l_1}{l_2} \left(r_{\text{м}} + \frac{l_1}{l_2} z_0 \right) i 2\omega_0 \Delta \omega. \end{aligned}$$

После преобразований данное уравнение запишем в операторной форме:

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) \varphi = k_{\text{м}} \eta,$$

где

$$\begin{aligned} k_{\text{м}} &= \frac{am_{\Gamma} \frac{l_1}{l_2} \left(r_{\text{м}} - \frac{l_1}{l_2} z_0 \right) i^2 2\omega_0^2}{\left[b - am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i\omega_0 \right)^2 \right] z_0}; \\ T_2^2 &= \frac{m'}{b - am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i\omega_0 \right)^2}, \quad T_1 = \frac{v}{\left[b - am_{\Gamma} \left(\frac{l_1}{l_2} i\omega_0 \right)^2 \right]}; \\ \varphi &= \frac{\Delta z}{z_0}; \quad \eta = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}. \end{aligned}$$

Передаточная функция ЦМ

$$W(p)_{\text{м}} = \frac{\varphi}{\eta} = \frac{k_{\text{м}}}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

Пример 35. Составить уравнение и определить передаточную функцию звена обратной связи $R_0 C_0$ для АСУ, изображенной на рисунке 24.

Решение. Входным сигналом на $R_0 C_0$ является напряжение генератора u_{Γ} . Оно складывается из напряжений на конденсаторе C_0 и на резисторе R_0 :

$$u_{\Gamma} = u_C + u_R.$$

Продифференцировав по t , получим

$$\frac{du_r}{dt} = \frac{du_c}{dt} + \frac{du_R}{dt}.$$

Ток в цепи $R_0 C_0$

$$i = C_0 \frac{du_c}{dt},$$

тогда $\frac{du_c}{dt} = \frac{i}{C_0}$, $u_R = i R_0$.

Выразив ток звена обратной связи через выходной параметр u_0 на части сопротивления R'_0 , найдем

$$i = \frac{u_0}{R'_0}.$$

Решив выше составленные уравнения относительно u_r и u_0 , получим

$$kT \frac{du_r}{dt} = u_0 + T \frac{du_0}{dt},$$

где

$$k = \frac{R'_0}{R_0} \quad \text{и} \quad T = R_0 C_0.$$

В операторной форме

$$kT p u_r = u_0 (1 + T p).$$

Передаточная функция

$$W_{\text{и.с.}}(p) = \frac{u_0}{u_r} = \frac{kT p}{1 + T p}.$$

Пример 36. Составить уравнение и найти передаточную функцию электромашинного усилителя (ЭМУ) для схемы, представленной на рисунке 24. Для простоты анализа можно пренебречь электромеханическими процессами в ЭМУ, реакцией якоря по продольной и поперечной осям, взаимоиндукцией обмоток управления и якоря.

Решение. Для малых приращений возмущающих воздействий по закону Кирхгофа в операторной форме можно записать:

а) для каждой обмотки управления ЭМУ, которые в данном случае одинаковы:

$$k_{yi} \Delta u_{yi} = \Delta i_{yi} (1 + T_{yi} p),$$

где $k_{yi} = \frac{1}{\Sigma r_{yi}}$ и $T_{yi} = \frac{L_{yi}}{\Sigma r_{yi}}$ — коэффициент усиления и постоянная времени каждой обмотки;

L_{yi} и Σr_{yi} — индуктивное и суммарное активное сопротивления обмоток управления;

б) для поперечной короткозамкнутой цепи якоря:

$$k_2 \Delta e_2 = \Delta i_2 (1 + T_2 p),$$

где $k_2 = \frac{1}{\Sigma R_2}$ и $T_2 = \frac{L_2}{\Sigma R_2}$ — коэффициент усиления и постоянная времени поперечной обмотки;

Δe_2 и Δi_2 — приращения э.д.с. и тока в поперечной обмотке;

в) для выходной цепи нагрузки:

$$k_n \Delta e_n = \Delta i_n (1 + T_n p),$$

где $k_n = \frac{1}{r_a + r_n}$ и $T_n = \frac{L_a + L_n}{r_a + r_n}$ — коэффициент усиления и постоянная времени выходной оси.

Поскольку $r_n \gg r_a$ и $L_n \gg L_a$, можно пренебречь наличием r_a и L_a , тогда $\Delta e_n \approx \Delta u_n$.

Для нагруженного ЭМУ [1]

$$\Delta e_2 = 2C_y \Delta i_y - C_n \Delta i_n - C_2 \Delta i_2,$$

где C_y, C_n, C_2 — постоянные коэффициенты, определяемые конструкцией ЭМУ.

Приращение э. д. с. нагрузочной цепи выражается через ток поперечной обмотки [2]

$$\Delta e_n = C_3 \Delta i_2.$$

Решая совместно составленные выше уравнения, находим в итоге

$$\Delta u_n \approx \Delta e_n = \frac{2C_3 C_{yi} W(p)_{yi} W(p)_n u_{yi}}{1 + C_n C_3 W(p)_n W(p)_2 + C_2 W(p)_2}.$$

Отсюда можно получить передаточную функцию ЭМУ:

$$W(p) = \frac{\Delta u_n}{\Delta u_{yi}} = \frac{2C_3 C_{yi} W(p)_{yi} W(p)_n}{1 + C_n C_3 W(p)_n W(p)_2 + C_2 W(p)_2},$$

где $W(p)_{yi} = \frac{k_{yi}}{T_{yi} p + 1}$, $W(p)_2 = \frac{k_2}{1 + T_2 p}$ и $W(p)_n = \frac{k_n}{1 + T_n p}$.

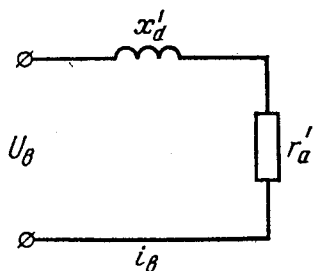


Рис. 33. Схема замещения синхронного генератора при расчете токов короткого замыкания.

Пример 37. Определить передаточную функцию синхронного генератора Γ (рис. 23) — управляемого объекта АСУ возбуждением.

Решение. Переходный процесс управляемого объекта в АСУ возбуждением будет определяться его электромагнитными свойствами.

В АСУ возбуждением принято генератор замещать сопротивлениями r'_a и x'_d , приведенными к входным зажимам обмотки возбуждения (рис. 33). В этой цепи напряжение u_b на зажимах обмотки возбуждения является входным параметром, а $i_b \equiv u_r$ — выходной параметр генератора.

На основании закона Кирхгофа для электрической цепи возбуждения можно записать

$$u_b = i_b r'_a + L'_d \frac{di_b}{dt} = i_b (r'_a + L'_d p)$$

или

$$\Delta u_b = \Delta i_b (r'_a + L'_d p),$$

откуда

$$k_b \Delta u_b = \Delta i_b (1 + T'_d p),$$

где $k_b = \frac{1}{r'_a}$ — коэффициент усиления генератора по входной цепи;

$T'_d = \frac{L'_d}{r'_a}$ — постоянная времени генератора для переходного процесса.

Передаточная функция генератора

$$W(p) = \frac{\Delta i_b}{\Delta u_b} = \frac{k_b}{1 + T'_d p}.$$

Для перехода от входного параметра u_b к выходному напряжению u_r можно воспользоваться формулой

$$i_b = c e'_d,$$

где c — постоянный коэффициент, зависящий от типа генератора.

Э. д. с. генератора

$$e'_d = \sqrt{\left(u_r + \frac{P_c r_c + Q_c x'_d}{u_r}\right)^2 + \left(\frac{P_c x_d - Q_c r_c}{u_r}\right)^2},$$

где P_c и Q_c — активная и реактивная мощности синхронного генератора;

r_c , x'_d и x_d — соответственно активное и реактивные переходное и установившееся сопротивления.

Разложив функцию e'_d в ряд Тейлора, получим в приращениях

$$\Delta e'_d = \left[\frac{u_{r0}}{e'_{d0}} - \frac{(P_c r_c + Q_c x'_d)^2 + (P_c x_d - Q_c r_c)^2}{u_{r0}^3 e'_{d0}} \right] \Delta u_r$$

или

$$\Delta e'_d = \frac{1}{k_U} \Delta u_r.$$

Решив полученные выше уравнения совместно относительно Δu_r и Δu_B , будем иметь

$$W(p) = \frac{\Delta u_r}{\Delta u_B} = \frac{k_B \frac{C}{k_U}}{1 + T'_d p} = \frac{k_r}{1 + T'_d p}.$$

Пример 38. Определить передаточную функцию воспринимающего органа (ВО) — электромагнита 2 АСУ возбуждением синхронного генератора Γ (рис. 23).

Решение. По схеме можно судить, что входной величиной ВО является напряжение u_r генератора, а выходной — ток электромагнита 2.

На основании закона Кирхгофа для ВО составим уравнение, считая индуктивность электромагнита неизменной:

$$\begin{aligned} u_r &= r_y i_B + r_d i_B + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} r_2 i_B + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} L_2 \frac{di_B}{dt} = \\ &= \left(r_y + r_d + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} r_2 \right) i_B + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} L_2 \frac{di_B}{dt}, \end{aligned}$$

где r_y , r_d и r_2 — активные сопротивления уставки, диодного моста и электромагнита 2;

i_B — ток воспринимающего органа;

L_2 — индуктивность электромагнита 2.

Уравнение u_r можно преобразовать:

$$k_B u_r = i_B + T_B \frac{di_B}{dt} = i_B (1 + T_B p),$$

где $k_B = \frac{1}{r_y + r_d + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} r_2}$ — коэффициент усиления ВО;

$$T_B = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} L_2}{r_y + r_d + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} r_2} \text{ — постоянная времени ВО.}$$

Передаточная функция ВО

$$W(p) = \frac{i_B}{u_T} = \frac{k_B}{1 + T_B p}.$$

Пример 39. Определить передаточную функцию трансформатора обратной связи (ОС) АСУ возбуждения синхронного генератора (рис. 23).

Решение. Для трансформатора ОС на основании закона Кирхгофа можно записать:

$$u_B = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

и

$$0 = (R_{o.c} + r_2 + r_{o.c}) i_2 + (L_2 + L_{o.c}) \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt},$$

где u_B — напряжение возбудителя, приложенное к входу трансформатора обратной связи;

r_1 , L_1 и i_1 — активное сопротивление, индуктивность и ток первичной обмотки трансформатора ОС;

r_2 , L_2 и i_2 — активное сопротивление, индуктивность и ток вторичной обмотки трансформатора ОС;

M — коэффициент взаимной индуктивности обмоток трансформатора ОС;

$r_{o.c}$ — активное регулировочное сопротивление;

$R_{o.c}$ и $L_{o.c}$ — активное сопротивление и индуктивность обмотки обратной связи электромагнита б.

Записав оба уравнения в операторной форме и решив их совместно относительно u_B и i_2 , получим после преобразований:

$$k_1 T_{m_2} p u_B = [1 + (T_1 + T_2) p + (T_1 T_2 - T_{m_1} T_{m_2}) p^2] i_2,$$

где

$$k_1 = \frac{1}{r_1}; \quad T_{m_1} = \frac{M}{r_1};$$

$$T_{m_2} = \frac{M}{R_{o.c} + r_{o.c} + r_2};$$

$$T_1 = \frac{L_1}{r_1}; \quad T_2 = \frac{L_2 + L_{o.c}}{R_{o.c} + r_{o.c} + r_2}.$$

Передаточная функция трансформатора ОС

$$W(p) = \frac{i_2}{u_B} = \frac{k_1 T_{M2} p}{1 + (T_1 + T_2) p + (T_1 T_2 - T_{M1} T_{M2}) p^2} = \frac{k_1 T_{M2} p}{1 + T_1' p + T_2' p^2}.$$

Пример 40. Составить уравнение и найти передаточную функцию усилительно преобразующего органа, состоящего из угольного столбика 4 с рычагом 3 и пружины 5 (рис. 23) АСУ возбуждения генератора.

Решение. На основании условия равновесия моментов, действующих в усилительно-преобразующем органе и якоре электромагнита 2, можно составить уравнение:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + h \frac{d\alpha}{dt} = M_{\text{э}} + M_y - M_{\text{пр}},$$

где J — момент инерции подвижных масс якоря;
 h — коэффициент сил трения;
 $M_{\text{э}}, M_y$ и $M_{\text{пр}}$ — моменты соответственно электромагнитной реакции, сопротивления угольного столба и пружины:

$$M_{\text{э}} = F_{\text{э}} l_1 = \frac{4\pi S_B \omega^2 i_B^2 10^{-7}}{\sin \alpha} = \frac{c_1 i_B^2}{\sin \alpha};$$

$$M_y \approx c_2 \alpha; \quad M_{\text{пр}} \approx c_3 \alpha.$$

Линеаризовав эти уравнения, запишем в приращениях:

$$\Delta M_{\text{э}} = \left(\frac{2c_1 i_{B0}}{\sin \alpha_0} \right) \Delta i_B - \left(\frac{c_1 i_{B0}^2}{\sin^2 \alpha_0} \cos \alpha_0 \right) \Delta \alpha = k_1 \Delta i_B - k_2 \Delta \alpha;$$

$$\Delta M_y = c_2 \Delta \alpha; \quad \Delta M_{\text{пр}} = c_3 \Delta \alpha.$$

Подставив значения $\Delta M_{\text{э}}, \Delta M_d$ и $\Delta M_{\text{пр}}$ в исходное уравнение, после преобразований получим в операторной форме

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) \Delta \alpha = k_1' \Delta i_B,$$

$$\text{где } T_2^2 = \frac{J}{k_2 + c_3 - c_2}; \quad T_1 = \frac{h}{k_2 + c_3 - c_2}; \quad k_1' = \frac{k_1}{k_2 + c_3 - c_2}.$$

Пренебрегая саморазогревом угольного столба при малых отклонениях угла поворота якоря, можно считать, что

$$\Delta r_y = c_4 \Delta \alpha.$$

Подставив в уравнение вместо $\Delta \alpha$ значение $\frac{\Delta r_y}{c_4}$, получим:

$$(T_2 p^2 + T_1 p + 1) \Delta r_y = k_1' c_4 \Delta i_B.$$

Передаточная функция

$$W_1(p) = \frac{\Delta r_y}{\Delta i_B} = \frac{k'_1 c_4}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{k_{12}}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

Пример 41. Составить уравнение и определить передаточную функцию исполнительного органа — возбудителя АСУ возбуждением синхронного генератора (рис. 23).

Решение. Возбудитель работает с самовозбуждением. Для обмотки возбуждения по закону Кирхгофа можно записать уравнение

$$u_{B.B} = i_{B.B} (R_{ш} + R_{B.B} + r_y) + L_{B.B} \frac{di_{B.B}}{dt},$$

где $i_{B.B}$, $u_{B.B}$ — ток и напряжение возбуждения возбудителя, равное $u_{B.B} = u_{B.Г}$;

$u_{B.Г}$ — напряжение обмотки возбуждения генератора;

$R_{ш}$, $R_{B.B}$ и r_y — сопротивления соответственно шунта, обмотки возбуждения возбудителя и угольного столба.

Напряжение $u_{B.B}$ и ток $i_{B.B}$ обмотки возбуждения возбудителя меняются вследствие изменения r_y . Значит, в исходном уравнении три переменных: $u_{B.B}$, $i_{B.B}$ и r_y .

После линеаризации уравнения получим:

$$\Delta u_{B.B} = \Delta i_{B.B} (R_{ш} + R_{B.B} + r_{y.0}) + i_{B.B} \Delta r_y + L_{B.B} \frac{di_{B.B}}{dt}.$$

Э. д. с. возбудителя

$$e_B = \frac{pN}{a60} \Phi n = C_B \Phi,$$

где p , N , a и n — соответственно число пар полюсов, активных проводников и параллельных ветвей обмотки якоря и частота вращения возбудителя;

$\Phi = C_{B.B} \omega_{B.B} i_{B.B}$ — магнитный поток;

$C_{B.B}$ — постоянный коэффициент, характеризующий магнитный поток в обмотке;

$\omega_{B.B}$ — число витков обмотки возбуждения возбудителя.

Решив совместно уравнения относительно $\Delta e_{B.B}$ и $i_{B.B}$, получим в приращениях:

$$\Delta e_{B.B} = C_{B.B} C_B \omega_{B.B} \Delta i_{B.B} = k_B \Delta i_{B.B}.$$

Выходная характеристика возбудителя выразится уравнением:

$$e_{\text{в}} = u_{\text{в.г}} + i_{\text{я}} r_{\text{я}}$$

или в приращениях:

$$\begin{aligned}\Delta e_{\text{в}} &= \Delta u_{\text{в.г}} + \Delta i_{\text{я}} r_{\text{я}}; \\ \Delta u_{\text{в.г}} &= \Delta u_{\text{в.в}}, \\ \Delta i_{\text{я}} &= \Delta i_{\text{в.в}} + \frac{\Delta u_{\text{в.г}}}{r_{\text{в}}},\end{aligned}$$

где $r_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения генератора. Решив уравнения совместно, найдем:

$$(1 + T_{\text{н.о}}) \Delta u_{\text{в.г}} = -k_{\text{н.о}} \Delta r_{\text{я}},$$

$$i_{\text{в.в}} \frac{r_{\text{я}} - k_1}{1 + \frac{r_{\text{я}}}{r_{\text{в}}}}$$

где $k_{\text{н.о}} = \frac{i_{\text{в.в}} \frac{r_{\text{я}} - k_1}{1 + \frac{r_{\text{я}}}{r_{\text{в}}}}}{R_{\text{в.в}} + R_{\text{ш}} + r_{\text{я.о}} - \frac{k_{\text{в}} - r_{\text{я}}}{1 + \frac{r_{\text{я}}}{r_{\text{в}}}}}$ — коэффициент усиления исполнительного органа;

$T_{\text{н.о}} = \frac{L_{\text{в.в}}}{R_{\text{в.в}} + R_{\text{ш}} + r_{\text{я.о}} - \frac{k_{\text{в}} - r_{\text{я}}}{1 + \frac{r_{\text{я}}}{r_{\text{в}}}}}$ — постоянная времени исполнительного органа.

Передаточная функция

$$W(p) = \frac{\Delta u_{\text{в.г}}}{\Delta r_{\text{я}}} = \frac{k_{\text{н.о}}}{1 + T_{\text{н.о}} p}.$$

Пример 42. Найти передаточную функцию асинхронного электропривода погружного насоса — исполнительного органа АСУ (рис. 22).

Решение. Асинхронный электродвигатель в АСУ (рис. 22) служит электромеханическим преобразователем. При исследовании подобной АСУ учитывают электромеханический процесс, который выражается уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{к}} - M_{\text{с}},$$

где

$M_{\text{к}} = \frac{m_1 (I_2')^2 r_2'}{s\omega}$ — электромагнитный момент двигателя;

$M_{\text{с}} = M_0 + (M_{\text{сн}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^b$ — момент сопротивления производственного механизма.

Выражения моментов M_k и M_c являются нелинейными функциями, которые можно линеаризовать при помощи ряда Тейлора:

$$\Delta M_k = \left(\frac{2m_1 I'_{20} r'_2}{s\omega_0} \right) \Delta I'_2 - \left(\frac{m_1 (I'_{20})^2 r'_2}{s\omega_0^2} \right) \times \\ \times \Delta \omega = k_{\theta 1} \Delta I'_2 - k_{\theta 2} \Delta \omega,$$

$$\Delta M_c = b (M_{c.н} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^{b-1} \Delta \omega = k_c \Delta \omega,$$

где m_1 — постоянный коэффициент пропорциональности;
 I'_2 и r'_2 — значения тока и сопротивления ротора, приведенные к статору;

s — скольжение асинхронного двигателя;

M_0 — момент сопротивления трения движущихся частей механизма;

$M_{c.н}$ — момент сопротивления при номинальной частоте вращения;

$b=1,2,0$ — коэффициент, характеризующий вид рабочего механизма.

Исходное уравнение можно записать в приращениях, подставив в него значения ΔM_k и ΔM_c :

$$J \frac{d\Delta \omega}{dt} = k_{\theta 1} \Delta I'_2 - k_{\theta 2} \Delta \omega - k_c \Delta \omega$$

или

$$T \frac{d\Delta \omega}{dt} + \Delta \omega = k \Delta I'_2,$$

где $T = \frac{J}{k_{\theta 2} + k_c}$ — постоянная времени электро-механического процесса асинхронного двигателя;

$k = \frac{k_{\theta 1}}{k_{\theta 2} + k_c}$ — коэффициент усиления электродвигателя.

В операторной форме

$$(Tp + 1) \Delta \omega = k \Delta I'_2.$$

Передаточная функция

$$W(p) = \frac{\Delta \omega}{\Delta I'_2} = \frac{k}{Tp + 1}.$$

Пример 43. Составить дифференциальное уравнение зерноуборочного комбайна как управляемого объекта АСУ, изображенной на рисунке 21.

Решение. Зерноуборочный комбайн — сложная динамическая система с тремя аккумуляторами энергии вращающихся масс, из которых первая приведенная масса с параметрами J_1 и ω_1 характеризует двигатель, вторая с J_2 и ω_2 — молотилку и третья с J_3 и ω_3 — ходовую часть комбайна (рис. 34). Для этих масс можно записать [21]:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_d - (M'_{c1} + M''_{c1});$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{п2} - M_{c2};$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_{п3} - M_{c3},$$

где M_d — момент, развиваемый двигателем;
 $M'_{c1}, M''_{c1}, M_{c2}, M_{c3}$ — моменты сопротивления соответствующих частей комбайна;

$M_{п2}, M_{п3}$ — передаваемые моменты, которые являются движущими по отношению к массам с моментами инерции J_2 и J_3 .

Для анализа устойчивости АСУ загрузкой комбайна целесообразно ввести следующие допущения: 1) двигатель и центробежный маятник — безынерционные звенья; 2) потери энергии в клиноременной передаче отсутствуют; 3) подбарабанье имеет жесткое крепление; 4) все внешние возмущающие воздействия, кроме количества поступающей хлебной массы, равны нулю.

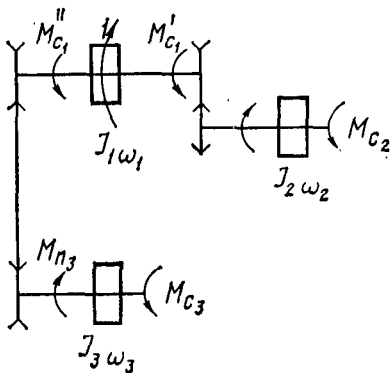


Рис. 34. Принципиальная схема вращающихся масс зерноуборочного комбайна.

В соответствии с допущениями статистические характеристики отдельных элементов можно записать как функции:

$$\begin{aligned}M_d &= f(\lambda; \omega_1); \quad M'_{c1} = i_2 M_{п2}; \\M''_{c1} &= i_3(s) M_{п3}; \\M_{c2} &= f(\omega_2; g_\delta); \quad M_{c3} = f(v_k); \\g_\delta &= k_v v_k; \quad \omega_2 = f(\omega_1; M_{п2}); \\ \omega_3 &= f(\omega_1); \quad H = k_v k_n v_k,\end{aligned}$$

где λ — параметр положения рейки топливного насоса;

$i_2, i_3(s)$ — передаточные отношения, соответственно привода молотилки и ходовой части;

s — параметр положения шкива вариатора;

v_k — скорость комбайна;

g_δ — количество хлебной массы в единицу времени;

H — толщина слоя поступающей хлебной массы.

Эти зависимости нелинейны. Для малых отклонений ΔH можно записать в приращениях:

$$\begin{aligned}\Delta M_d &= \left(\frac{\partial M_d}{\partial \lambda} \right)_0 \Delta \lambda + \left(\frac{\partial M_d}{\partial \omega_1} \right)_0 \Delta \omega_1; \\ \Delta M'_{c1} &= i_2 \Delta M_{п2}; \\ \Delta M''_{c1} &= \left(\frac{\partial M''_{c1}}{\partial s} \right)_0 \Delta s + \left(\frac{\partial M''_{c1}}{\partial M_{п3}} \right)_0 \Delta M_{п3}; \\ \Delta M_{c2} &= \left(\frac{\partial M_{c2}}{\partial \omega_2} \right)_0 \Delta \omega_2 + \left(\frac{\partial M_{c2}}{\partial g_\delta} \right)_0 \Delta g_\delta; \\ \Delta M_{c3} &= \left(\frac{\partial M_{c3}}{\partial v_k} \right)_0 \Delta v_k; \\ \Delta \omega_2 &= \left(\frac{\partial \omega_2}{\partial \omega_1} \right)_0 \Delta \omega_1 + \left(\frac{\partial \omega_2}{\partial M_{п2}} \right)_0 \Delta M_{п2}; \\ \Delta \omega_3 &= \left(\frac{\partial \omega_3}{\partial \omega_1} \right)_0 \Delta \omega_1 + \left(\frac{\partial \omega_3}{\partial s} \right)_0 \Delta s - \left(\frac{\partial \omega_3}{\partial M_{п3}} \right)_0 \Delta M_{п3}; \\ \Delta H &= k_n k_v \Delta v_k.\end{aligned}$$

Удобно независимые переменные представить в относительных единицах:

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= \frac{\Delta \omega_1}{\omega_{p1}}; \quad \Delta x_2 = \frac{\Delta \omega_2}{\omega_{02}}; \quad \Delta x_3 = \frac{\Delta \omega_3}{\omega_{03}}; \\ \Delta x_s &= \frac{\Delta s}{s_0}; \quad \Delta x_m = \frac{\Delta M_{c2}}{M_{c20}}; \quad \Delta x_\lambda = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}; \\ \Delta x_\delta &= \frac{\Delta g_\delta}{g_{\delta 0}}; \quad \Delta x_v = \frac{\Delta v_k}{v_{k0}}; \quad \Delta x_H = \frac{\Delta H}{H_0}.\end{aligned}$$

Если выражения Δx_1 ; Δx_2 ; Δx_3 ; Δx_s ; Δx_m ; Δx_λ ; Δx_δ ; Δx_v ; Δx_n подставить в исходные уравнения, выразив их в операторной форме, то после преобразований получим:

$$\begin{aligned}\Delta x_1 - a_{11} \Delta x_\lambda + a_{12} \Delta x_2 - a_{13} \Delta x_v &= 0; \\ (T_2 p + 1) \Delta x_2 - a_{21} \Delta x_1 + a_{22} \Delta x_m &= 0; \\ (T_3 p + 1) \Delta x_v - a_{31} \Delta x_1 - a_{32} \Delta x_s &= 0; \\ \Delta x_m - a_{41} \Delta x_2 &= 0; \\ \Delta x_\lambda + a_{51} \Delta x_1 &= 0,\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}T_2 &= J_2 \left(\frac{\partial \omega_2}{\partial M_{п2}} \right)_0; \quad T_3 = J_3 \left(\frac{\partial \omega_3}{\partial M_{п3}} \right) d_2. \\ \frac{1}{d_2} &= 1 + \left(\frac{\partial M_{с3}}{\partial v_k} \right)_0 \left(\frac{\partial \omega_3}{\partial M_{п3}} \right)_0 R; \quad v_k = \omega_3 R,\end{aligned}$$

где R — постоянное значение радиуса качения.

$$\begin{aligned}a_{11} &= d_1 \frac{\lambda_0}{\omega_{10}} \left(\frac{\partial M_d}{\partial \lambda} \right)_0; \quad \frac{1}{d_1} = - \left(\frac{\partial M_d}{\partial \omega_1} \right)_0 + \frac{i_2 \left(\frac{\partial \omega_2}{\partial \omega_1} \right)_0}{\left(\frac{\partial \omega_2}{\partial M_{п2}} \right)_0} + \\ &+ \left(\frac{\partial M_{с1}''}{\partial M_{п3}} \right)_0 \frac{\left(\frac{\partial \omega_3}{\partial \omega_1} \right)_0}{\left(\frac{\partial \omega_3}{\partial M_{п3}} \right)_0}; \quad a_{12} = \frac{\omega_{20}}{\omega_{10}} \cdot \frac{i_2 d_1}{\left(\frac{\partial \omega_2}{\partial M_{п2}} \right)_0}; \\ a_{13} &= \frac{v_k}{\omega_{10}} \cdot \frac{d_1 \left(\frac{\partial M_{с1}''}{\partial M_{п3}} \right)_0}{R \left(\frac{\partial \omega_3}{\partial M_{п3}} \right)_0}; \quad a_{21} = \frac{\omega_{10}}{\omega_{20}} \left(\frac{\partial \omega_2}{\partial \omega_1} \right)_0; \\ a_{22} &= \frac{M_{с20}}{\omega_{20}} \left(\frac{\partial M_{с2}}{\partial \omega_2} \right)_0; \quad a_{31} = \frac{\omega_{10}}{v_{k0}} R d_2 \left(\frac{\partial \omega_3}{\partial \omega_1} \right)_0; \\ a_{32} &= \frac{s_0}{v_{k0}} d_2 R \left(\frac{\partial \omega_3}{\partial s} \right)_0; \quad a_{41} = \frac{\omega_{20}}{M_{с20}} \left(\frac{\partial M_{с2}}{\partial \omega_2} \right)_0; \\ a_{51} &= \frac{\omega_{10}}{\lambda_0} \alpha_2 \alpha_4,\end{aligned}$$

где α_2 и α_4 — параметры центробежного маятника.

Приращение толщины слоя хлебной массы во времени

$$\Delta x_n = k_n k_v \Delta x_v (t - \tau_s)$$

или в операторной форме:

$$\Delta x_n(p) = k_n k_v e^{-p\tau_s} \Delta x_v(p),$$

где τ_s — время транспортного запаздывания хлебной массы от режущего аппарата до молотилки.

Решая совместно систему уравнений в операторной форме относительно $\Delta x_n(p)$, $\Delta x_s(p)$, можно определить передаточную функцию управляемого объекта:

$$W(p) = \frac{\Delta x_n(p)}{\Delta x_s(p)} = \frac{(k_{02}p + k_{01}) b_{11}}{T_{02}p^2 + T_{01}p + 1} k_n k_o e^{-p\tau_0},$$

где $k_{01} = \frac{a_{32}C_1}{C_1 - C_3}$; $C_1 = 1 + a_{22}a_{41} - \frac{a_{12}a_{21}}{a_{11}a_{51} + 1}$;

$$k_{02} = \frac{a_{32}T_2}{C_1 - C_3}$$
; $C_2 = 1 - \frac{a_{13}a_{31}}{a_{11}a_{51} + 1}$;

$$T_{01} = \frac{T_3C_4 + T_2C_2}{C_1 - C_3}$$
; $C_3 = \frac{a_{13}a_{31}(1 + a_{22}a_{41})}{1 + a_{11}a_{51}}$;

$$T_{02} = \frac{T_2T_3}{C_1 - C_3}$$
; $C_4 = 1 - \frac{a_{12}a_{21}}{a_{11}a_{51} + 1}$;

$$b_{11} = a_5 \frac{v_{к0}}{q_{01}}; a_5 = QB,$$

где Q — урожайность;

B — ширина захвата жатки;

q_{01} — объемное количество хлебной массы в секунду.

Пример 44. Составить дифференциальное уравнение воспринимającego органа r_0 температуры типа КМТ-4 для АСУ, изображенной на рисунке 25.

Решение. Полупроводниковый термодатчик КМТ-4 можно принять в качестве некоторого однородного элемента с усредненными теплофизическими параметрами. Уравнение теплового баланса для данного датчика в операторной форме

$$(T_d p + 1) \Delta \theta_d = \Delta \theta_n.$$

В электрических датчиках неэлектрических величин выходным служит электрический параметр. В данном случае выходной параметр — сопротивление r_0 .

Характеристика термодатчика [19]

$$r_0 = r_{\infty} e^{\frac{B}{273 + \theta_d}},$$

где B — постоянный коэффициент, зависящий от типа датчика.

После линеаризации

$$\Delta r_0 = - \frac{B}{273 + \theta_{d0}} r_{\infty} e^{\frac{B}{273 + \theta_{d0}}} \Delta \theta_d = k \Delta \theta_d.$$

Подставив вместо $\Delta\theta_d = \frac{1}{k} \Delta r_\theta$, получим окончательно

$$(T_d p + 1) \Delta r_\theta = k \Delta\theta_n.$$

Отсюда передаточная функция

$$W(p) = \frac{k}{T_d p + 1}.$$

Пример 45. Составить дифференциальное уравнение и определить передаточную функцию зерносушилки — управляемого объекта АСУ, изображенной на рисунке 25.

Решение. Для составления дифференциальных уравнений сушилку целесообразно разбить на три элементарных звена: воздухопровод, емкость для зерна и зерновая масса. Воздуховод от смесительной заслонки до сушилки включительно можно считать звеном чистого запаздывания. На его выходе расход смешанного теплого воздуха выразится уравнением

$$Q_T = k_B (Q_X + Q_G) (t - \tau_B),$$

где k_B — коэффициент передачи воздуха от входа к выходу воздухопровода (к.п.д.);

Q_X и Q_G — расход холодного и горячего воздуха;

$\tau_B = \frac{l_B}{v_B}$ — время чистого запаздывания появления Q_T

воздуха на входе воздухопровода;

l_B и v_B — длина воздухопровода и скорость движения воздуха в нем.

Для двух последних звеньев операторное уравнение

$$[T_K T_Z p^2 + (T_K + T_Z) p + 1] \Delta\theta_Z = k_{ЗС} \Delta Q_T,$$

T_K — постоянная времени сушильной камеры;

T_Z — постоянная времени теплопоглощения зерновой массы;

$\Delta\theta_Z$ — приращение температуры зерновой массы;

$k_{ЗС}$ — коэффициент передачи зерносушилки.

Первое уравнение при помощи преобразования Лапласа можно представить в виде

$$Q_T(p) = \int_0^\infty k_B (Q_X + Q_G) (t - \tau) e^{-pt} dt = k_B e^{-\tau p} (Q_X + Q_G)(p).$$

Отсюда передаточная функция воздуховода

$$W(p)_в = \frac{Q_т(p)}{(Q_к + Q_г)(p)} = k_в e^{-\tau p}.$$

Передаточную функцию двух других звеньев определяют из второго уравнения:

$$W(p)_{зс} = \frac{\Delta\theta_з}{\Delta Q_г} = \frac{k_{зс}}{T_к T_з p^2 + (T_к + T_з)p + 1}.$$

Передаточная функция всего объекта

$$W(p) = \frac{\Delta\theta_з}{\Delta(Q_к + Q_г)} = W(p)_в W(p)_{зс} = \frac{k_{зс} k_в e^{-\tau p}}{T_к T_з p^2 + (T_к + T_з)p + 1}.$$

Пример 46. Определить дифференциальное уравнение и передаточную функцию инкубационной камеры — управляемого объекта АСУ температурой, изображенной на рисунке 27.

Решение. Инкубационную камеру можно представить как двухемкостный объект, из которых одна — собственно емкость камеры, а другая — емкость массы помещенных в камеру яиц.

Для собственно камеры можно написать

$$C_к \frac{d\theta_к}{dt} = Q_{пр} - Q_{от}; \quad Q_{от} = \rho_к \theta_к,$$

где $C_к$, $\theta_к$, $\rho_к$ — соответственно теплоемкость, температура и коэффициент самовыравнивания камеры.

Для объема яиц можно записать

$$V_я \gamma_я C_я \frac{d\theta_я}{dt} = \alpha_я S_я (\theta_к - \theta_я),$$

где $V_я$, $\gamma_я$, $C_я$, $\theta_я$, $\alpha_я$, $S_я$ — объем, плотность, теплоемкость, температура, теплоотдача и поверхность яиц.

Решая совместно оба уравнения относительно $\theta_я$ и $Q_{пр}$, окончательно получим в операторной форме:

$$[T_я T_к p^2 + (T_я + T_к)p + 1] \theta_я = k Q_{пр}.$$

Передаточная функция

$$W(p) = \frac{\theta_я}{Q_{пр}} = \frac{k}{T_я T_к p^2 + (T_я + T_к)p + 1}.$$

Пример 47. Составить дифференциальное уравнение и найти передаточную функцию линейной части воспринимающего органа температуры — ртутного контактного термометра.

Решение. По динамическим свойствам контактный ртутный термометр можно представить как элемент с двумя емкостями: первая — стеклянный баллончик, вторая — объем ртути в баллончике. Для каждой емкости можно написать уравнение теплового баланса:

$$v_1 \rho_1 c_1 \frac{d\Delta\theta_1}{dt} = \alpha_1 s_1 (\Delta\theta_n - \Delta\theta_1)$$

и

$$v_2 \rho_2 c_2 \frac{d\Delta\theta_2}{dt} = \alpha_2 s_2 (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2),$$

где $\Delta\theta_n$, $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$ — приращения температуры соответственно наружного воздуха, стеклянной стенки и ртути;

v_1 , v_2 , ρ_1 , ρ_2 , c_1 , c_2 — соответственно объем, плотность, теплоемкость стенок стеклянного баллончика и объема ртути;

s_1 и s_2 — поверхности объема стеклянной стенки и объема ртути;

α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи от воздуха к стеклянному баллончику и от стеклянного баллончика к ртути.

Преобразовав оба уравнения, найдем:

$$T_1 \frac{d\Delta\theta_1}{dt} + \Delta\theta_1 = \Delta\theta_n;$$

$$T_2 \frac{d\Delta\theta_2}{dt} + \Delta\theta_2 = \Delta\theta_1,$$

где $T_1 = \frac{v_1 \rho_1 c_1}{\alpha_1 s_1}$; $T_2 = \frac{v_2 \rho_2 c_2}{\alpha_2 s_2}$.

В операторной форме

$$(T_1 p + 1) \Delta\theta_1 = \Delta\theta_n,$$

$$(T_2 p + 1) \Delta\theta_2 = \Delta\theta_{ст}.$$

Решая уравнения совместно относительно $\Delta\theta_n$ и $\Delta\theta_2$, получим в окончательном виде

$$[T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2) p + 1] \Delta\theta_2 = \Delta\theta_n.$$

Отсюда

$$W(p) = \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_n} = \frac{1}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2) p + 1}.$$

Пример 48. Найти передаточную функцию замкнутой АСУ частотой вращения двигателя внутреннего сгорания (ДВС), которая изображена на рисунке 26.

Решение. Структурная схема АСУ показана на рисунке 32. Передаточные функции отдельных звеньев определены в примерах 31, 32, 33, 34.

Передаточная функция ДВС определена в примере 33, в соответствии со структурной схемой на рисунке 32 ее можно записать:

$$W_d(p) = \frac{W_3(p) W_0(p)}{1 + W_3(p) W_0(p) W_{0.c2}(p)} = \frac{k_d}{T_d p + 1},$$

где можно принять $k_d = 1,25$ и $T_d = 1,6$ с.

Передаточная функция сервомотора с золотниковым устройством из примера 32 соответствует в структурной схеме на рисунке 32:

$$W(p)_c = W(p)_1 W(p)_2 = \frac{1}{T_c p},$$

где можно принять $T_c = 0,5$ с.

Передаточная функция центробежного маятника (пример 34)

$$W(p)_{0.c} = \frac{k_m}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где $k_m = 7$, $T_2 = 0,095$ с, $T_1 = 0,06$ с.

Передаточная функция изодромного устройства обратной связи

$$W(p)_{10.c} = \frac{k T_k p}{T_k p + 1},$$

где $k = 0,2$, $T_k = 0,002$ с.

В соответствии с решением примера 30, введя некоторые упрощения, можно записать передаточную функцию по выходному параметру замкнутой АСУ

$$W(p)_3 = \frac{y}{x} = \frac{W(p)_c W(p)_d}{1 + W(p)_c W(p)_{10.c} + W(p)_c W(p)_d W(p)_{0.c}}.$$

Раскрыв в уравнении значение передаточных функций звеньев, получим

$$W(p)_3 = \frac{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3}{a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5},$$

где $b_0 = k_d T_2^2 T_k = 2,27 \cdot 10^{-5}$; $b_1 = (T_2^2 + T_1 T_k) k_d = 0,0114$;

$$\begin{aligned}
b_2 &= k_d(T_1 + T_k) = 0,078; b_3 = k_d = 1,25; a_0 = T_c T_d T_k T_2^2 = \\
&= 1,44 \cdot 10^{-5}; a_1 = (T_c T_d T_2^2 + T_c T_k T_2^2 + T_1 T_c T_d T_k + \\
&+ k T_d T_k T_2^2) = 7,3 \cdot 10^{-3}; a_2 = (T_c T_2^2 + T_1 T_c T_d + T_1 T_c T_k + \\
&+ T_k T_c T_d + k T_k T_2^2 + k T_k T_d T_1) = 0,053; \\
a_3 &= (T_1 T_c + T_c T_d + T_c T_k + k T_k T_1 + k T_k T_d) = 0,127; \\
a_4 &= (T_c + k T_k + k_d k_m T_k + T_d + T_1) = 0,52; a_5 = k_m k_d = 8,8.
\end{aligned}$$

Отсюда передаточная функция АСУ

$$W(p)_3 = \frac{2,27 \cdot 10^{-5} p^3 + 0,0114 p^2 + 0,078 p + 1,25}{1,44 \cdot 10^{-5} p^5 + 7,3 \cdot 10^{-3} p^4 + 0,053 p^3 + 0,127 p^2 + 0,52 p + 8,8}.$$

Пример 49. Найти передаточную функцию замкнутой АСУ возбуждения генератора, изображенной на рисунке 23.

Решение. Структурная схема АСУ показана на рисунке 29. Общее выражение ее передаточной функции определено в примере 27:

$$W(p)_3 = \frac{W_1(p) W_2(p) W_0(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_{10.c}(p) + W_1(p) W_2(p) \cdot W_0(p) W_{0.c}(p)}.$$

Передаточные функции отдельных звеньев выведены в примерах 37÷41.

В передаточных функциях синхронного генератора $W_0(p)$ (пример 37) можно принять $k_r = 1,5$, $T'_d = 0,02$ с, воспринимающего органа $W_{0.c}(p)$ (пример 38) $k_b = 0,009$, $T_b = 0,08$ с, дифференцирующего трансформатора обратной связи $W_{10.c}(p)$ (пример 39) $k_1 = 0,02$, $T'_1 = 0,26$ с, $T_{m2} = 0,1$ с, $T_2'^2 = 0,13$ с, усилительно-преобразующего элемента $W_1(p)$ (пример 40), $k_{12} = 12$, $T_2 = 0,005$ с, $T_1 = 0,2$ с, исполнительного органа $W_2(p)$ (пример 41) $k_{н.о} = 1,8$, $T_{н.о} = 0,01$ с. Подставив эти данные в основные уравнения, получим:

$$\begin{aligned}
W(p)_3 &= \frac{k_r k_{н.о} k_{12}}{(T'_d p + 1)(T_{н.о} p + 1)(T_2'^2 p^2 + T_1 p + 1)} = \\
&= \frac{1 + \frac{k_{12} k_{н.о} k_1 T_{m2} p}{(T_2'^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_{н.о} p + 1)(T_2'^2 p^2 + T_1 p + 1)}}{1 + \frac{k_r k_{н.о} k_{12} k_b}{(T'_d p + 1)(T_{н.о} p + 1)(T_2'^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_b p + 1)}} + \\
&= \frac{k_r k_{н.о} k_{12} (T_2'^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_b p + 1)}{(T'_d p + 1)(T_{н.о} p + 1)(T_b p + 1)(T_2'^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_2'^2 p^2 + T_1 p + 1) +} \\
&+ k_{12} k_{н.о} k_1 T_{m2} p (T'_d p + 1)(T_b p + 1) + (T_2'^2 p^2 + T_1 p + 1) k_r k_{н.о} k_{12} k_b}.
\end{aligned}$$

После окончательных преобразований

$$W(p)_3 = \frac{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3}{a_0 p^7 + a_1 p^6 + a_2 p^5 + a_3 p^4 + a_4 p^3 + a_5 p^2 + a_6 p + a_7},$$

где

$$\begin{aligned} b_0 &= T_2' T_B k_c = 0,34; \quad b_1 = (T_2'^2 + T_1' T_B) k_c = 4,86; \\ b_2 &= (T_B + T_1') k_c = 11,1; \quad b_3 = k_c = k_T k_{H.O} k_{12} = 32,4; \\ a_0 &= T_d' T_{H.O} T_B T_2^2 T_2'^2 = 1,03 \cdot 10^{-8}; \\ a_1 &= [T_d' T_{H.O} T_B (T_2^2 T_1' + T_2'^2 T_1) + T_B (T_d' + T_{H.O}) T_2^2 T_2'^2] = 2 \cdot 10^{-6}; \\ a_2 &= \{T_d' T_{H.O} T_B (T_2'^2 + T_2^2 + T_1 T_1') + \\ &+ [T_d' T_{H.O} + (T_d' + T_{H.O}) T_B] (T_2^2 T_1' + T_2'^2 T_1) + (T_d' + T_{H.O} + \\ &+ T_B) \times T_2^2 T_2'^2\} = 2,5 \cdot 10^{-3}; \quad a_3 = \{T_d' T_{H.O} T_B (T_1 + T_1') + \\ &+ [T_d' T_{H.O} + (T_d' + T_{H.O}) T_B] (T_2'^2 + T_2^2 + T_1 T_1') + \\ &+ (T_d' + T_{H.O} + T_B) (T_2^2 T_1' + T_2'^2 T_1) + T_2^2 T_2'^2\} = 4 \cdot 10^{-3}; \\ a_4 &= \{T_d' T_{H.O} T_B + [T_d' T_{H.O} + (T_d' + T_{H.O}) T_B] (T_1 + T_1') + \\ &+ (T_d' + T_{H.O} + T_B) (T_2'^2 + T_2^2 + T_1 T_1') + (T_2^2 T_1' + T_2'^2 T_1) + \\ &+ k_{12} k_{H.O} k_1 T_{M2} T_d' T_B\} = 0,047; \\ a_5 &= [T_d' T_{H.O} + (T_d' + T_{H.O}) T_B + T_2'^2 + T_2^2 + T_1 T_1' + \\ &+ (T_d' + T_{H.O} + T_B) (T_1 + T_1') + k_{12} k_{H.O} k_1 T_{M2} (T_d' + T_B) + \\ &+ k_c k_B T_2'^2] = 0,11; \\ a_6 &= T_d' + T_{H.O} + T_B + T_1 + T_1' + k_{12} k_{H.O} k_1 T_{M2} + T_1' k_c k_B = 0,69; \\ a_7 &= k_c k_B = 0,29. \end{aligned}$$

При числовых значениях коэффициентов передаточная функция будет выглядеть так:

$$W(p)_3 = \frac{0,34 p^3 + 4,86 p^2 + 11,1 p + 32,4}{1,03 \cdot 10^{-8} p^7 + 2 \cdot 10^{-6} p^6 + 2,5 \cdot 10^{-3} p^5 + 4 \cdot 10^{-3} p^4 + 0,047 p^3 + 0,11 p^2 + 0,69 p + 0,29}.$$

§ 4. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ АМПЛИТУДНЫХ, ФАЗОВЫХ ЧАСТОТНЫХ, ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ И АМПЛИТУДНО-ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ГОДОГРАФОВ

Пример 50. Построить амплитудно-фазо-частотную и логарифмическую амплитудную характеристику звена, если его передаточная функция $W(p) = \frac{k}{T_p + 1}$, при $k = 1,25$ и $T = 1,6$ с.

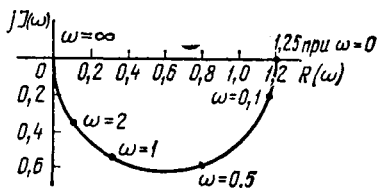


Рис. 35. Годограф инерционного звена.

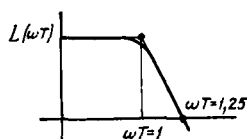


Рис. 36. Логарифмическая амплитудная характеристика инерционного звена.

Решение. Амплитудно-фазо-частотную характеристику получают в результате подстановки $p = j\omega$ в выражение $W(p)$:

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{k}{T(j\omega) + 1} = \frac{k}{1 + T^2\omega^2} - j \frac{kT\omega}{1 + T^2\omega^2} = \\ &= \frac{1,25}{1 + 2,56\omega^2} - j \frac{2\omega}{1 + 2,56\omega^2} = R(\omega) - jJ(\omega). \end{aligned}$$

Придавая значения в диапазоне $0 \leq \omega \leq \infty$, получим такую зависимость

ω	0	0,1	0,5	1	2	10	∞
$R(\omega)$	1,25	1,2	0,74	0,35	0,11	0,005	0
$J(\omega)$	0	-0,2	-0,61	-0,57	-0,35	-0,07	0

По данным таблицы строим годограф (рис. 35). Логарифмическая амплитудная характеристика

$$\begin{aligned} L(\omega) &= 20 \lg |W(j\omega)| = 20 \lg \frac{1,25}{\sqrt{1,25 + 2,56\omega^2}} = \\ &= 20 [\lg 1,25 - 0,5 \lg (1,25 + 2,56\omega^2)]. \end{aligned}$$

Данную характеристику удобно строить в масштабе $L(\omega T)$; ωT . В этом случае асимптотическая ЛАХ, построенная на рисунке 36, имеет излом в точке $\omega T = 1$. Слева от излома она горизонтальна (значение $20 \lg 1,25$), справа — наклонна. Точку пересечения ЛАХ с осью частот определяют из условия

$$L(\omega_c) \approx 20 \lg \frac{k}{\omega_c T_c} = 0,$$

где

$$T\omega_c = k = 1,25.$$

Пример 51. Определить логарифмическую амплитудную характеристику и построить годограф амплитудно-фазо-

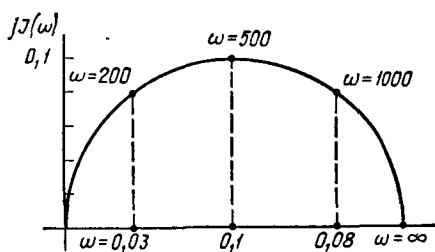


Рис. 37. Годограф дифференцирующего звена.

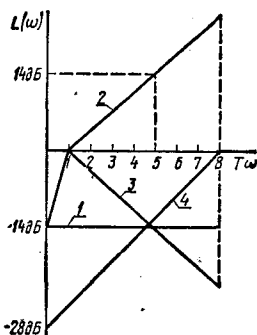


Рис. 38. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика дифференцирующего звена.

частотной характеристики для дифференцирующего звена

$$W(p) = \frac{kTp}{Tp+1} \quad \text{при } k=0,2; T=0,002 \text{ с.}$$

Решение. Амплитудно-фазо-частотную характеристику получают путем подстановки в функцию $W(p)$ выражения $p = j\omega$:

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{kT(j\omega)}{T(j\omega)+1} = \frac{kT^2\omega^2}{1+T^2\omega^2} + j \frac{kT\omega}{1+T^2\omega^2} = R(\omega) + jJ(\omega) = \\ &= \frac{8 \cdot 10^{-7}\omega^2}{1+4 \cdot 10^{-6}\omega^2} + j \frac{4 \cdot 10^{-4}\omega}{1+4 \cdot 10^{-6}\omega^2}. \end{aligned}$$

Придавая ω значения в диапазоне $0 \leq \omega \leq \infty$, можно вычислить $R(\omega)$ и $J(\omega)$:

ω	0	100	200	500	1000	2000	∞
$R(\omega)$	0	$7,7 \cdot 10^3$	0,028	0,1	0,16	0,19	0,2
$J(\omega)$	0	0,4	0,07	0,1	0,08	0,047	0

Годограф, построенный в комплексной плоскости $R(\omega)$, $J(\omega)$ изображен на рисунке 37.

Логарифмическую амплитудную характеристику легко получить из выражения

$$W(j\omega) = kT(j\omega) \frac{1}{T(j\omega)+1}.$$

$$\begin{aligned} \text{Отсюда} \quad L(\omega) &= 20 \lg |W(j\omega)| = 20 \lg k + 20 \lg |Tj\omega| - \\ &- 20 \lg |Tj\omega + 1| = 20 \lg 0,2 + 20 \lg |0,002\omega| - \\ &- 20 \lg \sqrt{1 + 4 \cdot 10^{-6}\omega^2}. \end{aligned}$$

Логарифмическая амплитудная характеристика изображена на рисунке 38. Ее строят для каждого слагаемого (1, 2, 3) в отдельности, а затем графики суммируют и находят результирующий график (4).

Пример 52. Построить фазовую частотную характеристику звена второго порядка, имеющего передаточную функцию

$$W(p) = \frac{k}{T_2^2 p^2 + \varepsilon T_2 p + 1} \text{ при } k=7, T_2=0,095 \text{ с, } \varepsilon=0,63.$$

Решение. Амплитудно-фазо-частотную характеристику получают, вводя в передаточную функцию $p = j\omega$

$$W(j\omega) = \frac{k}{(1 - T_2^2 \omega^2) + j0,63 T_2 \omega} = k \frac{1 - T_2^2 \omega^2}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + 0,4 T_2^2 \omega^2} - jk \frac{0,63 T_2 \omega}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + 0,4 T_2^2 \omega^2}.$$

Отсюда фазо-частотная характеристика

$$\varphi = \arctg \frac{0,63 T_2 \omega}{1 - (T_2 \omega)^2}.$$

График $\varphi(\omega)$ построен на рисунке 39.

Пример 53. Построить логарифмическую амплитудную характеристику из примера 52.

Решение. Искомая ЛАХ

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + 0,4 T_2^2 \omega^2}} = \\ = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + 0,4 T_2^2 \omega^2}.$$

График $L(\omega)$ изображен на рисунке 40.

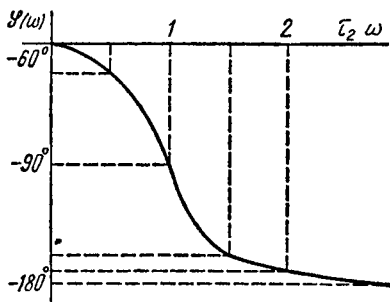


Рис. 39. Фазо-частотная характеристика колебательного звена.

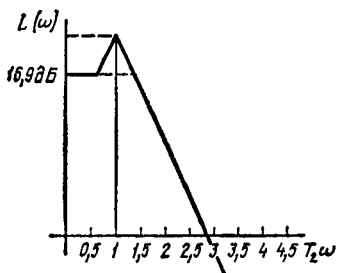


Рис. 40. Логарифмическая амплитудная характеристика центробежного маятника.

Глава IV

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ



§ 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Основное из динамических свойств системы управления — ее **устойчивость**, под которой понимают способность системы за счет своих внутренних сил возвращаться к состоянию установившегося равновесия после устранения возмущения, вызвавшего нарушение равновесия.

Систему называют **неустойчивой**, если при сколь угодно малых отклонениях от установившегося равновесия она не может возвратиться к этому состоянию, а непрерывно удаляется от него или совершает около него недопустимо большие колебания. Подобные системы неработоспособны.

Для математического определения условий устойчивости системы предложен ряд методов анализа линейных дифференциальных уравнений, которые применительно к системам автоматического управления называются **критериями**.

Различают алгебраические и частотные критерии. *Алгебраические критерии* применяют для исследования систем, процессы в которых описываются уравнениями не выше пятого-шестого порядка, а *частотные критерии*, которые относятся к графо-аналитическим — для исследования систем, характеризуемых уравнениями любого порядка.

Из алгебраических критериев наибольшее практическое применение получили критерии Рауса и Гурвица.

Критерий Рауса представляет собой последовательность математических операций, осуществляемых при решении задачи, и является весьма простым методом анализа характеристического уравнения системы

$$G(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0.$$

Уравнение записывают так, что значение $a_0 > 0$. Затем составляют таблицу из коэффициентов исходного характеристического уравнения. Для этого выписывают строку с четными, а затем под ней — строку с нечетными индексами коэффициентов характеристического уравнения. Остальные коэффициенты в нижестоящих строках выражают через коэффициенты вышестоящих строк. Всего в таблице будет $n+1$ строк:

a_0	a_2	a_4	...
a_1	a_3	a_5	...
b_0	b_2	b_4	...
b_1	b_3	b_5	...
c_0	c_2	c_4	...
.	.	.	...
.	.	.	...
.	.	.	...

где

$$b_0 = \frac{a_2 a_1 - a_0 a_3}{a_1}; \quad b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1};$$

$$b_1 = \frac{a_3 b_0 - a_1 b_2}{b_0} \text{ и т. д.}$$

Чаще всего эти коэффициенты записывают следующим образом:

$$b_0 = a_2 - \frac{a_0}{a_1} a_3 = a_2 - \lambda_1 a_3;$$

$$b_2 = a_4 - \lambda_1 a_5 \text{ и т. д. } b_1 = a_3 - \frac{a_1}{b_0} b_2 = a_3 - \lambda_2 b_2;$$

$$b_3 = a_5 - \lambda_2 b_4 \text{ и т. д.}$$

Критерий устойчивости Рауса формулируется так: *система устойчива, если все элементы первого столбца таблицы Рауса имеют одинаковые знаки, совпадающие со знаком коэффициента a_0 . То есть если $a_0 > 0$, то $a_1 > 0$, $b_0 > 0$, $b_1 > 0$ и т. д. Если же какой-то член первого столбца равен нулю, то система находится на границе устойчивости.*

Критерий Гурвица, подобно критерию Рауса, основан на определенной табличной записи коэффициентов характеристического уравнения и формулирует условие устойчивости в зависимости от знаков некоторых определителей.

Определитель Гурвица записывают следующим образом. Все коэффициенты от a_1 до a_n располагают по главной диагонали в порядке возрастания индексов. Вверх от главной диагонали в столбцах записывают коэффициенты характеристического уравнения с последовательно возрастающими, а вниз — с убывающими индексами. На месте коэффициентов, индексы которых больше, чем n , и меньше, чем нуль, проставляют нули:

$$\Delta n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ . & . & . & \dots & 0 \\ 0 & . & . & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

Критерий устойчивости Гурвица гласит: *система устойчива тогда и только тогда, когда все диагональные миноры определителя больше нуля, то есть совпадают со знаком первого коэффициента a_0 :*

$$\Delta_0 = a_0 > 0; \quad \Delta_1 = a_1 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0; \quad \dots \quad \Delta_n > 0.$$

В практических расчетах устойчивость систем определяют по критерию устойчивости Гурвица следующим образом.

Для устойчивых систем характеристические уравнения первого и второго порядка должны иметь положительные коэффициенты: $a_0 > 0$; $a_1 > 0$ и $a_2 > 0$. Применительно к уравнениям более высоких порядков, кроме положительных значений коэффициентов $a_0 > 0$; $a_1 > 0$; ... $a_{n-1} > 0$ и $a_n > 0$, необходимо соблюдение следующих соотношений.

Для уравнения $G(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3$ условие устойчивости

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

Для уравнения $G(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4$ условие устойчивости

$$\Delta_3 = a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_4 a_1^2 > 0.$$

Для уравнения $G(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5$ условия устойчивости

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0;$$

$$\Delta_4 = (a_1 a_2 - a_0 a_3) (a_3 a_4 - a_2 a_5) - (a_1 a_4 - a_0 a_5)^2 > 0.$$

Для уравнения $G(p) = a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6$ условия устойчивости

$$\Delta_3 = a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1 (a_1 a_4 - a_0 a_5) > 0;$$

$$\Delta_5 = (a_1 a_2 - a_0 a_3) [a_5 (a_3 a_4 - a_2 a_5) + a_6 (2a_1 a_5 - a_3^2)] + (a_1 a_4 - a_0 a_5) [a_1 a_3 a_6 - a_5 (a_1 a_4 - a_0 a_5)] - a_1^3 a_6^2 > 0.$$

К преимуществам частотных критериев, в частности критериев Михайлова и Найквиста, следует отнести прежде всего их наглядность и возможность экспериментального определения частотных характеристик отдельных звеньев системы, когда для них трудно составить дифференциальные уравнения.

Критерий Михайлова. Характеристическое уравнение любой степени можно представить в виде комплексного полинома

$$G(j\omega) = R(\omega) + jJ(\omega),$$

где $G(j\omega)$ — вектор, амплитуда и фаза которого являются функциями частоты ω .

А. В. Михайлов доказал, что для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы при изменении угловой частоты ω от 0 до ∞ годо-

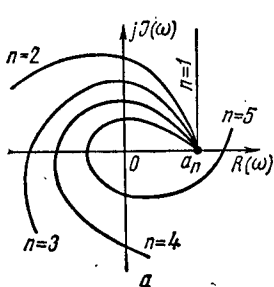


Рис. 41. Годограф Михайлова:
а — для устойчивых систем.

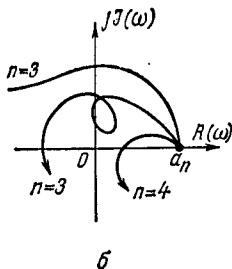
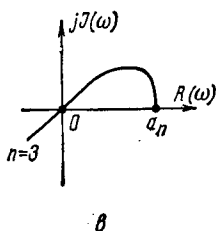


Рис. 42. Годографы Михайлова:
б — для неустойчивых систем; в — для систем, находящихся на границе устойчивости.



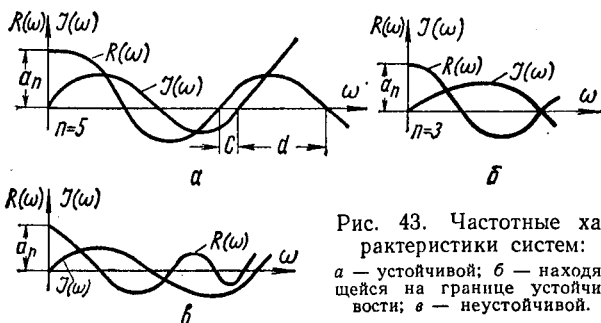


Рис. 43. Частотные характеристики систем:
а — устойчивой; б — находящейся на границе устойчивости; в — неустойчивой.

граф, описываемый концом вектора $G(j\omega)$ на плоскости комплексного переменного, начинался на вещественной положительной полуоси и, вращаясь только против часовой стрелки, нигде не обращаясь в нуль, проходил последовательно число квадрантов, которое равно степени n характеристического уравнения, повернувшись на угол $n \frac{\pi}{2}$ (рис. 41, а).

При немонотонном изменении годографа система неустойчива (рис. 42, б, для $n=3$). Система находится в нейтральном состоянии, если годограф при некотором значении ω проходит через начало осей координат плоскости комплексного переменного $G(j\omega)$ (рис. 42, в).

Следствие из критерия Михайлова. По мере вращения вектора $G(j\omega)$ для устойчивой системы вещественная и мнимая оси пересекаются годографом Михайлова поочередно. Каждому пересечению вещественной оси соответствует корень полинома $J(\omega)$, а каждому пересечению мнимой оси — корень полинома $R(\omega)$. Следовательно, система устойчива тогда и только тогда, когда корни полиномов $J(\omega)$ и $R(\omega)$ с изменением ω от 0 до ∞ чередуются и равны вещественным числам. Общее число корней этих полиномов должно равняться порядку уравнения n . На рисунке 43 показаны графики частотных характеристик $R(\omega)$ и $J(\omega)$ с чередованием корней (а), с совпадением корней (б) и при отсутствии чередования корней (в). В первом случае система устойчива, во втором — на границе устойчивости, а в третьем — неустойчива.

Критерий Найквиста называют также амплитудно-фазовым критерием. В этом случае об устойчивости замкнутой системы судят по амплитудно-фазо-частотной характеристике $W(j\omega)$ разомкнутой системы.

При анализе замкнутой системы по ее поведению в разомкнутом состоянии могут возникнуть два варианта: 1) система в разомкнутом состоянии устойчива (или нейтрально устойчива); 2) система в разомкнутом состоянии неустойчива. В первом случае критерий Найквиста формулируется следующим образом: автоматическая система управления, устойчивая в разомкнутом состоянии, будет устойчивой и в замкнутом состоянии, если амплитудно-фазо-частотная характеристика $W(j\omega)$ этой системы в разомкнутом состоянии не охватывает точку с координатами — 1; $j0$ (рис. 44, а, б, в). Система, соответствующая характеристике на рисунке 44, г, неустойчива.

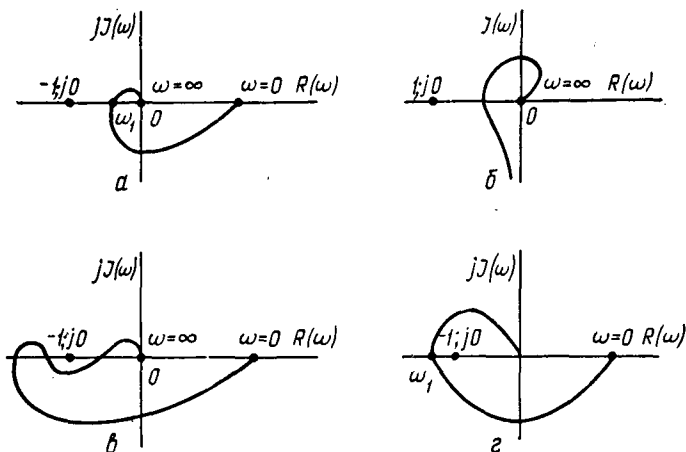


Рис. 44. Амплитудно-фазо-частотные характеристики:
а, б, в — устойчивых систем; г — неустойчивой системы.

Для второго случая критерий Найквиста выглядит так: *автоматическая система управления, неустойчивая в разомкнутом состоянии, будет устойчива в замкнутом состоянии, если ее амплитудно-фазо-частотная характеристика $W(j\omega)$ в разомкнутом состоянии при изменении частоты от 0 до ∞ охватывает точку с координатами $-1; j0$ в положительном (против часовой стрелки) направлении q раз, где q — число корней с положительной вещественной частью характеристического уравнения $G(p)=0$ разомкнутой системы.* На рисунке 45 показана амплитудно-фазовая характеристика системы, неустойчивой в разомкнутом, но устойчивой в замкнутом состоянии при $q=2$.

В практических расчетах по частотным критериям высчитывают число переходов годографа через участок $-\infty -1$ вещественной оси. Если разность между числом переходов сверху вниз и числом переходов снизу вверх равна $q/2$, то замкнутая система будет устойчивой.

Если годограф проходит через точку с координатами $-1, j0$, то система находится на границе устойчивости.

В ряде случаев удобнее пользоваться *логарифмическим критерием устойчивости*, который представляет собой интерпретацию критерия Найквиста в логарифмической форме.

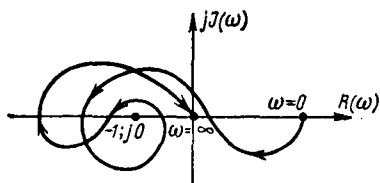


Рис. 45. Амплитудно-фазо-частотная характеристика системы, неустойчивой в разомкнутом состоянии.

§ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ АСУ ПО АЛГЕБРАИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ

Пример 54. Определить по критерию Рауса, устойчива ли система, характеристическое уравнение которой $14p^4 + 7p^3 + 8p^2 + 3p + 1 = 0$.

Решение. Составим таблицу с числом строк $n + 1 = 5$:

$$\begin{array}{c|ccc} a_0 & a_2 & a_4 & \\ \hline a_1 & a_3 & a_5 & \\ b_0 & b_2 & b_4 & \\ b_1 & b_3 & b_5 & \\ c_0 & c_2 & c_4 & \end{array} = \begin{array}{ccc} 14 & 8 & 1 \\ 7 & 3 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ -0,5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{array}$$

в которой

$$b_0 = 8 - \frac{14}{7} \cdot 3 = 2; \quad b_2 = 1 - \frac{14}{7} \cdot 0 = 1;$$

$$b_1 = 3 - \frac{7}{2} \cdot 1 = -0,5; \quad b_3 = 0 - \frac{7}{2} \cdot 0 = 0;$$

$$c_0 = b_2 - \frac{b_0}{b_1} \cdot b_3 = 1.$$

Согласно условию устойчивости Рауса, можно сделать вывод: данная система неустойчива, так как один из коэффициентов первого столбца отрицателен ($b_1 < 0$).

Пример 55. Определить по критерию Рауса, устойчива ли система, характеристическое уравнение которой $0,65 \cdot 10^{-7} p^6 + 3,34 \cdot 10^{-5} p^5 + 0,024 p^4 + 0,45 p^3 + 1,08 p^2 + 1,06 p + 1 = 0$, где $a_0 = 0,65 \cdot 10^{-7}$; $a_1 = 3,34 \cdot 10^{-5}$; $a_2 = 0,024$; $a_3 = 0,45$; $a_4 = 1,08$; $a_5 = 1,06$; $a_6 = 1$.

Решение. Составим таблицу Рауса с числом строк $n + 1 = 7$:

$$\begin{array}{c|cccc} a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \\ \hline a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \\ b_0 & b_2 & b_4 & b_6 & \\ b_1 & b_3 & b_5 & b_7 & \\ c_0 & c_2 & c_4 & c_6 & \\ c_1 & c_3 & c_5 & c_7 & \\ d_0 & d_2 & d_4 & d_6 & \end{array} = \begin{array}{cccc} 0,65 \cdot 10^{-7} & 0,024 & 1,08 & 1 \\ 3,34 \cdot 10^{-5} & 0,45 & 1,06 & 0 \\ 0,023 & 1,078 & 1 & 0 \\ 0,448 & 1,058 & 0 & 0 \\ 1,024 & 1 & 0 & 0 \\ 0,623 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Определяем составляющие члены таблицы

$$b_0 = 0,024 - \frac{0,65 \cdot 10^{-7}}{3,34 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,45 = 0,024 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,45 \approx 0,023;$$

$$b_2 = 1,08 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,06 \approx 1,078; \quad b_4 = 1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0 = 1;$$

$$b_1 = 0,45 - \frac{3,34 \cdot 10^{-5}}{0,023} \cdot 1,078 = 0,45 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,078 \approx 0,448;$$

$$b_3 = 1,06 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 1,058;$$

$$c_0 = 1,078 - \frac{0,023}{0,448} \cdot 1,058 = 1,024; \quad c_2 = b_4 = 1;$$

$$c_1 = b_3 - \frac{b_1}{c_0} \cdot c_2 = 1,058 - \frac{0,448}{1,024} \cdot 1 = 0,623;$$

$$d_0 = c_2 - \frac{c_0}{c_1} \cdot c_3 = 1 - \frac{1,024}{0,623} \cdot 0 = 1.$$

Следовательно, система устойчива, так как все коэффициенты первого столбца больше нуля.

Пример 56. Определить по критерию Рауса, устойчива ли система, характеристическое уравнение которой

$$10p^4 + 5p^3 + 6p^2 + 2p = 0.$$

Решение. Представив это уравнение в форме

$$(10p^3 + 5p^2 + 6p + 2)p = 0,$$

можно видеть, что один из корней уравнения равен нулю. Следовательно, система находится на границе устойчивости, если будет выполняться условие Рауса для полинома

$$10p^3 + 5p^2 + 6p + 2 = 0,$$

где $a_0 = 10$; $a_1 = 5$; $a_2 = 6$; $a_3 = 2$.

Составляем таблицу Рауса:

$$\begin{vmatrix} a_0 & a_2 \\ a_1 & a_3 \\ b_0 & b_2 \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 10 & 6 \\ 5 & 2 \\ 4 & 0 \\ 2 & 0 \end{vmatrix}$$

из которой следует, что условие Рауса выполнено, следовательно, система находится на границе устойчивости, так как один корень исходного уравнения $p = 0$.

Пример 57. Определить, при каких значениях A система будет устойчивой, если ее характеристическое уравнение $p^4 + 6p^3 + 5p^2 + 3p + A = 0$, где $a_3 = 1$; $a_1 = 6$; $a_2 = 5$; $a_3 = 3$ и $a_4 = A$.

Решение. Так как в исходном уравнении член a_0 и члены с большими индексами отсутствуют, то $b_2 = a_4 = A$.

Подставляя значения $b_2 = A$ и $b_0 = a_2 - \frac{a_0}{a_1} \cdot a_3 = 5 - \frac{1}{6} \cdot 3 = \frac{9}{2}$

в выражение $b_1 = a_3 - \frac{a_1}{b_0} b_2 > 0$, получим:

$$b_1 = 3 - \frac{6}{\frac{9}{2}} \cdot A > 0, \text{ откуда } A < \frac{9}{4}.$$

Следовательно, при $A < \frac{9}{4}$ система устойчива, а при $A > \frac{9}{4}$ неустойчива.

При $A = \frac{9}{4}$ система находится на границе устойчивости, так как по таблице Рауса $b_1 = 0$.

Пример 58. Определить по критерию Гурвица, устойчива ли система с характеристическим уравнением

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0,$$

коэффициенты которого $a_0 = 2 \cdot 10^{-6}$; $a_1 = 2 \cdot 10^{-2}$; $a_2 = 3$; $a_3 = 130$ и $a_4 = 10^5$.

Решение. Из коэффициентов характеристического уравнения составляем матрицу Гурвица:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 \cdot 10^{-2} & 130 & 0 & 0 \\ 2 \cdot 10^{-6} & 3 & 10^5 & 0 \\ 0 & 2 \cdot 10^{-2} & 130 & 0 \\ 0 & 2 \cdot 10^{-6} & 3 & 10^5 \end{vmatrix}$$

Вычисляя определители, получим

$$\Delta_1 = a_1 = 2 \cdot 10^{-2} > 0; \quad \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 = \\ = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 3 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot 130 \approx 0,06 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3 \Delta_2 - a_1^2 a_4 = 130 \cdot 0,06 - (2 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 10^5 < 0.$$

Третий определитель $\Delta_3 < 0$. Следовательно, можно сказать, что данная система неустойчива.

Пример 59. Определить по критерию Гурвица, устойчива ли замкнутая система, если передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{(Tp + 1)p^2}.$$

Решение. Так как в АСУ используются в основном отрицательные обратные связи, то передаточная функция замкнутой системы при $W_{o.c.}(p) = 1$:

$$W_s(p) = \frac{k}{Tp^3 + p^2 + k}.$$

Отсюда характеристическое уравнение

$$Tp^3 + p^2 + k = 0,$$

где

$$a_0 = T; \quad a_1 = 1; \quad a_2 = 0; \quad a_3 = k.$$

Поскольку один из коэффициентов равен нулю ($a_2 = 0$), то система будет структурно неустойчивой, то есть неустойчивой при всех положительных значениях T и k , а именно по критерию Гурвица:

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & k & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & k \end{vmatrix}$$

Определитель $\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & k \\ T & 0 \end{vmatrix} = -Tk < 0$, что и требовалось доказать.

Пример 59. Определить по критерию Гурвица, устойчива ли система автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора, принципиальная и структурная схемы которой приведены соответственно на рисунках 23 и 29.

Решение. Характеристическое уравнение системы $G(p) = 0$

$$1,12 \cdot 10^{-7} p^6 + 2,97 \cdot 10^{-5} p^5 + 7 \cdot 10^{-4} p^4 + 0,0147 p^3 + 0,127 p^2 + 1,47 p + 4,6 = 0,$$

где $a_0 = 1,12 \cdot 10^{-7}$; $a_1 = 2,97 \cdot 10^{-5}$; $a_2 = 7 \cdot 10^{-4}$;

$$a_3 = 0,0147, a_4 = 0,127; a_5 = 1,47; a_6 = 4,6.$$

Поскольку все коэффициенты исходного характеристического уравнения больше нуля, то достаточно устойчивость системы проверить по критерию Гурвица для уравнения этого вида, а именно:

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= a_3(a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1(a_1 a_4 - a_0 a_5) = \\ &= 0,0147(2,97 \cdot 10^{-5} \cdot 7 \cdot 10^{-4} - 1,12 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0147) - \\ &- 2,97 \cdot 10^{-5} \times (2,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,127 - 1,12 \cdot 10^{-7} \cdot 1,47) = \\ &= 1,74 \cdot 10^{-10} > 0; \Delta_5 = (a_1 a_2 - a_0 a_3) [a_5(a_3 a_4 - a_2 a_5) + \\ &+ a_6(2 a_1 a_5 - a_3^2)] + (a_1 a_4 - a_0 a_5) \cdot [a_1 a_3 a_6 - a_5(a_1 a_4 - a_0 a_5)] - \\ &- a_1^3 a_6^2 = (2,97 \cdot 10^{-5} \cdot 7 \cdot 10^{-4} - 1,12 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0147) \times \\ &\times [1,47(0,0147 \cdot 0,127 - 7 \cdot 10^{-4} \cdot 1,47) + \\ &+ 4,6(2 \cdot 2,97 \cdot 10^{-5} \cdot 1,47 - 0,0147^2)] + \\ &+ (2,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,127 - 1,12 \cdot 10^{-7} \cdot 1,47) \times \\ &\times [2,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0147 \cdot 4,6 - 1,47(2,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,127 - \\ &- 1,12 \cdot 10^{-7} \cdot 1,47)] - (2,97 \cdot 10^{-5})^3 \cdot 4,6^2 = 18,6 \cdot 10^{-12} > 0. \end{aligned}$$

Система устойчива, так как выполняются соответствующие условия критерия Гурвица.

§ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ АСУ ПО ЧАСТОТНЫМ КРИТЕРИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ

Пример 60. Определить по критерию Михайлова, устойчива ли система, характеристическое уравнение которой $G(p) = 0,1p^4 + p^3 + 10p^2 + 40p + 100 = 0$.

Решение. Подставляя в характеристическое уравнение $p = j\omega$ и отделяя вещественную часть от мнимой, получим

$$G(j\omega) = R(\omega) + jJ(\omega),$$

где $R(\omega) = 0,1\omega^4 - 10\omega^2 + 100$; $J(\omega) = -\omega^3 + 40\omega$;
 $j^2 = -1$, $j^3 = -j$; $j^4 = 1$.

Задаваясь различными значениями ω , находим соответствующие им $R(\omega)$ и $J(\omega)$:

ω	0	2	4	6	7	9	10	∞
$R(\omega)$	100	61,6	-34,4	-130	-150	-54	100	$+\infty$
$J(\omega)$	0	72	96	24	-63	-269	-600	$-\infty$

по которым строим кривую Михайлова (рис. 46). Заметим, что годограф повернулся на угол $\varphi = 4\frac{\pi}{2}$. Построенная кривая отвечает всем условиям критерия Михайлова и, следовательно, данная система устойчива.

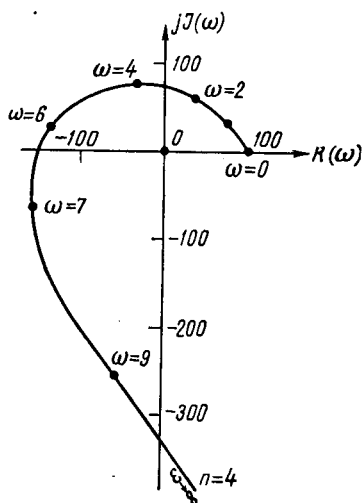


Рис. 46. К примеру 60.

Пример 61. Определить по критерию Михайлова, устойчива ли замкнутая автоматическая система, имеющая передаточную функцию

$$W(p) = \frac{100}{10^{-8}p^6 + 10^{-6}p^5 + 10^{-4}p^4 + 8 \cdot 10^{-3}p^3 + 0,1p^2 + 10p + 200}.$$

Решение. Характеристическое уравнение системы имеет вид

$$G(p) = 10^{-8}p^6 + 10^{-6}p^5 + 10^{-4}p^4 + 8 \cdot 10^{-3}p^3 + 0,1p^2 + 10p + 200 = 0.$$

Для построения кривой Михайлова определим вещественную и мнимую части функции $G(j\omega)$:

$$R(\omega) = -10^{-8}\omega^6 + 10^{-4}\omega^4 - 0,1\omega^2 + 200,$$

$$J(\omega) = 10^{-6}\omega^5 - 8 \cdot 10^{-3}\omega^3 + 10\omega.$$

Задаваясь рядом значений ω , вычислим $R(\omega)$ и $J(\omega)$:

ω	0	10	20	30	39,4	60	75	78	81	90	100	∞
$R(\omega)$	200	191	176	184	234	670	1130	1040	1040	637	-800	$-\infty$
$J(\omega)$	0	92	139	108	0	-350	-380	-220	0	973	3000	∞

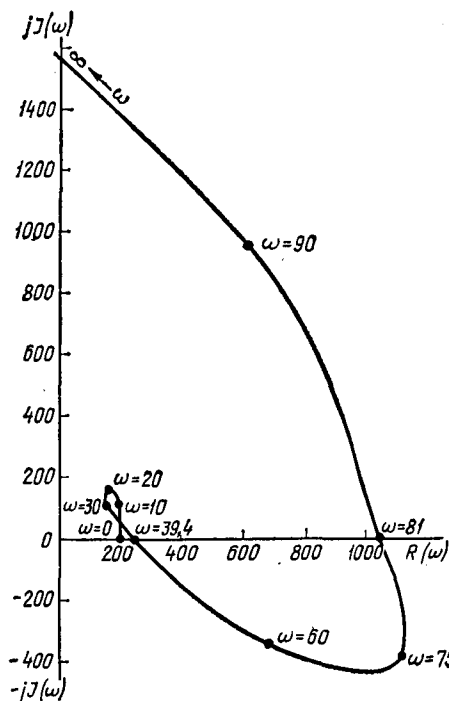


Рис. 47. К примеру 61.

Значения частот ω , при которых $J(\omega) = 0$, определяются из решения уравнения $J(\omega) = 0$. По величине ω найдены $R(\omega)$, при которых годограф пересекает ось абсцисс. На рисунке 47 в соответствии с данными таблицы построен годограф, который, согласно критерию Михайлова, показывает, что данная система неустойчива.

Пример 62. Пользуясь критерием устойчивости Михайлова, найти значение коэффициента усиления K разомкнутой системы, имеющей передаточную функцию

$$W(p) = \frac{K}{9 \cdot 10^{-4} p^4 + 3 \cdot 10^{-2} p^3 + 0,6 p^2 + p + 1},$$

при котором замкнутая система будет на границе устойчивости.

Решение. Характеристическое уравнение замкнутой системы определяется по аналогии с примером 59:

$$G(p) = 9 \cdot 10^{-4} p^4 + 3 \cdot 10^{-2} p^3 + 0,6 p^2 + p + 1 + K.$$

Выделим вещественную и мнимую части функции $G(j\omega)$:

$$R(\omega) = 9 \cdot 10^{-4} \omega^4 - 0,6 \omega^2 + 1 + K;$$

$$J(\omega) = \omega - 3 \cdot 10^{-2} \omega^3.$$

Если система находится на границе устойчивости, то годограф Михайлова проходит через начало координат, то есть $R(\omega) = 0$ и $J(\omega) = 0$ при $\omega = 0$.

Из второго уравнения находим, что

$$\omega^2 = \frac{1}{3} \cdot 10^2.$$

Подставляя $\omega^2 = \frac{1}{3} 10^2$ в уравнение $R(\omega) = 0$, получим

$$1 - \frac{0,6}{3} \cdot 10^2 + 1 + K = 0,$$

откуда $K = 18$.

При $K > 18$ система неустойчива.

Пример 63. Пользуясь следствием критерия Михайлова, определить, устойчива ли АСУ, характеристическое уравнение которой

$$p^4 + 2p^3 + 10p^2 + 32p + 9 = 0.$$

Решение. Определим вещественную и мнимую части характеристического уравнения при $p = j\omega$:

$$R(\omega) = \omega^4 - 10\omega^2 + 9 = 0; J(\omega) = -2\omega^3 + 32\omega = 0.$$

Вычисляем корни мнимой части $J(\omega)$:

$\omega_1 = 0$; $\omega_3 = \sqrt{\frac{32}{2}} = 4$ и корни вещественной части $R(\omega)$:

$$\omega_{2,4}^2 = \frac{10}{2} \pm \sqrt{25-9}; \omega_2 = 1; \omega_4 = 3.$$

Принцип перемежаемости корней не соблюдается ($\omega_3 > \omega_4$), следовательно, данная АСУ неустойчива.

Пример 64. Пользуясь критерием Найквиста, определить устойчивость системы, которая состоит из трех звеньев, соединенных последовательно и охваченных обратной связью (замкнутая АСУ). Дифференциальное уравнение первого звена неизвестно, поэтому экспериментально определена его амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) $W_1(j\omega)$, представленная в таблице 1. Уравнения второго и третьего звеньев соответственно таковы: $(0,01p + 1)y = 10x$ и $(0,05p + 1)y = 5x$.

Решение. Для определения устойчивости замкнутой системы построим ее амплитудно-фазовую частотную характеристику в разомкнутом состоянии, которая равна произведению характеристик всех звеньев:

$$W(j\omega) = W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) \cdot W_3(j\omega).$$

Значения $W_1(j\omega)$ даны в таблице, а значения $W_2(j\omega)$ и $W_3(j\omega)$ определяют по аналитическим выражениям

$$W_2(j\omega) = \frac{10}{0,01j\omega + 1} \text{ и } W_3(j\omega) = \frac{5}{0,05j\omega + 1}.$$

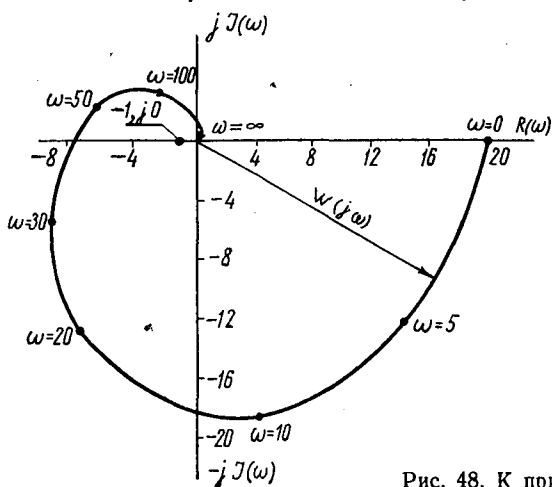


Рис. 48. К примеру 64.

Выполняя вычисления и построения для значений ω в интервале от 0 до ∞ , получаем амплитудно-фазовую частотную характеристику системы (рис. 48). Результаты вычислений сведены в таблицу.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика $W(j\omega)$ разомкнутой системы охватывает точку с координатами $-1; j0$, следовательно, система в замкнутом состоянии будет неустойчивой.

Т а б л и ц а 1

Частота $\omega, \text{с}^{-1}$	АФЧХ			
	$W_1(j\omega)$	$W_2(j\omega)$	$W_3(j\omega)$	$W(j\omega)$
0	$0,4-j0$	$10-j0$	$5-j0$	$20-j0$
5	$0,35-j0,15$	$9,95-j0,5$	$4,7-j1,7$	$14,5-j12,1$
10	$0,3-j0,3$	$9,9-j1,0$	$4,0-j2,0$	$4,2-j18,6$
20	$0,2-j0,4$	$9,6-j1,9$	$2,5-j2,5$	$-7,6-j13$
30	$0,1-j0,4$	$9,2-j2,8$	$1,5-j2,3$	$-9,4-j5,5$
50	$-0,1-j0,4$	$8-j4$	$0,7-j1,7$	$-6,5+j2,1$
100	$-0,2-j0,35$	$5-j5$	$0,2-j1,0$	$-1,3+j2,6$
200	$-0,1-j0,2$	$2-j4$	$0,05-j0,5$	$-0,05+j0,5$
∞	0	0	0	0

Пример 65. Определить по критерию Найквиста, устойчива ли система автоматического регулирования частоты вращения двигателя внутреннего сгорания, принципиальная и структурная схемы которой приведены соответственно на рисунках 26 и 32.

Решение. Разомкнем систему на выходе звена $W_{o.c}(p)$ в точке 1 (рис. 32, б) и составим передаточную функцию разомкнутой АСУ:

$$W(p) = W_4(p) W_3(p) W_{o.c}(p)$$

или с учетом данных, приведенных в примерах 30 и 48, получим

$$W(p) = \frac{W_c(p) W_A(p) W_{o.c}(p)}{1 + W_c(p) W_{i.o.c}(p)} = \frac{\frac{1}{T_c p} \cdot \frac{k_A}{T_A p + 1} \cdot \frac{k_M}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}}{1 + \frac{1}{T_c p} \cdot \frac{k T_M p}{T_M p + 1}}$$

После математических преобразований

$$W(p) = \frac{b_0 p + b_1}{a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p},$$

где $b_0 = k_d k_m T_k = 1,25 \cdot 7 \cdot 0,002 = 17,5 \cdot 10^{-3}$;

$$b_1 = k_d \cdot k_m = 1,25 \cdot 7 = 8,8;$$

$$a_0 = T_c T_k T_d \cdot T_2^2 = 0,5 \cdot 0,002 \cdot 1,6 \cdot 0,095^2 = 1,44 \cdot 10^{-5};$$

$$a_1 = T_c T_k T_d T_1 + T_c T_k T_2^2 + T_c T_d T_2^2 + k T_k T_d T_2^2 = \\ = 0,5 \cdot 0,002 \cdot 1,6 \cdot 0,06 + 0,5 \cdot 0,002 \cdot 0,095^2 + \\ + 0,5 \cdot 1,6 \cdot 0,095^2 + 0,2 \cdot 0,002 \cdot 1,6 \cdot 0,095^2 = 73,4 \cdot 10^{-4};$$

$$a_2 = T_c T_k T_d + T_c T_k T_1 + T_c T_d T_1 + T_c T_2^2 + k T_k T_d \cdot T_1 + \\ + k T_k T_2^2 = 0,5 \cdot 0,002 \cdot 1,6 + 0,5 \cdot 0,002 \cdot 0,06 + \\ + 0,5 \cdot 1,6 \cdot 0,06 + 0,5 \cdot 0,095^2 + 0,2 \cdot 0,002 \cdot 1,6 \cdot 0,06 + \\ + 0,2 \cdot 0,002 \cdot 0,095^2 = 53,2 \cdot 10^{-3};$$

$$a_3 = T_c T_k + T_c T_d + T_c T_1 + k T_k T_d + k T_k T_1 = \\ = 0,5 \cdot 0,002 + 0,5 \cdot 1,6 + 0,5 \cdot 0,06 + 0,2 \cdot 0,002 \cdot 1,6 + \\ + 0,2 \cdot 0,002 \cdot 0,06 = 0,83; a_4 = T_c + T_k = 0,5 + 0,002 = \\ = 0,502.$$

Подставляя цифровые значения коэффициентов и вместо p значение $j\omega$, найдем амплитудно-фазо-частотную характеристику АСУ:

$$W(j\omega) = \frac{b_1 + j b_0 \omega}{A + jB} = \\ = \frac{8,8 + j 17,5 \cdot 10^{-3} \omega}{73,4 \cdot 10^{-4} \omega^4 - 0,83 \omega^2 + j (1,44 \cdot 10^{-5} \omega^5 - 53,2 \cdot 10^{-3} \omega^3 + 0,5 \omega)},$$

где $A = 73,4 \cdot 10^{-4} \omega^4 - 0,83 \omega^2$;

$$B = 1,44 \cdot 10^{-5} \omega^5 - 53,2 \cdot 10^{-3} \omega^3 + 0,5 \omega.$$

Для разделения характеристики $W(j\omega)$ на действительную $R(\omega)$ и мнимую $J(\omega)$ части, умножим знаменатель и числитель на сопряженное комплексное число $A - jB$. Тогда

$$W(j\omega) = \frac{(b_1 + j b_0 \omega)(A - jB)}{A^2 + B^2} = \frac{A b_1 + B b_0 \omega}{A^2 + B^2} + \\ + j \frac{A b_0 \omega - B b_1}{A^2 + B^2} = R(\omega) + j J(\omega).$$

Найдем значения следующих величин:

$$A b_1 = 65 \cdot 10^{-3} \omega^4 - 7,3 \omega^2;$$

$$B b_1 = 12,7 \cdot 10^{-5} \omega^5 - 47 \cdot 10^{-2} \omega^3 + 4,4 \omega;$$

$$A b_0 \omega = 12,8 \cdot 10^{-5} \omega^5 - 14,5 \cdot 10^{-3} \omega^3;$$

$$B b_0 \omega = 0,25 \cdot 10^{-5} \omega^6 - 9,3 \cdot 10^{-4} \omega^4 + 0,88 \cdot 10^{-2} \omega^2;$$

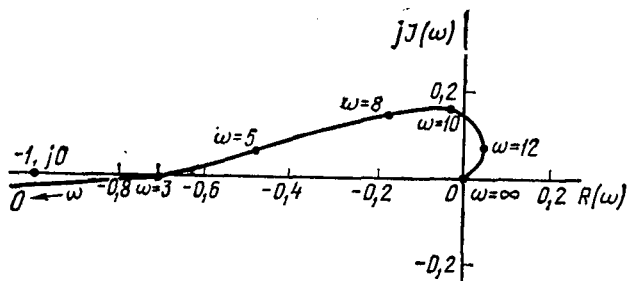


Рис. 49. К примеру 65.

$$A^2 = 53,5 \cdot 10^{-6} \omega^8 - 12 \cdot 10^{-3} \omega^6 + 0,7 \omega^4;$$

$$B^2 = 2 \cdot 10^{-10} \omega^{10} - 2,88 \cdot 10^{-6} \omega^8 (53,2 \cdot 10^{-3} \omega^3 - 0,5 \omega) + \\ + 28,2 \cdot 10^{-4} \omega^6 - 53,2 \cdot 10^{-3} \omega^4 + 0,25 \omega^2 = 2 \cdot 10^{-10} \omega^{10} - \\ - 1,5 \cdot 10^{-6} \omega^8 + 28,3 \cdot 10^{-4} \omega^6 - 53,2 \cdot 10^{-3} \omega^4 + 0,25 \omega^2;$$

$$A^2 + B^2 = 2 \cdot 10^{-10} \omega^{10} + 52 \cdot 10^{-6} \omega^8 - 92 \cdot 10^{-4} \omega^6 + 65 \cdot 10^{-2} \omega^4 + \\ + 0,25 \omega^2.$$

Итак, получим

$$W(j\omega) = \frac{0,25 \cdot 10^{-6} \omega^6 + 640 \cdot 10^{-4} \omega^4 - 7,3 \omega^2}{2 \cdot 10^{-10} \omega^{10} + 52 \cdot 10^{-6} \omega^8 - 92 \cdot 10^{-4} \omega^6 + 0,65 \omega^4 + 0,25 \omega^2} + \\ + j \frac{10^{-6} \omega^5 + 0,455 \omega^3 - 4,4 \omega}{2 \cdot 10^{-10} \omega^{10} + 52 \cdot 10^{-6} \omega^8 - 92 \cdot 10^{-4} \omega^6 + 0,65 \omega^4 + 0,25 \omega^2}.$$

Откуда

$$R(\omega) = \frac{25 \cdot 10^{-8} \omega^4 + 6,4 \cdot 10^{-2} \omega^2 - 7,3}{2 \cdot 10^{-10} \omega^8 + 52 \cdot 10^{-6} \omega^6 - 92 \cdot 10^{-4} \omega^4 + 0,65 \omega^2 + 0,25},$$

$$J(\omega) = \frac{10^{-6} \omega^4 + 0,455 \omega^2 - 4,4}{2 \cdot 10^{-10} \omega^8 + 52 \cdot 10^{-6} \omega^6 - 92 \cdot 10^{-4} \omega^4 + 0,65 \omega^2 + 0,25}.$$

Задаваясь различными значениями ω , найдем $R(\omega)$ и $J(\omega)$, значения которых приведены ниже.

ω	0	1	3	5	8	10	12	20	∞
$R(\omega)$	-29	-8,2	-0,71	-0,48	-0,18	-0,04	0,024	0,009	0
$J(\omega)$	$-\infty$	-0,45	-0,006	0,06	0,14	0,16	0,073	0,009	0

На рисунке 49 построена амплитудно-фазо-частотная характеристика разомкнутой системы. Согласно критерию Найквиста, замкнутая система устойчива, так как характеристика разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $-1; j0$.



§ 1. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ АСУ И ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Качество работы АСУ характеризуют следующие свойства: запас устойчивости, точность и быстродействие. Эти свойства АСУ выражаются определенными количественными показателями.

Точность работы АСУ определяется ошибкой, которая представляет собой разность между задающим и действительным значениями управляемой величины: $x(t) = g(t) - y(t)$.

Поскольку задающее и возмущающие воздействия носят случайный характер, то точность работы АСУ и другие показатели качества принято оценивать детерминированно при так называемых *типовых воздействиях*.

Величина $x(t)$ определяется передаточной функцией замкнутой АСУ, составленной по ошибке $\Phi_x(p)$, которую находят [2] из передаточной функции замкнутой системы

$$\Phi_x(p) = 1 - W(p)_z = \frac{1}{1 + W(p)_p}.$$

Функция $x(t)$ выражается следующим образом:
при задающем воздействии

$$x'(t) = \Phi_x(p) g(t) = \frac{g(t)}{1 + W(p)_p},$$

при возмущающем воздействии

$$x''(t) = \Phi_x(p) W_f(p) f(t) = \frac{W_f(p) f(t)}{1 + W(p)_p}.$$

Если в АСУ одновременно присутствуют задающее и несколько возмущающих воздействий, то вследствие линейности элементов системы результирующая погрешность равна сумме составляющих погрешностей:

$$x(t) = x'(t) + \sum_1^k x''_i(t) = \frac{g(t)}{1 + W(p)_p} + \frac{\sum_1^k W_{f_k}(p) f_k(t)}{1 + W(p)_p}.$$

В статических системах наблюдается ошибка в установившемся режиме, которая определяется при $p=0$ для $g(t)=g_0$ и $f(t)=f_0$

$$x(0)_{\text{ст}} = \frac{g_0}{1+W(0)_p} + \frac{\sum_1^k W_{f_k}(0) f_0}{1+W(0)_p} = \frac{g(0)}{1+k_{\Sigma}} + \frac{\sum_1^k f_k(0)}{1+k_{\Sigma}},$$

где k_{Σ} — суммарный коэффициент усиления АСУ.

В целях снижения $x(0)_{\text{ст}}$ применяется масштабирование управляющего воздействия $g(t)=mg_0(t)$, то есть снижается ступень уставки задающего воздействия $g_0(t)$.

Значение статической ошибки сводится к нулю при использовании интегрирующих звеньев в системе управления, так как передаточная функция интегрирующего звена $W(p)_{\text{и}} = \frac{1}{p}$, откуда $W(p)_{\text{п}}' = W(p)_{\text{и}} W(p)_{\text{р}} = \frac{1}{p} W(p)_{\text{р}}$.

Следовательно, при $p=0$ $W(p)_{\text{р}} = \infty$.

Интегрирующие звенья должны включаться в цепь управления АСУ до места приложения возмущающего воздействия, но это не всегда удается. Например, включение интегрирующих элементов и повышение степени астатизма не дает возможности устранить ошибку от воспринимающего элемента.

Динамическая ошибка АСУ будет определяться самой кривой переходного процесса $x(t)$.

Для характеристики точности работы АСУ используют также коэффициенты ошибок, которые применимы как для задающих, так и возмущающих воздействий.

Например, при известном законе задающего воздействия g , имеющего конечное число производных $\frac{dg}{dt}$, $\frac{d^2g}{dt^2}$, ..., $\frac{d^mg}{dt^m}$, можно получить его изображение $G(p)$.

Тогда изображение ошибки приобретет вид:

$$x'(p) = \Phi_x(p) G(p).$$

Переходя от изображения к оригиналу, можно получить:

$$x'(t) = c_0 g(t) + c_1 \frac{dg(t)}{dt} + \dots + c_m.$$

Величины $c_0, c_1, \dots, c_m$ называют коэффициентами ошибок. Их можно найти, разлагая $\Phi_x(p)$ в ряд Тейлора:

$$c = [\Phi_x(p)]_{p=0}; \quad c_1 = \left[\frac{d\Phi_x(p)}{dp} \right]_{p=0},$$

$$c_m = \left[\frac{d^m \Phi_x(p)}{dp^m} \right]_{p=0}.$$

Коэффициент $c_0 \neq 0$ только в статических системах, характеризующих статическую ошибку. В астатической системе, с астатизмом первого порядка $c_0 = 0$, а $c_1 = \frac{1}{k_v}$ обратно пропорционален добротности по ско-

рости $k_v = \frac{v}{x'_v}$, где v — скорость задающего воздействия. В астатической системе с астатизмом второго порядка $c_0 = 0$, $c_1 = 0$, $c_2 = \frac{1}{ka}$, где $ka = \frac{a}{x'_y}$ — коэффициент добротности по ускорению, a — ускорение, x'_y — ошибка по ускорению.

Быстродействие АСУ наиболее полно отражается кривой переходного процесса, построенной по управляющему параметру $y(t)$ или по ошибке $x(t)$.

Для определения кривой переходного процесса используют множество методов: аналитические, графические, графо-аналитические. Особенно перспективен метод (см. гл. VII), который предполагает применение вычислительных машин (для сложных АСУ — в первую очередь нелинейных). Широкое распространение получили операторный метод Лапласа (Карсона — Хевисайда) и частотный метод преобразований Фурье. Недостаток последнего метода в том, что он применим для абсолютно интегрируемых функций времени, удовлетворяющих условию

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt < \infty.$$

В целях расширения возможностей преобразований Фурье В. В. Солодовниковым предложен частотный метод приближенного построения кривой переходного процесса по вещественной частотной характеристике замкнутой АСУ.

Используя операторный метод преобразования Лапласа, определяют передаточную функцию замкнутой АСУ:

$$W(p)_3 = \frac{Q(p)}{R(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}.$$

По выражению $W(p)_3$ находят изображение управляемого параметра АСУ:

$$y(p) = W(p)_3 f(p).$$

При типовом возмущающем воздействии $f(t) = 1(t)$; $f(p) = \frac{1}{p}$, а при гармоническом

$$x(t) = A_0 \sin \omega_0 t;$$

$$f(p) = \frac{A_0 \omega_0}{p^2 + \omega_0^2}.$$

Могут быть и другие функции входных воздействий, тогда по таблице преобразований Лапласа [10] определяют изображение $\Delta f(p)$.

По характеристическому уравнению передаточной функции $W(p)_3$

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0$$

определяются корни $p_1, p_2, \dots, p_n$.

Для уравнений высокого порядка корни находят методом итерации путем деления многочленов одного на другой [2, 8, 10].

В результате решения могут получиться отрицательные вещественные, комплексные с отрицательной вещественной частью и нулевые корни.

Функция, например $\Delta y(t)$ кривой переходного процесса равна: при отсутствии нулевых корней

$$\Delta y(t) = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Q(p_k)}{R'(p_k)} e^{p_k t};$$

при нулевом корне, когда

$$\Delta y(p) = \frac{Q(p)}{pR(p)},$$

$$\Delta y(t) = \frac{Q(0)}{R(0)} + \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Q(p_k)}{R'(p_k)} e^{p_k t};$$

при комплексных корнях, когда

$$p_k = \alpha + j\beta; \quad \frac{Q(p_k)}{R'(p_k)} = \frac{a + jb}{c + jd} = \delta + j\sigma, \text{ а}$$

$$p_{k+1} = \alpha - j\beta; \quad \frac{Q(p_{k+1})}{R'(p_{k+1})} = \frac{a + jb}{c - jd} = \delta - j\sigma;$$

$$\Delta y(t) = \sum_{k=1}^{k=r} \frac{Q(p_k)}{R'(p_k)} e^{p_k t} + \sum_{k=1}^{k=s} 2A_k e^{\alpha_k t} \cdot \cos(\beta_k t + \varphi_k);$$

где $R'(p)$ — производная от $R(p)$;

$$n = r + 2s;$$

r — число вещественных корней;

s — число пар комплексных корней;

$$A_k = \sqrt{\delta^2 - \sigma^2}; \quad \varphi_k = \arctg \frac{\sigma}{\delta}.$$

Частотный метод графического построения кривой переходного процесса по вещественной частотной характеристике замкнутой АСУ называют еще и методом трапецидальных вещественных частотных характеристик. Суть этого метода такова. По передаточной функции $\Phi_x(p)$ или $W(p)_z$ определяют вещественную часть амплитудно-фазо-частотной характеристики $R(\omega)$. Затем строят график вещественной характеристики $R(\omega)$.

Кривая $R(\omega)$ аппроксимируется трапецидальными ломаными линиями (рис. 50). Приняв $R(0) = 1$, $\omega_0 = \frac{1}{h(\tau)}$ и $\frac{\omega_1}{\omega_0} = \kappa$ определяют значение единичной трапеции [8].

Для $h(\tau)$ в зависимости от κ и τ построены специальные таблицы. Они приводятся в любой литературе по теории автоматического управления, например [2, 8, 5]. Тогда при реальном значении $R(\omega)$ кривая переходного процесса отвечает выражению

$$y(t) = h(\tau) R_0; \quad t = \frac{\tau}{\omega_0}.$$

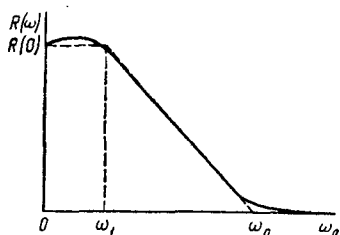


Рис. 50. Аппроксимация $R(\omega)$ трапецидальной характеристикой.

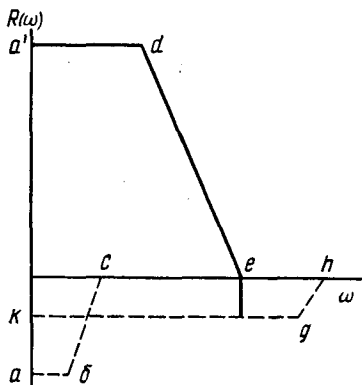
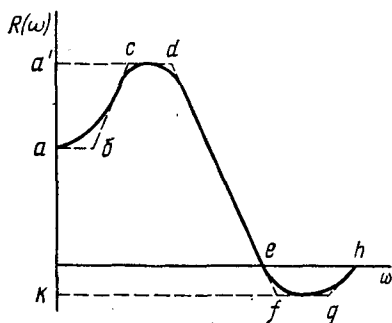


Рис. 51. Аппроксимация $R(\omega)$ несколькими трапецидальными характеристиками.

Если кривая $R(\omega)$ сложна, то ее разбивают на несколько трапеций (рис. 51). Для каждой трапеции находят свои значения $h(\tau)$, а затем с учетом знака и величины $R(0)_i$ для каждой i -й трапеции путем суммирования определяют окончательно $y(t)$.

По кривой переходного процесса можно оценить количественные показатели качества переходного процесса: время протекания, максимальное отклонение управляемого параметра и колебательность переходного процесса.

Время переходного процесса характеризует быстродействие АСУ. Оно представляет собой интервал времени от момента появления входного возмущающего воздействия до того момента, когда $\Delta y(t) = 5\% \Delta y$ в начальный период.

Максимальное отклонение параметра в переходный период $\Delta y_{\max}$ — это наибольшее отклонение амплитуды управляемого параметра от установившегося значения в первый полупериод колебательного переходного процесса.

Колебательность переходного процесса оценивается декрементом затухания $d = \ln \frac{\Delta y_{1 \max}}{\Delta y_{2 \max}}$, представляющим собой натуральный логарифм отношения амплитуд отклонения k управляемого параметра первого полупериода к амплитуде отклонения $\Delta y_{2 \max}$ второго полупериода (рис. 52).

Имеются комплексные показатели качества работы АСУ, которые косвенно характеризуют точность, быстродействие и запас устойчивости. Это — интегральные оценки качества, из которых наиболее часто используются [2, 3, 8]

$$I_1 = \int_0^{\infty} x \, dt \quad \text{и} \quad I_2 = \int_0^{\infty} x^2 \, dt,$$

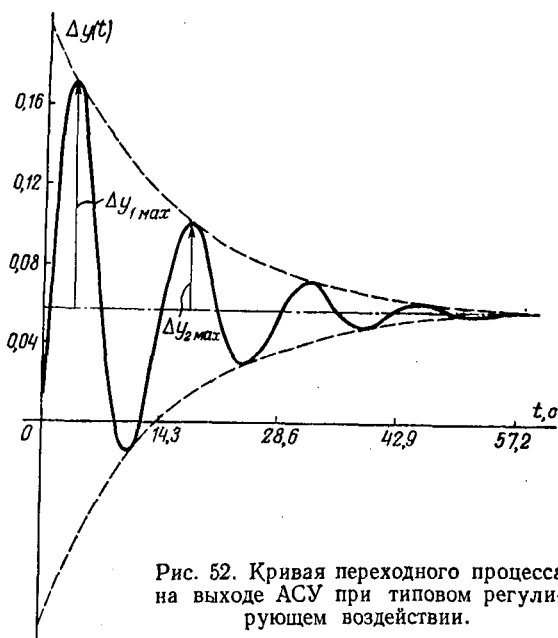


Рис. 52. Кривая переходного процесса на выходе АСУ при типовом регулирующем воздействии.

где $\Delta x = x(t)$ — отклонение управляемой величины от нового установившегося значения, которое она имеет по завершении переходного процесса (при $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow 0$).

Геометрически I_1 представляет собой площадь под кривой переходного процесса. Эта площадь тем меньше, чем быстрее происходит затухание, выше точность и больше запас устойчивости АСУ.

Значение I_1 удобно вычислять при помощи преобразования Лапласа: $I_1 = \lim_{p \rightarrow 0} x(p)$. Очевидно, это выражение применимо только для монотонных кривых переходного процесса.

В случае колебательных процессов, то есть когда $x(t)$ знакопеременны, используют формулу, которую называют квадратичной интегральной оценкой или квадратичной динамической ошибкой. Выражение квадратичной интегральной ошибки имеет вид

$$I_{20} = \frac{\Omega_0}{\Delta y_{\infty}^2} \int_0^{\infty} x^2 dt,$$

где $\Omega_0 = \sqrt{\frac{a_n}{a_0}} \Delta y_{\infty}$ — статическое приращение параметра управления; a_0, a_n — коэффициенты характеристического уравнения.

Вычисление I_2 может производиться по формуле [2]: $I_2 =$

$$= \int_0^{\infty} x^2 dt = \frac{1}{2a_n^2 \Delta} (B_m \Delta_m + B_{m-1} \Delta_{m-1} + \dots + B_1 \Delta_1 + B_0 \Delta_0) - \frac{b_m b_{m-1}}{a_n^2},$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_n & -a_{n-2} & a_{n-4} & -a_{n-6} & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & -a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 \\ 0 & -a_n & a_{n-2} & -a_{n-4} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & \dots & a_1 \end{vmatrix}$$

На границе устойчивости $\Delta = 0$ $I_2 = \infty$ при $(k = m, m-1, \dots, 1, 0)$ Δ_k определяют из Δ заменой $(m-k+1)$ столбца столбцом

$$\begin{matrix} a_{n-1} \\ a_n \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ 0 \end{matrix}$$

Коэффициенты $B_m, B_{m-1}, \dots, B_2, B_1, B_0$ находят из выражений

$$B_m = b_m^2; \quad B_{m-1} = b_{m-1}^2 - 2b_m \cdot b_{m-2};$$

$$B_{m-2} = b_{m-2}^2 - 2b_{m-1}b_{m-3} + 2b_m b_{m-4};$$

$$B_k = b_k^2 - 2b_{k+1}b_{k-1} + 2b_{k+2}b_{k-2} + \dots + 2(-1)^k b_m b_{2k-m};$$

$$B_0 = b_0^2.$$

В функции I_2 форма кривой переходного процесса ничем не ограничивается. Вследствие этого переходные процессы разных видов (колебательные, монотонные) могут характеризоваться одним и тем же значением I_2 . Минимальное значение I_2 могут иметь малоинерционные АСУ, величина $\Delta y_{\max}$ которых значительно превышает норму. Следовательно, I_2 характеризует только величину отклонения и быстроту затухания, но не учитывает близость системы к колебательной границе устойчивости.

В связи с этим применяется еще и улучшенная квадратичная интегральная оценка вида

$$I_k = \int_0^{\infty} (x^2 + T^2 \dot{x}^2) dt = \int_0^{\infty} x^2 dt + T^2 \int_0^{\infty} \dot{x}^2 dt = I_2 + T^2 I_2^*.$$

Вычисление функции I_k производится так же, как определяется I_2 .

Интегральные оценки хороши тем, что они представляют собой единый числовой критерий нескольких свойств качества работы АСУ. Однако они создают некоторую неопределенность решения, поскольку не полностью раскрывают характер переходного процесса.

§ 2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РАБОТЫ АСУ

Пример 66. Вычислить статическую ошибку АСУ (рис. 23) при типовом регулирующем воздействии $g(t) = 1 \cdot (t)$. Разомкнутая передаточная функция системы

$$W(p)_p = \frac{504p^3 + 14\,000p + 36\,000}{0,000056p^6 + 0,0055p^5 + 0,55p^4 + 9,5p^3 + 115p^2 + 990p + 1000}.$$

Решение. Передаточная функция АСУ по ошибке имеет вид:

$$\begin{aligned}\Phi_x(p) &= \frac{1}{1 + W(p)_p} = \\ &= \frac{5,6 \cdot 10^{-5}p^6 + 5,5 \cdot 10^{-3}p^5 + 0,55p^4 + 9,5p^3 + 115p^2 + 990p + 1000}{5,6 \cdot 10^{-5}p^6 + 5,5 \cdot 10^{-3}p^5 + 0,55p^4 + 9,5p^3 + 629p^2 + 14\,990p + 37\,000},\end{aligned}$$

откуда при $p = 0$ статическая ошибка в случае единичного скачка регулирующего воздействия

$$x'_{ст} = \frac{1000}{37\,000} = 0,027.$$

Пример 67. Определить коэффициенты ошибок c_0, c_1, c_2 и коэффициенты добротности по скорости k_v и ускорению k_a при единичном задающем воздействии на АСУ, если передаточная функция разомкнутой системы

$$W(p)_p = \frac{0,035p + 8,75}{2,9 \cdot 10^{-5}p^5 + 0,015p^4 + 0,09p^3 + 1,66p^2 + 1,001p}.$$

Решение. Находим передаточную функцию по ошибке

$$\begin{aligned}\Phi_x(p) &= \frac{1}{1 + W(p)_p} = \\ &= \frac{2,9 \cdot 10^{-5}p^5 + 0,015p^4 + 0,09p^3 + 1,66p^2 + 1,001p}{2,9 \cdot 10^{-5}p^5 + 0,015p^4 + 0,09p^3 + 1,66p^2 + 1,0045p + 875} = \frac{A(p)}{B(p)}.\end{aligned}$$

Вычисляем коэффициенты астатизма $c_0 = [\Phi_x(p)]_{p=0}$ (так как числитель дроби $A(0) = 0$), то $c_0 = 0$):

$$c_1 = \left[\frac{d\Phi_x(p)}{dp} \right]_{p=0} = \frac{A'(0)B(0) - B'(0)A(0)}{B(0)^2} = \frac{1,001 \cdot 875}{8,75^2} = 0,115.$$

Коэффициент добротности АСУ по скорости

$$\begin{aligned}k_v &= \frac{1}{c_1} = \frac{1}{0,115} = 8,7 \left[\frac{1}{с} \right]; \quad c_2 = \left[\frac{d^2\Phi_x(p)}{dp^2} \right]_{p=0} = \\ &= \frac{[A''(p)B(p) + A'(p)B'(p) - B''(p)A(p) - A'(p)B'(p)] - B(p)^2}{B(p)^4} = \\ &= \frac{A''(0)B(0)B(0)^2 - 2B(0)^2B'(0)A'(0)}{B(0)^3} = \\ &= \frac{3,32 \cdot 8,75 - 2 \cdot 1,0045 \cdot 1,001}{8,75^2} = \frac{2,7}{76,6} \approx 0,353.\end{aligned}$$

Коэффициент добротности по ускорению

$$k_a = \frac{1}{c_2} = 2,83 \left[\frac{1}{с^2} \right].$$

Пример 68. Рассчитать ошибку работы АСУ (рис. 30) при возмущающем воздействии $M(t) = W_m(p) \cdot 1(t)$; $W_m(p) = \frac{-0,4}{1+2p}$. Параметры схемы таковы:

$$W_1(p) = 54; \quad W_2(p) = \frac{8,8p + 21,8}{0,0022p^3 + 0,077p^2 + 2,06p + 8,78};$$

$$W_{o.c.}(p) = 0,01; \quad W_{1.o.c.} = \frac{0,024p}{0,04p + 1}.$$

Решение. Находим передаточную функцию разомкнутой АСУ:

$$\begin{aligned} W(p)_p &= W_o(p) W_{o.c.}(p) \frac{W_1(p) W_2(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_{o.c.}(p)} = \\ &= \frac{0,19p^5 + 5,2p + 11,8}{7,04 \cdot 10^{-4}p^6 + 5,1 \cdot 10^{-4}p^4 + 1,16p^3 + 117p^2 + 31,5p + 8,78}. \end{aligned}$$

Определим передаточную функцию ошибки:

$$\begin{aligned} \Phi_x(p) &= \frac{1}{1 + W(p)_p} = \\ &= \frac{7,04 \cdot 10^{-6}p^6 + 5,1 \cdot 10^{-4}p^4 + 1,16p^3 + 17p^2 + 31,5p + 8,75}{7,04 \cdot 10^{-6}p^6 + 5,1 \cdot 10^{-4}p^4 + 1,16p^3 + 17,2p^2 + 36,7p + 20,55}. \end{aligned}$$

Функция возмущающего воздействия

$$\begin{aligned} W_f(p) &= -W_o(p) W_m(p) = \frac{1}{(0,08p + 1)} \cdot \frac{-0,4}{(2p + 1)} = \\ &= \frac{-0,4}{0,16p^2 + 2,08p + 1}. \end{aligned}$$

Определим функцию ошибки по возмущению

$$\begin{aligned} x''(t) &= \Phi_x(p) W_f(p) \cdot 1(t) = \\ &= \frac{(2,8 \cdot 10^{-6}p^6 + 2,02 \cdot 10^{-4}p^4 + 0,464p^3 + 6,8p^2 + 12,6p + 3,5) \cdot 1(t)}{1,75 \cdot 10^{-6}p^7 + 9,62 \cdot 10^{-5}p^6 + 0,27p^5 + 5,18p^4 + 42,83p^3 + 97,98p^2 + 79,5p + 20,55}. \end{aligned}$$

Статическая ошибка по возмущению (при $p = 0$)

$$x''_{ст} = \frac{-3,5}{20,55} = -0,17.$$

Пример 69. Определить установившееся значение ошибки АСУ, если задающее воздействие меняется по закону

$g(t) = 5 + 12t + 4t^2$, а передаточная функция замкнутой АСУ (рис. 26) такова:

$$W(p)_s = \frac{0,028p^2 + 0,15p + 1}{0,014p^4 + 0,1p^3 + 2,6p^2 + p + 17,5}.$$

Решение. Передаточная функция по ошибке

$$\begin{aligned}\Phi_x(p) &= 1 - W(p)_s = \frac{0,028p^2 + 0,15p + 1}{0,014p^4 + 0,1p^3 + 2,6p^2 + p + 17,5} = \\ &= \frac{0,014p^4 + 0,1p^3 + 2,58p^2 + 0,35p + 16,5}{0,014p^4 + 0,1p^3 + 2,6p^2 + p + 17,5} = \frac{A(p)}{B(p)}.\end{aligned}$$

Производные задающего воздействия

$$g(t) = 5 + 12t + 4t^2; \quad g'(t) = 12 + 8t; \quad g''(t) = 8.$$

Для данного задающего воздействия ошибка имеет вид $x'(t) = c_0 g(t) + c_1 g'(t) + c_2 g''(t)$.

Находим коэффициенты ошибок (см. пример 67):

$$\begin{aligned}c_0 &= [\Phi_x(p)]_{p=0} = \frac{16,5}{17,5} = 0,95; \quad c_1 = \left[\frac{d\Phi_x(p)}{dp} \right]_{p=0} = \\ &= \frac{0,85 \cdot 17,5 - 1 \cdot 16,5}{17,5^2} = -0,0053; \\ c_1 &= \left[\frac{d\Phi_x(p)}{dp} \right]_{p=0} = \frac{0,85 \cdot 17,5 - 1 \cdot 16,5}{17,5^2} = -0,0053; \\ c_2 &= \left[\frac{d^2\Phi_x(p)}{dp^2} \right]_{p=0} = \\ &= \frac{[A''(p)B(p) - B''(p)A(p)]B^2(p) - 2B(p)[A'(p)B(p) - B'(p)A(p)]}{B(p)^4} = \\ &= \frac{(5,16 \cdot 17,5 - 5,2 \cdot 16,5) \cdot 17,5^2 - 2 \cdot 17,5 \cdot 1 (0,85 \cdot 17,5 - 1 \cdot 16,5)}{17,5^4} = \\ &= 0,0154.\end{aligned}$$

Отсюда функция ошибки

$$\begin{aligned}x'(t) &= 0,95(5 + 12t + 4t^2) + 0,0053(12 + 8t) + 0,0154 \cdot 8 = \\ &= 4,9 + 11,44t + 3,8t^2.\end{aligned}$$

Пример 70. Найти функцию ошибки по возмущению АСУ, если изображение функции ошибки (в соответствии с примером 68)

$$\begin{aligned}x''(p) &= \\ &= -\frac{2,8 \cdot 10^{-6}p^5 + 2,02 \cdot 10^{-4}p^4 + 0,464p^3 + 6,8p^2 + 12,6p + 35}{(1,75 \cdot 10^{-6}p^7 + 9,62 \cdot 10^{-5}p^6 + 0,27p^5 + 5,18p^4 + 42,83p^3 + 98p^2 + 79,5p + 2,06p)p} = \frac{Q(p)}{pR(p)}.\end{aligned}$$

Решение. Определим корни характеристического полинома $R(p)$. Из примера 68 следует, что полином можно представить в виде

$$R(p) = (7,04 \cdot 10^{-6} p^5 + 5,1 \cdot 10^{-4} p^4 + 1,16 p^3 + 17,2 p^2 + 36,7 p + 20,55) \cdot (0,08 p + 1) (2 p + 1) = 0,$$

а сомножитель пятой степени как

$$D(p) = p^5 + 12,5 p^4 + 16,5 \cdot 10^3 p^3 + 245 \cdot 10^3 p^2 + 5200 \cdot 10^3 p + 2920 \cdot 10^3 = 0.$$

Последние два слагаемых $D(p)$ представляется возможным привести к виду $5\,200\,000\,p + 2\,920\,000 = 5\,200\,000 \times (p + 0,56)$.

Разделим полином $D(p)$ на полученный двучлен:

$$\begin{array}{r} (p^5 + 72,5 p^4 + 165\,000 p^3 + 245\,000 p^2 + | p + 0,56 \\ + 5\,200\,000 p + 2\,920\,000 \quad \overline{p^4 + 72 p^3 + 165\,000 p^2 +} \\ p^5 + 0,56 p^4 \quad \overline{+ 152\,500 p + 5\,115\,000} \\ \hline 72 p^4 + 165\,000 p^3 \\ 72 p^4 + \quad 40,3 p^5 \\ \hline 165\,000 p^3 + 245\,000 p^2 \\ 165\,000 p^3 + \quad 92\,500 p^2 \\ \hline 152\,500 p^2 + 5\,200\,000 p \\ 152\,500 p^2 + \quad 85\,000 p \\ \hline 51\,150\,000 p + 2\,920\,000 \\ 51\,150\,000 p + 2\,900\,000 \\ \hline 20\,000 \end{array}$$

Поскольку по сравнению со свободным членом $D(p)$ остаток очень мал, им можно пренебречь.

p_k	$Q(p_k)$	$R'(p_k)$	A_k	φ_k (рад)
0				
-0,56	-1,56	6,24		
-0,5	-1,05	21		
-125	-84/100	$30,3 \cdot 10^7$		
$-0,46 \pm j 5,6$				
$-35,5 \pm j 405$	—	—	-0,06 $-1,58 \cdot 10^{-3}$	0,79 0,367

Частное от деления разлагается на еще более простые сомножители второго порядка. По трем последним членам частного подбирают двучлен $p^2 + 0,91p + 31$, на который это частное делится:

$$\begin{array}{r}
 p^4 + 72p^3 + 165\,000p^2 + 152\,500p + 5\,115\,000 \mid p^2 + 0,91p + 31 \\
 p^4 + 0,91p^3 + 31p^2 \\
 \hline
 71p^3 + 165\,000p^2 + 152\,500p \\
 71p^3 + 70p^2 + 2\,200p \\
 \hline
 165\,000p^2 + 150\,000p + 5\,115\,000 \\
 165\,000p^2 + 150\,000p + 5\,115\,000 \\
 \hline
 \end{array}$$

В результате разложения характеристический полином будет иметь вид:

$$pR = p(0,08p + 1)(2p + 1)(p + 0,56)(p^2 + 0,91p + 31) \times (p^2 + 71p + 165\,000) = 0.$$

Приравняв каждый из сомножителей к нулю, получают корни характеристического уравнения: $p_1 = 0$; $p_2 = -0,56$; $p_3 = -125$; $p_4 = -0,5$; $p_{5,6} = -0,46 \pm 5,6j$; $p_{7,8} = -35,5 \pm 405j$.

Для данных корней оригинал функции ошибки можно записать:

$$x''(t) = - \left[\frac{Q(0)}{R(0)} + \sum_1^3 \frac{(2,08 \cdot 10^{-6} p_k^5 + 2,02 \cdot 10^{-4} p_k^4 + 0,464 p_k^3 + 8,05 \cdot 10^{-6} p_k^6 + 5,76 \cdot 10^{-4} p_k^5 + 1,35 p_k^4 + 6,8 p_k^3 + 12,6 p_k^2 + 3,5) e^{-p_k t}}{20,8 p_k^3 + 128 p_k^2 + 196 p_k + 79,5} + \sum_1^2 2A_k e^{\alpha_k t} \cos(\beta_k t + \Phi_k) \right].$$

Для различных корней p_k числовые значения слагаемых сведены в таблицу, из которой видно, что слагаемые функции ошибки при $p_k = -125$ и $p_k = -35,5 \pm 405j$

α_k	β_k (рад)	$Q(0)$	$R(0)$	T_k (с)	f (Гц)
		3,5	20,6	—	—
				1,78	—
				2	—
				0,08	—
-0,46	5,6	—		2,18	0,89
-35,5	405			0,028	64,5

очень малы. Этими слагаемыми можно пренебречь. Тогда функция ошибки в окончательном виде

$$x''(t) = -0,17 + 0,25e^{-\frac{t}{1,78}} + 0,05e^{-\frac{t}{2}} - 0,06e^{-\frac{t}{2,18}} \times \cos(5,6t + 0,79).$$

Пример 71. Определить максимальное отклонение управляемого параметра и колебательность процесса, если передаточная функция замкнутой АСУ по управляющему воздействию $l(t)$ такова:

$$W(p)_z = \frac{0,022p^2 + 0,15p + 1}{0,014p^4 + 0,1p^3 + 2,6p^2 + p + 17,5} = \frac{Q(p)}{R(p)}.$$

Решение. Находим корни характеристического уравнения, представляющего собой полином $R(p)$. Разделив все члены на 0,014, приведем полином $R(p)$ к виду:

$$R(p) = p^4 + 7,15p^3 + 185p^2 + 71,5p + 1250 = 0.$$

Разделим $R(p)$ на двучлен $p^2 + 0,138p + 6,8$:

$$\begin{array}{r} p^4 + 7,15p^3 + 185p^2 + 71,5p + 1250 \mid p^2 + 0,138p + 6,8 \\ p^4 + 0,14p^3 + 6,8p^2 \\ \hline 7,01p^3 + 178,2p^2 + 71,5p \\ 7,01p^3 + + 47p \\ \hline 177,2p^2 + 24,5p + 1250 \\ 177,2p^2 + 24,5p + 1250 \\ \hline \end{array}$$

В результате разложения получим:

$$R(p) = (p^2 + 0,138p + 6,8)(p^2 + 7,01p + 177,2) = 0.$$

Приравняв каждый из сомножителей нулю, можно определить корни характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= \frac{-0,138 \pm \sqrt{0,138^2 - 4 \cdot 6,8}}{2} = \frac{0,138 \pm 5,22j}{2} = \\ &= -0,07 \pm j 2,6 = -2,6e^{\pm j 88^\circ 27'} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{3,4} &= \frac{-7,01 \pm \sqrt{7,01^2 - 4 \cdot 177,2}}{2} = -3,5 \pm j 13,3 = \\ &= -13,8e^{\pm j 75^\circ 18'}. \end{aligned}$$

Изображение выходного параметра $y(t)$ в соответствии с передаточной функцией $W(p)$ будет выглядеть так:

$$\Delta y(p) = \frac{0,022p^2 + 0,15p + 1}{(0,014p^4 + 0,1p^3 + 2,6p^2 + p + 17,5)p} = \frac{Q(p)}{pR(p)}.$$

Определим оригинал для найденных корней:

$$\begin{aligned}\Delta y(t) &= \frac{Q(0)}{R(0)} + \sum_1^2 2A_k e^{\alpha_k t} (\beta_k t + \phi_k) = \\ &= 0,057 - 0,14e^{-0,07t} \cos(2,6t + 1,8) + 0,04e^{-3,6t} \cos(13,3t + \\ &+ 0,1) = 0,057 - 0,14e^{-\frac{t}{14,2}} \cos(2,6t + 1,8) + \\ &+ 0,04e^{-\frac{t}{0,29}} \cos(13,3t + 0,1).\end{aligned}$$

Очевидно, что последним слагаемым Δy_3 можно пренебречь, поскольку величина его достаточно мала и очень велика степень затухания: при $t=0$ $\Delta y_3=0,004$, а при $t=1,2$ с $\Delta y_3=0$.

Тогда выражения для кривой переходного процесса

$$\Delta y(t) = 0,057 - 0,14e^{-0,07t} \cos(2,6t + 1,8).$$

Постоянная времени затухания $T = \frac{1}{0,07} = 14,3$ с,
частота

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2,6}{6,28} = 0,414 \text{ Гц.}$$

Придавая t различные значения, строим кривую $\Delta y(t)$ переходного процесса (рис. 52) и делаем вывод, что максимальное отклонение управляемого параметра $\Delta y_{1\max} = 11,5\%$, декремент затухания

$$d = \ln \frac{\Delta y_{1\max}}{\Delta y_2} = 0,95,$$

а количество колебаний $n = 4$.

Пример 72. Методом трапецидальных частотных характеристик построить кривую переходного процесса и определить показатели качества процесса управления, если передаточная функция разомкнутой АСУ

$$W(p)_p = \frac{400(0,05p + 1)}{p(0,1p + 1)(0,002p + 1)}.$$

Решение. Определим передаточную функцию замкнутой АСУ:

$$W(p)_z = \frac{W(p)_p}{1 + W(p)_p} = \frac{20p + 400}{0,0002p^3 + 0,102p^2 + 21p + 400}.$$

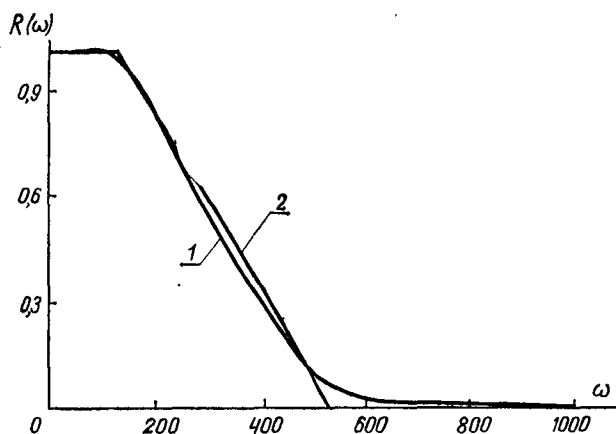


Рис. 53. Кривая вещественной части амплитудно-фазо-частотной характеристики (1) и ее трапецидальная аппроксимация (2).

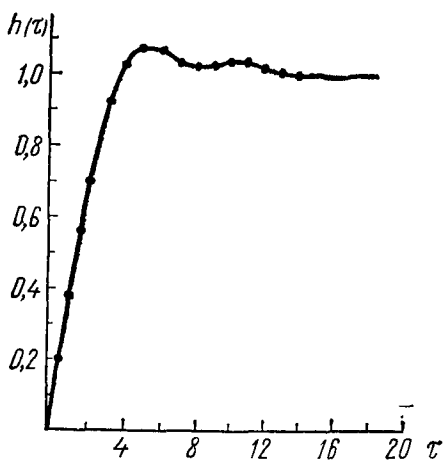


Рис. 54. Кривая переходного процесса выходного параметра АСУ.

Найдем амплитудно-фазочастотную характеристику АСУ:

$$W(j\omega) = \frac{20j\omega + 400}{-0,0002j\omega^3 - 0,102\omega^2 + 21j\omega + 400} = \\ = \frac{(160\,000 + 379\omega^2 - 0,004\omega^4) - j(400\omega + 1,96\omega^3)}{160\,000 + 360\omega^2 + 0,0016\omega^4 + 4 \cdot 10^{-8}\omega^6}.$$

Построим на рисунке 53 график кривой вещественной части характеристики:

$$R(\omega) = \frac{160\,000 + 379\omega^2 - 0,004\omega^4}{160\,000 + 360\omega^2 + 0,0016\omega^4 + 4 \cdot 10^{-8}\omega^6},$$

который позволяет определить необходимые параметры:

$$R(0) = 1; \omega_0 = 530 \text{ рад}; \omega_1 = 140 \text{ рад};$$

$$\kappa = \frac{\omega_1}{\omega_0} = 0,264; \quad \tau = \frac{t}{\omega_0}.$$

По таблице [8] находим значения $h(\tau)$ в зависимости от τ и вычисляем

$$y(t) = R(0) \cdot h(\tau); \quad t = \frac{\tau}{\omega_0}.$$

Кривая переходного процесса $h(\tau) = y(\tau)$ изображена на рисунке 54. График показывает, что процесс колебательный. АСУ совершает всего два колебания. Максимальное отклонение управляемого параметра $\Delta y_{1\max} = 6\%$.

Очевидно, качество процесса управления вполне удовлетворительное.

Пример 73. Оценить качество переходного процесса АСУ при помощи квадратичного интегрального критерия, если передаточная функция по ошибке

$$\Phi_x(p) = \frac{5,6 \cdot 10^{-6}p^6 + 5,5 \cdot 10^{-3}p^5 + 0,55p^4 + 9,5p^3 + 115p^2 + 990p + 1000}{5,6 \cdot 10^{-6}p^6 + 5,5 \cdot 10^{-3}p^5 + 0,55p^4 + 9,5p^3 + 619p^2 + 14\,900p + 37\,000}.$$

Решение. Находим изображение функции ошибки:

$$x(p) = \frac{5,6 \cdot 10^{-6}p^6 + 5,5 \cdot 10^{-3}p^5 + 0,55p^4 + 9,5p^3 + 115p^2 + 990p + 1000}{(5,6 \cdot 10^{-6}p^6 + 5,5 \cdot 10^{-3}p^5 + 0,55p^4 + 9,5p^3 + 619p^2 + 14\,900p + 37\,000)p}.$$

Затем $J_2 = \int_0^{\infty} x^2 dt$. Отсюда для случая $m = n$ можно

записать:

$$J_3 = \frac{1}{2a_0^2 \Delta} (B'_6 \Delta_6 + B'_5 \Delta_5 + B'_4 \Delta_4 + B'_3 \Delta_3 + B'_2 \Delta_2 + B'_1 \Delta_1) - \frac{b'_6 b'_5}{a_0^2};$$

$$B'_6 = b_0^2 \left(\frac{b_6}{b_0} - \frac{a_6}{a_0} \right)^2; \quad B'_5 = b_0^2 \left[\left(\frac{b_5}{b_0} - \frac{a_5}{a_0} \right)^2 - \right. \\ \left. - 2 \left(\frac{b_6}{b_0} - \frac{a_6}{a_0} \right) \left(\frac{b_4}{b_0} - \frac{a_4}{a_0} \right) \right];$$

$$B'_4 = b_0^2 \left[\left(\frac{b_4}{b_0} - \frac{a_4}{a_0} \right)^2 - 2 \left(\frac{b_5}{b_0} - \frac{a_5}{a_0} \right) \left(\frac{b_3}{b_0} - \frac{a_3}{a_0} \right) + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{b_6}{b_0} - \frac{a_6}{a_0} \right) \left(\frac{b_2}{b_0} - \frac{a_2}{a_0} \right) \right];$$

$$B'_3 = b_0^2 \left[\left(\frac{b_3}{b_0} - \frac{a_3}{a_0} \right)^2 - 2 \left(\frac{b_4}{b_0} - \frac{a_4}{a_0} \right) \left(\frac{b_2}{b_0} - \frac{a_2}{a_0} \right) + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{b_5}{b_0} - \frac{a_5}{a_0} \right) \left(\frac{b_1}{b_0} - \frac{a_1}{a_0} \right) \right];$$

$$B'_2 = b_0^2 \left[\left(\frac{b_2}{b_0} - \frac{a_2}{a_0} \right)^2 - 2 \left(\frac{b_3}{b_0} - \frac{a_3}{a_0} \right) \left(\frac{b_1}{b_0} - \frac{a_1}{a_0} \right); \right.$$

$$B'_1 = b_0^2 \left(\frac{b_1}{b_0} - \frac{a_1}{a_0} \right)^2; \quad b'_6 = b_0 \left(\frac{b_6}{b_0} - \frac{a_6}{a_0} \right);$$

$$b'_5 = b_0 \left(\frac{b_5}{b_0} - \frac{a_5}{a_0} \right).$$

Изображение $x(p)$ показывает, что $b_0 = a_0$, $b_1 = a_1$, $b_2 = a_2$, $b_3 = a_3$, $b_4 = a_4$. В таком случае $B'_1 = B'_2 = B'_3 = B'_4 = 0$,

$$B'_5 = 5,6 \cdot 10^{-12} \left[\left(\frac{990}{5,6 \cdot 10^{-6}} - \frac{14\,900}{5,6 \cdot 10^{-6}} \right)^2 - 2 \left(\frac{1000}{5,6 \cdot 10^{-6}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{37\,000}{5,6 \cdot 10^{-6}} \right) \left(\frac{115}{5,6 \cdot 10^{-6}} - \frac{619}{5,6 \cdot 10^{-6}} \right) \right] = 1,57 \cdot 10^8;$$

$$B'_6 = 5,6 \cdot 10^{-12} \left(\frac{1000}{5,6 \cdot 10^{-6}} - \frac{37\,000}{5,6 \cdot 10^{-6}} \right)^2 = 1,3 \cdot 10^9;$$

$$b'_6 = 5,6 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1000}{5,6 \cdot 10^{-6}} - \frac{37\,000}{5,6 \cdot 10^{-6}} \right) = -36\,000;$$

$$b'_5 = 5,6 \cdot 10^{-6} \left(\frac{990}{5,6 \cdot 10^{-6}} - \frac{14\,900}{5,6 \cdot 10^{-6}} \right) = -13\,900.$$

Из коэффициентов характеристического многочлена можно составить матрицу:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 37\,000 & -619 & 0,55 & -5,6 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 14\,900 & -9,5 & 5,5 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & -37\,000 & 619 & -0,55 & 5,6 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & -14\,900 & 9,5 & -5,5 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 37\,000 & -619 & 0,55 & -5,6 \cdot 10^{-6} \\ 0 & 0 & 0 & 14\,900 & -9,5 & 5,5 \cdot 10^{-3} \end{vmatrix} = \\ = 9,9 \cdot 10^9.$$

Заменяя в определителе $(m - k + 1)$ -й столбец столбцом, находим определитель Δ_2 :

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 14\,900 & 37\,000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14\,900 & -619 & 0,55 & -5,6 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 37\,000 & 14\,900 & -9,5 & 5,5 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & -37\,000 & 619 & -0,55 & 5,6 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & -14\,900 & 9,5 & -5,5 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 37\,000 & -619 & 0,55 & -5,6 \cdot 10^{-3} \\ 0 & 0 & 0 & 14\,900 & -9,5 & 5,5 \cdot 10^{-3} \end{vmatrix} = 4 \cdot 10^9;$$

Аналогично подсчитываем $\Delta_1 = 2,36 \cdot 10^{11}$ и $\Delta_0 = 0$.
Окончательно квадратичная интегральная оценка

$$J_2 = \frac{1}{2a_6^2 \Delta} (B'_6 \Delta_6 + B'_5 \Delta_5) - \frac{b'_6 \cdot b'_5}{a_6^2} =$$

$$= \frac{(1,3 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^9 + 1,57 \cdot 10^8 \cdot 2,36 \cdot 10^{11})}{2,74 \cdot 10^9 \cdot 9,9 \cdot 10^9} - \frac{(-36\,000) \cdot (-14\,000)}{37\,000^2} \approx 1,2.$$

Величина J_2 не является абсолютной оценкой качества. Только при получении ряда значений J_2 , обусловленных изменением какого-либо параметра, минимальному из них будет соответствовать наилучший переходный процесс. Поэтому интегральные оценки можно использовать при выборе оптимального значения какого-либо параметра системы, обеспечивающего минимум J_2 .

Как показало решение задачи, интегральные оценки целесообразно применять для АСУ, описываемых уравнением не выше 5—6-го порядка. В случае более высоких порядков приходится делать громоздкие вычисления, снижающие практическую ценность этого метода.

Пример 74. Определить значение коэффициентов усиления АСУ, соответствующего минимуму квадратичной интегральной оценки при типовом единичном воздействии $g(t) = 1(t)$, если передаточная функция разомкнутой АСУ

$$W(p)_p = \frac{k_c}{p(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)},$$

где $T_1 = 0,04$ с, а $T_2 = 0,1$ с.

Решение. Передаточная функция замкнутой АСУ

$$W(p)_3 = \frac{k_c}{T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2) p^2 + p + k_c}.$$

Изображение

$$\Delta y(p) = \frac{k_c}{[T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2) p^2 + p + k_c]} p.$$

Квадратичная интегральная оценка запишется

$$J_2 = \frac{B_1 \Delta_1}{2a_3^2 \Delta} = \frac{\Delta_1}{2\Delta},$$

где $B_1 = k_c^2$, $a_3 = k_c$.

Из коэффициентов характеристического многочлена $\Delta y(p)$ составим матрицу:

$$\Delta = \begin{vmatrix} k_c - (T_1 + T_2) & 0 \\ 0 & 1 - T_1 T_2 \\ 0 & -k_c \end{vmatrix} = k_c (T_1 + T_2) - k_c^2 T_1 T_2.$$

Для Δ_1 можно записать:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & -(T_1 + T_2) & 0 \\ k_c & 1 & -T_1 T_2 \\ 0 & -k_c & (T_1 + T_2) \end{vmatrix} = (T_1 + T_2) - k_c T_1 T_2 + (T_1 T_2)^2 k_c.$$

В окончательном виде

$$\begin{aligned} J_2 &= \frac{T_1 + T_2 - k_c T_1 T_2 + k_c (T_1 + T_2)^2}{2k_c (T_1 + T_2) - k_c^2 T_1 T_2} = \\ &= \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{k_c} + \frac{(T_1 + T_2)^2}{(T_1 + T_2 - k_c T_1 T_2)} \right]. \end{aligned}$$

Минимум величины интегральной оценки будет при $\frac{dJ_2}{dk_c} = 0$:

$$\frac{dJ_2}{dk_c} = \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{k_c^2} + \frac{T_1 T_2 (T_1 + T_2)^2}{(T_1 + T_2 - k_c T_1 T_2)^2} \right] = 0.$$

Отсюда коэффициент усиления

$$k_c = \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2 + (T_1 + T_2) \sqrt{T_1 T_2}}.$$

Подставив в выражение для k_c заданные значения T_1 и T_2 , получим

$$k_c = \frac{0,14}{0,014 + 0,14 \sqrt{0,014}} \approx 4,7.$$

Глава VI

РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ



§ 1. ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

При больших параметрах существенных нелинейностей или при значительных отклонениях управляемого параметра нелинейную АСУ уже нельзя свести к некоторой линейной модели. Необходимо считаться с наличием нелинейности.

Существуют статические и динамические нелинейные элементы. У первых статическая характеристика описывается нелинейным уравнением, у вторых — динамическая. Наиболее распространенные виды нелинейных элементов и уравнения, описывающие их характеристики [5, 8, 16], представлены в таблице 2.

По сравнению с линейными особенностью нелинейных систем является то, что в них могут возникать устойчивые собственные колебания с постоянной амплитудой при отсутствии внешних возмущений. Этот процесс называют *автоколебаниями АСУ*. В режиме автоколебаний установившееся состояние, соответствующее постоянному значению управляемого параметра, не наступает. Если для линейных АСУ различают два состояния — устойчивое и неустойчивое, то для нелинейных АСУ их больше.

Для нелинейных автоматических систем управления различают: 1) область устойчивого равновесного состояния с постоянным значением управляемой величины; 2) область устойчивых автоколебаний; 3) область неустойчивости системы; 4) область более сложных состояний системы.

Очевидно, нелинейности способны оказывать как вредное, так и полезное влияние на работу АСУ. Нелинейные АСУ по своим возможностям могут быть значительно богаче и разнообразнее линейных. При помощи нелинейных законов управления и нелинейных корректирующих звеньев можно существенно повысить качество работы систем, достигая в то же время предельного конструктивного упрощения.

Однако нелинейные АСУ пока еще недостаточно изучены. Трудность состоит в том, что нет общих методов решения нелинейных дифференциальных уравнений, позволяющих полнее выделить положительные возможности и освободиться от вредных.

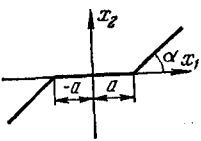
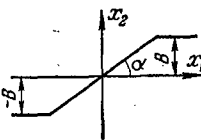
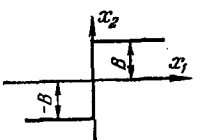
Тем не менее существует ряд аналитических и графоаналитических методов, которые помогают составить достаточно полное представление о качестве нелинейных систем (2, 10, 20). Наибольшее распространение в теории автоматического управления получили следующие методы: последовательных приближений, ломаных Эйлера, гармонической линеаризации и математического моделирования (последний метод будет самостоятельно рассмотрен в главе VII).

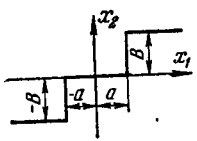
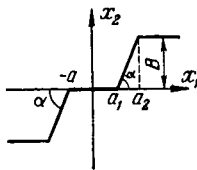
Метод последовательных приближений позволяет решить любое дифференциальное (линейное и нелинейное) уравнение, если

Виды нелинейных элементов и уравнения их характеристик

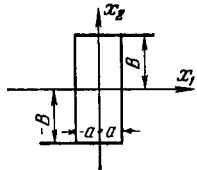
Название нелинейности	Аналитическая связь между входом и выходом	
	статических характеристик	динамических характеристик

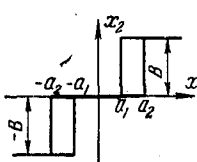
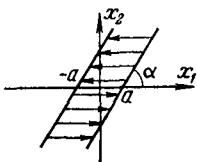
Однозначные характеристики

Зона нечувствительности 	$x_2 = 0$ при $x_1 \leq a$ $x_2 = -ka + kx_1$ при $x_1 \geq a$ $x_2 = ka - kx_1$ при $x_1 < -a$ $k = \operatorname{tg} \alpha$	$q(A) =$ $= k - \frac{2\pi}{k} \cdot \left(\arcsin \frac{a}{A} + \right.$ $\left. + \frac{a}{A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}} \right)$ при $A \geq a$ $q'(A) = 0$
Ограничение, по выходной величине 	$x_2 = kx_1$ при $x_1 \leq \frac{B}{k}$ $x_2 = B$ при $x_1 \geq \frac{B}{k}$ $x_2 = -B$ при $x_1 \leq -\frac{B}{k}$ $k = \operatorname{tg} \alpha$	$q(A) = \frac{2k}{\pi} \times$ $\times \left(\arcsin \frac{a}{A} - \right.$ $\left. - \frac{a}{A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}} \right)$ при $A \geq a$ $q'(A) = 0$
Идеальная релейная 	$x_2 = B$ при $x_1 > 0$ $x_2 = -B$ при $x_1 < 0$	$q(A) = \frac{4B}{\pi a}$ $q'(A) = 0$

Название нелинейности	Аналитическая связь между входом и выходом	
	статических характеристик	динамических характеристик
Релейная с зоной нечувствительности 	$x_2 = B$ при $x_1 \geq a$ $x_2 = 0$ при $-a \leq x_1 \leq a$ $x_2 = -B$ при $x_1 \leq -a$	$q(A) = \frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}$ при $A \geq a$ $q'(A) = 0$
Зона нечувствительности и насыщение 	$x_2 = B$ при $x_1 \geq a_2$ $x_2 = 0$ при $-a_1 \leq x_1 \leq +a_1$ $x_2 = k \cdot x_1 - k \cdot a_1$ при $a_2 \geq x_1 \geq a_1$ $k = \operatorname{tg} \alpha$ $x_2 = k \cdot a_1 - k \cdot x_1$ при $-a_2 \leq x_1 \leq -a_1$ $x_2 = -B$ при $x_1 \leq -a_2$	$q(A) = \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{a_2}{A} - \arcsin \frac{a_1}{A} + \right.$ $\left. + \frac{a_2}{A} \sqrt{1 - \frac{a_2^2}{A^2}} - \frac{a_1}{A} \sqrt{1 - \frac{a_1^2}{A^2}} \right)$ при $A > a_2$ $q'(A) = 0$

Неоднозначные характеристики

Релейная с гистерезисом 	$\left. \begin{array}{l} x_2 = B \\ \text{при } x_1 \geq a \\ x_2 = -B \\ \text{при } x_1 \leq -a \end{array} \right\} x' > 0$ $\left. \begin{array}{l} x_2 = B \\ \text{при } x_1 \geq -a \\ x_2 = -B \\ \text{при } x_1 < -a \end{array} \right\} x' < 0$	$q(A) = \frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}$ $q'(A) = \frac{4Ba}{\pi A^2}$ при $A \geq a$
---	---	---

Название нелинейности	Аналитическая связь между входом и выходом	
	статических характеристик	динамических характеристик
Релейная с зоной нечувствительности и гистерезисом 	$\left. \begin{array}{l} x_2 = B \\ \text{при } x_1 > a_2 \\ x_2 = 0 \\ \text{при } -a_1 \leq x_1 \leq a_2 \\ x_2 = -B \\ \text{при } x_1 \leq -a_1 \end{array} \right\} x' > 0$ $\left. \begin{array}{l} x_2 = B \\ \text{при } x_1 \geq a_1 \\ x_2 = 0 \\ \text{при } -a_2 \leq x_1 \leq a_1 \\ x_2 = -B \\ \text{при } x_1 \leq -a_2 \end{array} \right\} x' < 0$	$q(A) = \frac{2B}{\pi A} \left(\sqrt{1 - \frac{a_2^2}{A^2}} + \sqrt{1 - \frac{a_1^2}{A^2}} \right)$ $q'(A) = \frac{2B}{\pi A^2} (a_2 - a_1)$ при $A \geq a_2$
Люфт, или зазор 	$\begin{array}{l} x_2 = kx - ka \\ \text{при } x'_1 > a \\ x_2 = ka - kx \\ \text{при } x'_1 < -a \\ \frac{dx_2}{dx_1} = 0 \\ \text{при } \left \frac{x_2}{k} \right - x_1 < a \end{array}$	$q(A) = \frac{k}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(1 - \frac{2a}{A} \right) + 2 \left(1 - \frac{2a}{A} \right) \times \sqrt{\frac{a}{A} \left(1 - \frac{a}{A} \right)} \right]$ $q'(A) = -\frac{4k}{\pi A} \left(1 - \frac{a}{A} \right)$ при $A \geq a$

оно удовлетворяет теореме существования и единственности. Сущность этого метода состоит в следующем.

Для дифференциального уравнения

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x)$$

требуется найти решение $x = \xi(t)$ при начальных условиях $\xi(t_0) = x_0$ [10].

Доказано, что для уравнения $\frac{dx}{dt}$ с принятыми начальными усло-

виями эквивалентно интегральное уравнение

$$\xi(t) = x_0 + \int_0^t f[\tau; \xi(\tau)] d\tau.$$

В начальном приближении можно принять $\xi_0 t = x_0$. Это условие представляют вместо $\xi(t)$ и находят решение первого приближения:

$$\xi_1(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f[\tau; \xi_0(\tau)] d\tau.$$

В последующих приближениях подставляют

$$\xi(t) = \xi_2(t) \dots; \quad \xi(t) = \xi_n(t).$$

Тогда для n -го приближения можно записать:

$$\xi_n(t) = x_0 + \int_0^t f[\tau; \xi_n(\tau)] d\tau.$$

При $n \rightarrow \infty$ $\xi_n(t) \rightarrow \xi(t)$.

Аналогично находят решение $y = \xi(t)$ системы дифференциальных уравнений $\frac{dy_i}{dt} = f_i(t; y_1; \dots; y_n)$, удовлетворяющее начальным условиям $\xi_i(t_0) = y_{i0}$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

Методу присущ ряд недостатков: 1) в некоторых случаях при вычислении какого-то приближения нельзя рассчитать интеграл; 2) при невысокой скорости сходимости последовательности $\xi_n(t) = \xi(t)$ требуется вычислять большое число членов приближения; 3) решения почти всегда получают в виде бесконечного ряда, и если нельзя вычислить сумму этого ряда, то анализ результатов решения затруднителен. Вследствие этих недостатков применение метода ограничено.

Метод ломаных Эйлера рассмотрим на примере вышеупомянутых уравнений при тех же исходных условиях $\xi(t_0) = x_0$ [10].

Некоторое k -е приближенное решение этого уравнения будет стремиться к искомому точному решению при $k \rightarrow 0$. Поэтому на плоскости t, x построим δ -сеть (рис. 55), где при $(t - \tilde{t}) < \delta$ $(x - \tilde{x}) < \delta$; $k > 0$ справедливо неравенство $|f(\tilde{t}; \tilde{x}) - f(t; x)| < x_0$. Из точки $t_0; x_0$ проведем прямую $(x - x_0) = f(t_0; x_0)(t - t_0)$ до пересечения с одной из сторон δ -сетки. Точку пересечения обозначим $(t_1; x_1)$. Далее вычертим линию $(x - x_1) = f(t_1; x_1)(t - t_1)$. Пропедев так несколько раз, получим ломаную линию, которая аппроксимирует искомую интегральную кривую. В зависимости от величины шага δ можно получить любую наперед заданную степень точности.

Фазовый метод является графическим решением дифференциального уравнения. Этот график называют *фазовым портретом*, а саму кривую — *фазовой траекторией*, которая отражает движение некоторой изображающей точки M . График дает наглядное представление о харак-

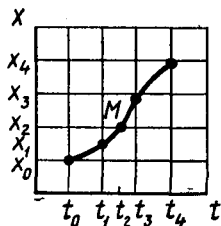


Рис. 55. Построение интегральной кривой.

тере процесса в системе (исключая его временную оценку, поскольку временный параметр здесь не рассматривается).

Этот метод применим, как правило, для нелинейных систем второго порядка. В устойчивой системе изображающая точка при $t \rightarrow \infty$ приближается к началу координат, а неустойчивой — уходит в бесконечность.

Для построения графика переходного процесса АСУ дифференциальное уравнение второго порядка приводят к системе уравнения первого порядка [2]:

$$\frac{dy}{dt} = Q(x, y),$$

$$\frac{dx}{dt} = R(x, y),$$

где x — отклонение управляемого параметра от установившегося значения;

$y = \frac{dx}{dt}$ — скорость изменения управляемого параметра;

Q, R — нелинейные функции от выходной величины x и ее производной.

Делением первого уравнения на второе удастся исключить параметр времени и получить нелинейное уравнение первого порядка фазовой траектории:

$$\frac{Q(x; y)}{R(x; y)} = \frac{dy}{dx}.$$

Построение фазового портрета в координатах y и x не требует решения полученного уравнения. Оно может быть выполнено методом *изоклин*. Изоклина — геометрическое место точек с одинаковым наклоном фазовых траекторий, проходящих через эти точки. Изоклина получается из алгебраического уравнения

$$\frac{Q(x; y)}{R(x; y)} = C,$$

где C — постоянная величина, которая может принимать значения от $-\infty$ до $+\infty$.

Следовательно, каждому значению C будет соответствовать своя линия — изоклина, а значение C — определять тангенс угла наклона фазовой траектории относительно оси абсцисс.

Если имеется возможность решить уравнение фазовой траектории, то точность построения фазовой траектории повысится. В этом случае не нужно строить изоклины, так как получена непосредственная зависимость $y = f(x)$.

В нелинейных системах с характеристиками, указанными, например, в таблице 2, правая часть уравнения будет представлять набор нескольких уравнений, определяющих поведение АСУ на отдельных линейных участках нелинейной характеристики. В точках излома характеристики *припасовываются* или, еще говорят, *сшиваются*. Поэтому и метод этот называют методом припасовывания.

Фазовый портрет позволяет оценить: переходный процесс при известной совокупности начальных условий; вид переходного процесса (апериодический или колебательный); величину перерегулирования; устойчивость; частоту и амплитуду автоколебаний; влияние отдельных

нелинейностей на динамику процесса; коррекцию АСУ линейными или нелинейными звеньями.

К недостаткам фазового метода следует отнести то, что он практически применим для уравнений не выше второго, третьего порядков. Подробное обоснование фазового метода можно посмотреть в специальной литературе [2, 10].

Метод гармонической линеаризации основан на предположении о том, что в рассматриваемой нелинейной системе имеется режим периодических колебаний с заранее неизвестными амплитудой A и частотой Ω . Периодические колебания могут быть следствием гармонического возмущающего воздействия или наличия автоколебаний в системе. Параметры, характеризующие динамику системы, являются периодическими функциями времени, разлагаемыми в ряд Фурье. При гармонической линеаризации, как правило, ограничиваются только первыми двумя членами разложения.

Метод гармонической линеаризации может применяться для всех видов нелинейных уравнений при условии колебательных процессов в АСУ.

В процессе решения совокупности линейной части уравнений АСУ относительно параметров нелинейного звена может получиться обобщенное уравнение [20]:

$$Q(p)x_1 = -R(p)x_2.$$

Уравнение нелинейного звена в зависимости от вида нелинейности (таблица 2) можно в общем случае выразить как

$$x_2 = F(x_1).$$

При существенных нелинейностях автоколебания, строго говоря, имеют нелинейную форму. Мы подразумеваем, что для x_1 они близки к синусоиде, вследствие того, что линейная часть звеньев является фильтром низких частот и не пропускает колебаний высокой частоты. Тогда можно записать

$$x_1 = A \sin \Omega t,$$

где A и Ω — искомые амплитуда и частота автоколебаний на выходе АСУ.

Подставив зависимость x_1 в уравнение x_2 и разложив полученное выражение в ряд Фурье, получим:

$$x_2 = F(A \sin \Omega t) = C_0 + D_1 \sin \Omega t + C_1 \cos \Omega t + \dots,$$

где C_0 , C_1 , D_1 — коэффициенты ряда Фурье.

В большинстве случаев нелинейные характеристики звеньев симметричны относительно начала координат, тогда $C_0 = 0$.

В полученном разложении можно выполнить следующую замену:

$$\sin \Omega t = \frac{x_1}{A}; \quad \cos \Omega t = \frac{\rho x_1}{A\Omega}$$

и на основании ее записать

$$x_2 = q(A)x_1 + \frac{q'(A)}{\Omega} \rho x_1,$$

где

$$q(A) = \frac{D_1}{A} = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} F(A \sin \Omega t) \sin \Omega t d\Omega t;$$

$$q'(A) = \frac{C_1}{A} = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} F(A \sin \Omega t) \cos \Omega t d\Omega t.$$

На основании этих преобразований можно выявить передаточную функцию нелинейного звена:

$$W(p)_H = \frac{x_2}{x_1} = q(A) + \frac{q'(A)}{\Omega} p,$$

что позволяет получить линеаризованное характеристическое уравнение всей АСУ:

$$Q(p) + R(p) \left[q(A) + \frac{q'(A)}{\Omega} p \right] = 0.$$

Задача состоит в отыскании значений A и Ω в этом уравнении. Решение может быть найдено, например, из условий критерия Гурвица для АСУ, находящейся на грани устойчивости, когда совершаются гармонические колебания. Выражение для границы устойчивости по Гурвицу запишется так:

$$\alpha_n(A; \Omega) = 0 \quad \Delta_{n-1}(A; \Omega) = 0.$$

Отсюда можно найти A и Ω .

В общем виде

$$\Omega^2 = \frac{\alpha_n \Delta_{n-3}}{\Delta_{n-2}}.$$

Таким образом, нетрудно заключить, что метод гармонической линеаризации является приближенным. Он позволяет выявить существование периодического решения нелинейного дифференциального уравнения, определить устойчивость нелинейной АСУ и найти параметры ее автоколебаний.

§ 2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ АСУ

Пример 75. Методом последовательных приближений с точностью до четвертого порядка определить функции изменения входного и выходного параметров во времени, если АСУ описывается системой уравнений:

$$\frac{dx}{dy} = x + y,$$

$$\frac{dy}{dt} = 3y - 2x$$

при начальных условиях $x(0) = 2$, $y(0) = -1$.

Решение. Для x и y соответственно можно записать:

$$x = 2 + \int_0^t [x(\tau) + y(\tau)] d\tau; \quad y = -1 + \int_0^t [3y(\tau) - 2x(\tau)] d\tau.$$

Поскольку в качестве начального приближения приняты $x(0) = 2$, $y(0) = -1$, то в первом приближении функции будут выглядеть так:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= 2 + \int_0^t d\tau = 2 + t; \quad y_1(t) = \\ &= -1 + \int_0^t [-3 - 4] d\tau = -1 - 7t. \end{aligned}$$

Во втором приближении

$$\begin{aligned} x_2(t) &= 2 + \int_0^t [2 + \tau - 1 - 7\tau] d\tau = 2 + t - 3t^2; \\ y_2(t) &= -1 + \int_0^t [-3 - 21\tau - 4 - 2\tau] d\tau = -1 - 7t - 11,5t^2. \end{aligned}$$

В третьем приближении

$$\begin{aligned} x_3(t) &= 2 + \int_0^t [2 + \tau - 3\tau^2 - 1 - 7\tau - 11,5, 5\tau^2] d\tau = \\ &= 2 + t - 3t^2 - \frac{14,5}{3}t^3; \\ y_3(t) &= -1 + \int_0^t [-3 - 21\tau - 34,5\tau^2 - 4 - 2\tau + 6\tau^2] d\tau = \\ &= -1 - 7t - 11,5t^2 - \frac{28,5}{3}t^3. \end{aligned}$$

В четвертом приближении

$$\begin{aligned} x_4(t) &= 2 + \int_0^t \left[2 + \tau - 3\tau^2 - \frac{14,5}{3}\tau^3 - 1 - 7\tau - 11,5\tau^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{28,5}{3}\tau^3 \right] d\tau = 2 + t - 3t^2 - \frac{14,5}{3}t^3 - \frac{53}{12}t^4; \end{aligned}$$

$$y_4(t) = -1 + \int_0^t [-3 - 21\tau - 34,5\tau^2 - 28,5\tau^3 - 4 - 2\tau + 6\tau^2 + \\ + \frac{29}{3}\tau^3] d\tau = -1 - 7t - 11,5t^2 - \frac{28,5}{3}t^3 - \frac{56,5}{12}t^4.$$

Точное решение заданной системы уравнений представится выражениями

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{2t} (2 \cos t - 3 \sin t); \\ y(t) &= -e^{2t} (\cos t + 5 \sin t). \end{aligned}$$

Разложение этих функций в ряд Тейлора до пятого члена ряда полностью будет соответствовать результатам приближенного решения.

Пример 76. С точностью до второго приближения определить изменение входного и выходного параметров АСУ во времени, если она описывается уравнениями

$$\begin{cases} x'' + y'' + y + x = 0 \\ x' + 2y'' + y' + 2x = 0, \end{cases}$$

а условия предшествующего установившегося режима (начальные) таковы:

$$\begin{aligned} x(0) &= 6; \quad x'(0) = 3; \quad x''(0) = 6; \\ y(0) &= -2; \quad y'(0) = +5; \quad y''(0) = -10. \end{aligned}$$

Решение. Из условий задачи найдем, что

$$\begin{cases} x'' = -(y'' + y + x) \\ y'' = -0,5(x' + y' + 2x) \end{cases} \quad (a)$$

и

$$\begin{cases} x' = -(2y'' + y' + 2x) \\ y' = -(x' + 2x + 2y'') \end{cases} \quad (б)$$

Из системы уравнений (а) можно найти приближенные значения $x'(t)$ и $y'(t)$, а из системы (б) — соответственно $x(t)$ и $y(t)$:

$$\left. \begin{aligned} x'(t) &= x'(0) - \int_0^t [y''(\tau) + y(\tau) + x(\tau)] d\tau \\ y'(t) &= y'(0) - 0,5 \int_0^t [x'(\tau) + y'(\tau) + 2x(\tau)] d\tau \end{aligned} \right\} \quad (c)$$

и

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x(0) - \int_0^t [2y''(\tau) + y'(\tau) + 2x(\tau)] d\tau \\ y(t) &= y(0) - \int_0^t [x'(\tau) + 2x(\tau) + 2y''(\tau)] d\tau \end{aligned} \right\} (d)$$

Для заданных начальных условий в первом приближении

$$x_1'(t) = 3 - \int_0^t [-10 - 2 + 6] d\tau = 3 + 6t,$$

$$y_1'(t) = 5 - 0,5 \int_0^t [3 + 5 + 2 \cdot 6] d\tau = 5 - 10t$$

и

$$x_1(t) = 6 - \int_0^t [-20 + 5 - 10\tau + 12] d\tau = 6 + 3t + 5t^2,$$

$$\begin{aligned} y_1(t) &= -2 - \int_0^t [3 + 6\tau + 2 \cdot 6 + 2(-10)] d\tau = \\ &= -2 + 5t - 3t^2. \end{aligned}$$

Подставив в уравнения (с) и (d) соответствующие значения первых приближений, можно получить во втором приближении:

$$\begin{aligned} x_2'(t) &= 3 - \int_0^t (-10 - 2 + 5\tau - 3\tau^2 + 6 + 3\tau + 5\tau^2) d\tau = \\ &= 3 + 6t - 4t^2 - \frac{2}{3}t^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_2'(t) &= 5 - 0,5 \int_0^t (3 + 6\tau + 5 - 10\tau + 12 + 6\tau + 10\tau^2) d\tau = \\ &= 5 - 10t - \frac{1}{2}t^2 - \frac{5}{3}t^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_2(t) &= 6 - \int_0^t \left(-20 - 2\tau - 10\tau^2 + 5 - 10\tau - \frac{1}{2}\tau^2 - \frac{5}{3}\tau^3 + \right. \\ &\quad \left. + 12 + 6\tau + 10\tau^2 \right) d\tau = 6 + 3t + 3t^2 + \frac{1}{6}t^3 + \frac{5}{12}t^4; \end{aligned}$$

$$y_2(t) = -2 - \int_0^t \left(3 + 6\tau - 4\tau^2 - \frac{2}{3}\tau^3 - 20 - 2\tau - 10\tau^2 + \right. \\ \left. + 12 + 6\tau + 10\tau^2 \right) d\tau = -2 + 5t - 5t^2 + \frac{4}{3}t^3 + \frac{1}{6}t^4.$$

Пример 77. Для нелинейной системы управления найти изменение выходного параметра во времени, если его дифференциальное уравнение [10]

$$\frac{dy}{dt} = -y \cos t,$$

начальное значение параметра $y(0) = 1$, а допустимая погрешность расчета 0,1.

Решение. Функцию $y = \xi(t)$ выявляем на отрезке $(0; 1)$. Принимаем шаг δ -сети, исходя из условий заданной точности $\delta = 0,1$.

Из точки с координатами $(0; 1)$ проведем прямую (см. рис. 56) $y - 1 = -1 \cdot \cos 0 \cdot (t - 0) = 1 - t$ до пересечения с одной из сторон квадрата. Получили точку $M(0,1; 0,9)$. Из этой новой точки проведем прямую $y - 0,9 = -0,9 \times \cos 0,1 (t - 0,1)$ до пересечения со стороной δ -сети. Результаты дальнейших построений сведены и представлены ниже и по значениям $\xi(t)$ вычерчены функции выходного параметра во времени (рис. 56).

t	0	0,1	0,2	0,3	0,4
$\xi(t)$	1	0,9	0,81	0,741	0,67
$f(t, y)$	-1	-0,896	-0,795	-0,707	-0,616
$-\cos t$	-1	-0,995	-0,986	-0,955	-0,921

t	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\xi(t)$	0,608	0,555	0,509	0,47	0,437
$f(t, y)$	-0,532	-0,46	-0,39	-0,329	-0,27
$-\cos t$	-0,877	-0,825	-0,765	-0,7	-0,62

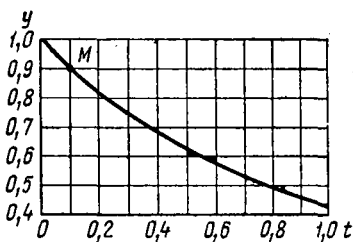


Рис. 56. Функция изменения выходного параметра нелинейной системы.

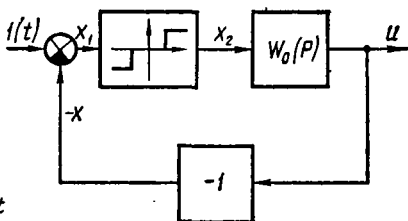


Рис. 57. Структурная схема АСУ.

Пример 78. Построить траекторию изображающей точки M на фазовой плоскости для нелинейной АСУ, изображенной на рисунке 57, если передаточная функция линейного элемента при условиях

$$x(0) = 2, \quad x'(0) = 3,$$

$$W_0(p) = \frac{2}{p(1,5p+1)},$$

а параметры нелинейного звена $a = 1$; $B = 1$ (обозначения даны в таблице 2).

Решение. В соответствии со схемой уравнение движения нелинейной АСУ можно записать в виде

$$1,5 \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} = -2F(x_1).$$

Поскольку функция $F(x_1)$ имеет три постоянных значения B , 0 , $-B$, характеристика нелинейного элемента может быть разбита на три участка I , II , III , для каждого из которых составим линейное дифференциальное уравнение:

$$(I) \quad 1,5 \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} = -2B;$$

$$(II) \quad 1,5 \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} = 0;$$

$$(III) \quad 1,5 \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} = 2B.$$

Границами этих областей служат прямые $x_1 = a$; $x_1 = -a$.

Координатам фазовой плоскости соответствуют координаты АСУ

$$u = x; \quad y = \frac{du}{dt} = \frac{dx}{dt}.$$

Для каждой устойчивой области уравнения движения АСУ можно записать в координатах фазовой плоскости:

$$(I) \quad 1,5 \frac{dy}{dt} + y = -2B;$$

$$(II) \quad 1,5 \frac{dy}{dt} + y = 0;$$

$$(III) \quad 1,5 \frac{dy}{dt} + y = 2B.$$

Исключим переменную времени, выразив $dt = \frac{dx}{y}$:

$$(I) \quad 1,5 \frac{dy}{dx} y + y = -2B;$$

$$(II) \quad 1,5 \frac{dy}{dx} y + y = 0;$$

$$(III) \quad 1,5 \frac{dy}{dx} y + y = 2B.$$

Сделаем преобразования и разделив переменные, получим:

$$(I) \quad dx = -1,5 dy + \frac{3Bdy}{y+2B};$$

$$(II) \quad dx = -1,5dy;$$

$$(III) \quad dx = -1,5dy - \frac{3Bdy}{y-2B}.$$

Проинтегрировав выражения, получим:

$$(I) \quad x = -1,5y + 3B \ln |y + 2B| + C_1;$$

$$(II) \quad x = -1,5y + C_2;$$

$$(III) \quad x = -1,5y - 3B \ln |y - 2B| + C_3.$$

Фазовый портрет удобно начинать строить при $C_1 = C_2 = C_3 = 0$:

$$(I) \quad x_0 = -1,5y + 3 \ln |y + 2|;$$

$$(II) \quad x_0 = -1,5y;$$

$$(III) \quad x_0 = -1,5y - 3 \ln |y - 2|.$$

Поскольку фазовая плоскость разбита на три устойчивые области, то построение в каждой из них выполняется только по соответствующему уравнению (рис. 58).

При начертании фазовых траекторий следует иметь в виду, что а) для скорости изменения, равной нулю ($y = 0$), фазовые траектории пересекают ось x под прямым углом; б) при положительном значении y , то есть в верхней поло-

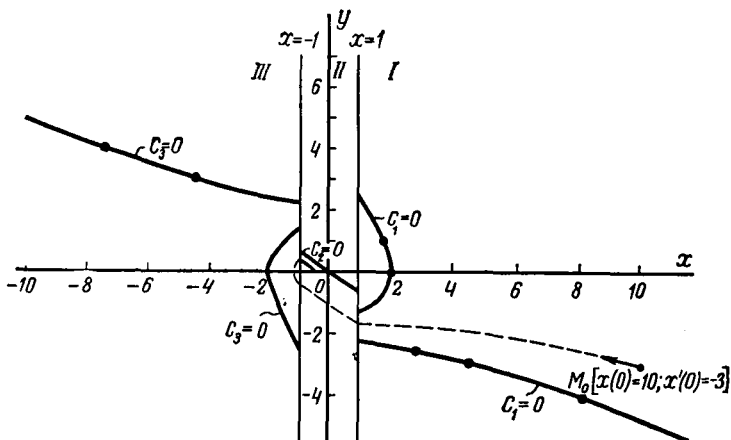


Рис. 58. Построение фазовой траектории.

вине фазовой плоскости изображающая точка M движется слева направо, а при отрицательном y , то есть в нижней половине плоскости, — справа налево; в) фазовые траектории не пересекаются между собой, за исключением случаев пересечения в особых точках (в нашей задаче это (I) $x_0 = -3 + 3 \ln[-2 + 2]$ и (III) $x_0 = -3 - 3 \ln[2 - 2]$).

При известных начальных условиях $x(0) = 10$; $x'(0) = -3$ достаточно легко определяются коэффициенты $C_1 = 6,5$; $C_2 = 6,5$; $C_3 = 10,3$.

Чтобы определить траекторию движения изображающей точки при этих условиях, достаточно в каждой из областей сдвинуть x_0 на величину соответствующего коэффициента.

При данных начальных условиях система приходит в устойчивое состояние практически за один период.

Пример 79. На фазовой плоскости построить траекторию изображающей точки для нелинейной АСУ, структурная схема которой приведена на рисунке 59, если передаточная

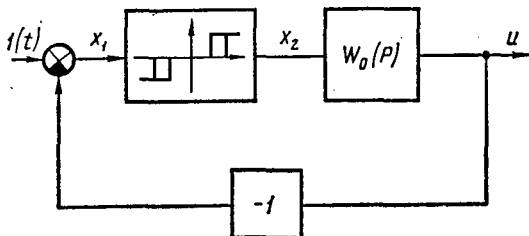


Рис. 59. Структурная схема АСУ.

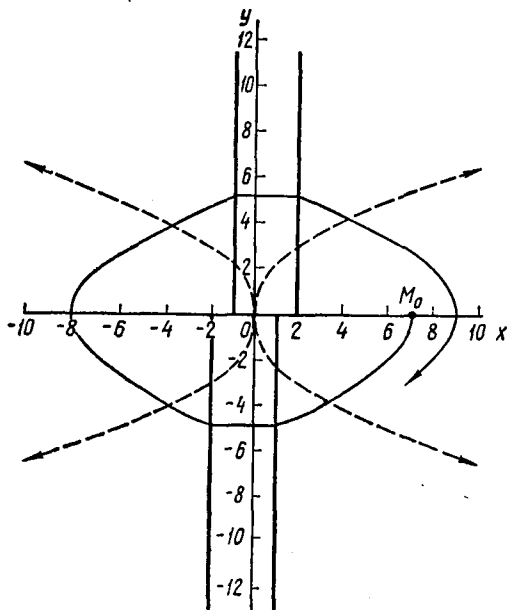


Рис. 60. Фазовый портрет неустойчивой АСУ.

функция линейной части АСУ $W_0(p) = \frac{2}{p^2}$, параметры нелинейного звена $B=1$, $a_1=1$; $a_2=2$, а начальные условия АСУ $u(0)=7$, $u'(0)=0$.

Решение. Нелинейное звено может иметь одно из трех устойчивых состояний: B , 0 , $-B$. В соответствии с заданными условиями напомним уравнения для трех устойчивых состояний нелинейного звена:

$$\begin{aligned} (I) \quad & \frac{d^2 u}{dt^2} = -2B \quad \text{при } x_1 \geq a_2; \\ (II) \quad & \frac{d^2 u}{dt^2} = 0 \quad \text{при } |x_1| \leq a_1; \\ (III) \quad & \frac{d^2 u}{dt^2} = +2B \quad \text{при } x_1 \leq -a_2. \end{aligned}$$

Представив управляемый параметр АСУ $\frac{du}{dt} = \frac{dx}{dt} = y$, $dt = \frac{dx}{y}$ в координатах фазовой плоскости и проинтегрировав, получим:

$$(I) \quad x = \frac{1}{-4B} y^2 + C_1;$$

$$(II) \quad x = C_2;$$

$$(III) \quad x = \frac{1}{4B} y^2 + C_3.$$

На фазовой плоскости при $C_1=C_2=C_3=0$ и $C_1=C_3=7$ построим уравнения парабол (рис. 60). Построение фазовой траектории с учетом начальных условий показало, что траектория расходится, удаляясь от начала координат. Система неустойчива. Это видно из заданной структурной схемы, содержащей два интегрирующих звена.

Пример 80. Методом изоклин построить фазовую траекторию АСУ, изображенной на рисунке 61, если передаточная функция линейной части $W_0(p) = \frac{1,7}{p^2 + 0,5p + 1}$, а нелинейное звено имеет параметры $B = 3$.

Решение. В соответствии со структурной схемой АСУ можно составить два уравнения:

$$(I) \quad (p^2 + 0,5p + 1)u = -1,7B \quad \text{при } u > 0,$$

$$(II) \quad (p^2 + 0,5p + 1)u = +1,7B \quad \text{при } u < 0.$$

Преобразуем эти уравнения в координатах фазовой плоскости при

$$\frac{du}{dt} = \frac{dx}{dt} = y; \quad dt = \frac{dx}{y};$$

$$(I) \quad \frac{dy}{dx} y + 0,5y + x = -1,7B,$$

$$(II) \quad \frac{dy}{dx} y + 0,5y + x = 1,7B.$$

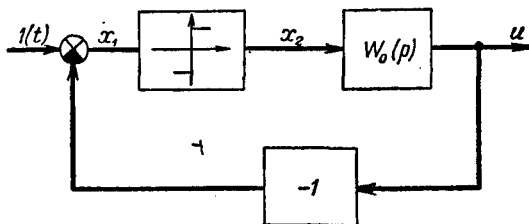


Рис. 61. Структурная схема АСУ.

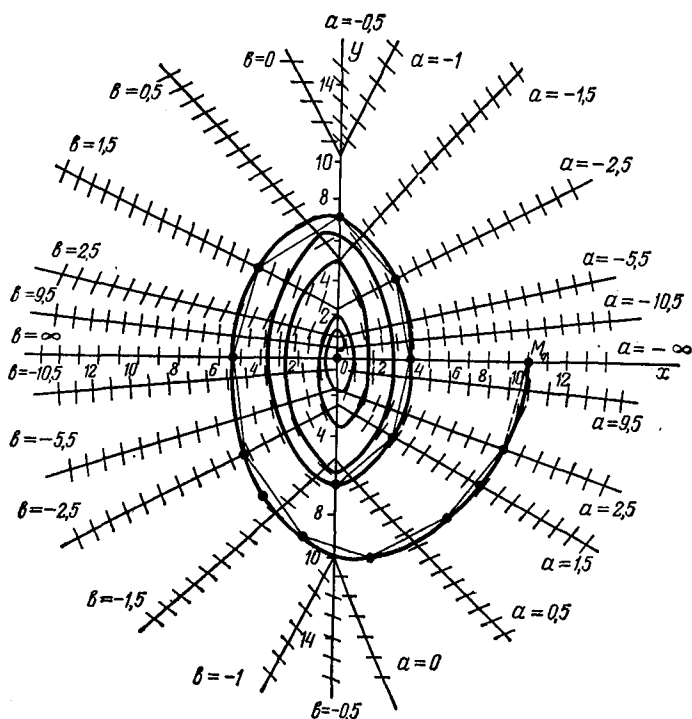


Рис. 62. Построение фазовой траектории методом изоклин.

Преобразовав, получим:

$$(I) \frac{dy}{dx} = - \frac{1,7B + x + 0,5y}{y},$$

$$(II) \frac{dy}{dx} = - \frac{x + 0,5y - 1,7B}{y}.$$

Примем в уравнении (I)

$$\frac{dy}{dx} = a,$$

в уравнении II — $\frac{dy}{dx} = b$ и найдем уравнения изоклин:

$$y = - \frac{x + 1,7B}{a + 0,5}, \quad y = - \frac{x - 1,7B}{b + 0,5}.$$

Для различных значений a и b строим поле изоклин (рис. 62). Наклон фазовой траектории к оси абсцисс для каждой изоклины показан отрезками прямых, проведен-

ных соответственно под углами $\text{arctg } a$, $\text{arctg } b$. Эти отрезки являются касательными к фазовой траектории. Задавшись начальными условиями $x(0) = 10$, $x'(0) = 0$, получим фазовую траекторию изображающей точки M .

Пример 81. Определим частоту и амплитуду автоколебаний системы, структурная схема которой изображена на рисунке 63, если передаточные функции

$$W_0(p) = \frac{3}{p(0,1p+1)}, \quad W_1(p) = \frac{10}{0,5p+1},$$

а параметры нелинейного звена $|B| = 10$.

Решение. Передаточная функция линейной части системы

$$\begin{aligned} W_{\text{л}}(p) &= W_0(p) W_1(p) = \frac{3}{p(0,1p+1)} \cdot \frac{10}{0,5p+1} = \\ &= \frac{30}{0,05p^2 + 0,6p + p}. \end{aligned}$$

По таблице 2 определяем коэффициенты гармонической линеаризации:

$$q(A) = \frac{4B}{\pi A} = \frac{4 \cdot 10}{3,14 \cdot A}, \quad q'(A) = 0.$$

Отсюда передаточная функция нелинейного звена

$$W_{\text{н}}(p) = q(A) = \frac{40}{3,14A}.$$

Передаточная функция разомкнутой АСУ

$$W(p) = W_{\text{л}}(p) W_{\text{н}}(p) = \frac{30q(A)}{0,05p^2 + 0,6p^2 + p}.$$

Передаточная функция замкнутой АСУ

$$W_{\text{з}}(p) = \frac{30q(A)}{0,05p^2 + 0,6p^2 + p + 30q(A)}.$$

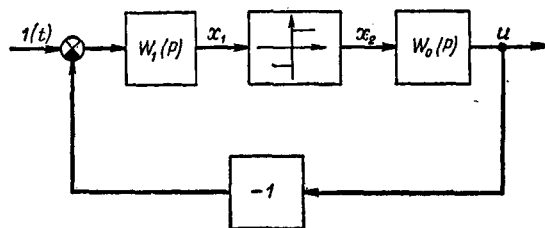


Рис. 63. Структурная схема АСУ.

Знаменатель замкнутой передаточной функции представляет собой характеристическое уравнение свободных колебаний АСУ:

$$0,05p^3 + 0,6p^2 + p + 30q(A) = 0.$$

Параметры автоколебаний можно определить, например, пользуясь критерием Гурвица. Составим определитель третьего порядка:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0,6 & 30q(A) & 0 \\ 0,05 & 1 & 0 \\ 0 & 0,6 & 30q(A) \end{vmatrix}$$

Из критического условия, соответствующего наличию автоколебаний, находим их амплитуду:

$$\Delta_3 = 0,6 \cdot 1 - 0,05 \cdot 30q(A) = 0, \\ q(A) = \frac{40}{3,14A} = \frac{0,6}{1,5} = 0,4, \quad A = \frac{100}{3,14} \approx 32.$$

Частоту автоколебаний определяем как

$$\Omega^2 = \frac{a_n \Delta_{n-3}}{\Delta_{n-2}} = \frac{a_3}{a_1} = \frac{12}{0,6} = 20,$$

откуда

$$\Omega = \sqrt{20} \approx 4,7 \text{ рад/с.}$$

Пример 82. Методом гармонической линеаризации определить частоту и амплитуду автоколебаний системы, структурная схема которой изображена на рисунке 64, если передаточные функции линейных звеньев

$$W_0(p) = \frac{10}{0,5p^2 + 1,5p + 1}, \quad W_1(p) = 2p,$$

а параметры нелинейного звена $B = 5$, $a = 1$.

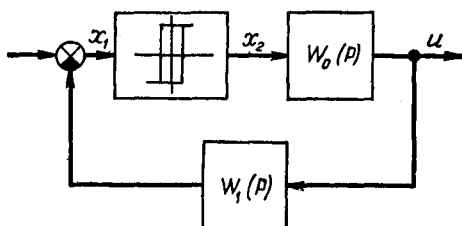


Рис. 64. Структурная схема АСУ.

Решение. Передаточная функция линейной части системы

$$W_x(p) = W_0(p) W_1(p) = \frac{2Qp}{0,5p^2 + 1,5p + 1}.$$

По таблице 2 для данного вида нелинейности находим коэффициенты гармонической линеаризации:

$$q(A) = \frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}} \quad \text{и} \quad q'(A) = \frac{4Ba}{\pi A^2} \quad \text{при} \quad A \geq a.$$

Тогда передаточная функция нелинейного звена

$$W_n(p) = q(A) + \frac{q'(A)}{\Omega} p.$$

Характеристическое уравнение свободных колебаний АСУ

$$1 + W_n(p) W_x(p) = 0, \\ 1 + \left\{ \left[q(A) + \frac{q'(A)p}{\Omega} \right] \frac{20p}{0,5p^2 + 1,5p + 1} \right\} = 0.$$

Отсюда после преобразований

$$\left[\frac{20q'(A)}{\Omega} + 0,5 \right] p^2 + [20q(A) + 1,5] p + 1 = 0.$$

Амплитуду автоколебаний можно определить из условия $20q(A) + 1,5 = 0$:

$$q(A) = -\frac{1,5}{20} = -0,075, \quad \frac{4,5}{3,14 \cdot A} \sqrt{1 - \frac{1}{A^2}} = -0,075, \\ 1,39 \cdot 10^{-4} A^4 + A^2 - 1 = 0, \\ A = 1.$$

Частота автоколебаний может быть найдена из другого условия:

$$1 - \left(\frac{20q'(A)}{\Omega} + 0,5 \right) \Omega^2 = 0, \quad q'(A) = 6,38, \\ \Omega_1 \approx 0, \quad \Omega_2 = -255,6.$$

Для частоты получено отрицательное значение. Следовательно, в данной системе автоколебаний не наблюдается.

Пример 83. Определить частоту и амплитуду автоколебаний АСУ, уравнение движения которой $[0,0025p^3 + 0,1p^2 + p + 0,82q(A)] x_1 = 0$, параметры нелинейного звена

$$q(A) = \frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}, \quad q'(A) = 0,$$

$B = 5$, $a = 1$, возмущающее воздействие

$$x_1 = A \sin \Omega t.$$

Решение. Параметры автоколебаний определяем при помощи критерия Михайлова. Подставим в характеристический многочлен $p = j\Omega$ и выделим при этом мнимую и вещественную части:

$$\begin{aligned} -0,0025 \Omega^3 j - 0,1 \Omega^2 + j\Omega + 0,82q(A) &= 0, \\ [0,82q(A) - 0,1 \Omega^2] + j(\Omega - 0,0025 \Omega^3) &= 0. \end{aligned}$$

Из мнимой части уравнения находим частоту автоколебаний:

$$\begin{aligned} \Omega(1 - 0,0025 \Omega^2) &= 0, \\ \Omega^2 &= \frac{1}{0,0025}, \quad \Omega = \frac{1}{\sqrt{0,0025}} = 20 \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

Тогда амплитуду автоколебаний определяем из вещественной части характеристики:

$$\begin{aligned} 0,82q(A) - 0,1 \Omega^2 &= 0, \\ q(A) &= \frac{0,1 \Omega^2}{0,82} = \frac{0,1 \cdot 20^2}{0,82} \approx 49. \end{aligned}$$

Можно записать, что

$$\begin{aligned} \frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}} &= 49, \quad \left(\frac{3,14 \cdot 49 \cdot A}{20} \right)^2 = 1 - \frac{1}{A^2}, \\ 59A^4 + A^2 - 1 &= 0, \\ A^2 &= \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 236}}{118} = \frac{-1 \pm 15,4}{118} = 0,13, \quad A = 0,36. \end{aligned}$$

Глава VII

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ



§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НА АНАЛОГОВЫХ МАШИНАХ

Аналитические методы исследования хорошо разработаны для линейных АСУ невысоких порядков. Математические методы исследования нелинейных АСУ очень сложны и при этом не универсальны. Для нелинейных звеньев с определенным видом нелинейной статической характеристики приходится пользоваться в основном частными приемами. Эти обстоятельства зачастую были причиной отказа от теоретического анализа нелинейных АСУ, а также линейных АСУ, описываемых дифференциальными уравнениями высоких порядков.

В инженерной практике исследования линейных и нелинейных АСУ широкое применение находит метод математического моделирования, который основан на аналогии уравнений статики или динамики реального объекта и его модели. Сущность математического подобия заключается в том, что совершенно различные по своей физической природе процессы описываются тем не менее одинаковыми уравнениями.

Математические модели (уравнения) могут быть реализованы на цифровой электронно-вычислительной машине дискретного действия или на электронной аналоговой машине непрерывного действия. К преимуществам исследования АСУ на аналоговой машине следует отнести простоту программирования и набора задачи, сравнительно большую скорость их работы и наглядное представление решения в виде графика переходного процесса на экране осциллографа или на ленте самописца. Меньшая универсальность и ограниченная точность аналоговых машин в сравнении с цифровыми не представляют существенных затруднений для использования их в целях исследования АСУ, поскольку определение параметров АСУ в динамическом режиме с $10 \div 20$ -процентной точностью считается в практических задачах удовлетворительным.

На аналоговых машинах анализ динамики звеньев и систем управления можно экспериментально производить в сочетании с реальной аппаратурой управления.

Главным элементом АВМ является операционный или решающий усилитель, который состоит из трех каскадов усиления. На операционных усилителях выполняют (в зависимости от их соединения и типа обратных связей) различные математические операции: суммирование, умножение, деление, инвертирование (изменение знака), дифференцирование, интегрирование, воспроизведение нелинейных зависимостей и др. Набор задачи осуществляется с помощью штеккеров на коммутационном поле решающего блока.

Усилители соединяют между собой в соответствии с уравнениями, описывающими динамику отдельных звеньев или в целом автоматической системы управления. На вход собранной модели подают напряжение, пропорциональное входному сигналу реальной системы, а с выхода

**Типовые схемы и операции решающих блоков
аналоговой машины**

Номер схемы	Принципиальная схема решающего блока	Уравнение решающего блока и его передаточная функция	Математическая опе- рация, выполняемая решающим блоком
1		$U_{\text{вых}} = -\frac{R_0}{R_1} U_{\text{вх}};$ $W(P) = -K;$ $K = \frac{R_0}{R_1}.$	При $R_0 = R_1$ — перемена знака При $R_0 > R_1$ — умножение (увеличение в K раз) При $R_0 < R_1$ — деление (уменьшение в K раз)
2		$U_{\text{вых}} =$ $= -R_0 \sum_{i=1}^n \frac{U_{\text{вх}i}}{R_i};$ $W_i(P) = -K_i;$ $K_i = \frac{R_0}{R_i}.$	Суммирование n независимых переменных
3		$U_{\text{вых}} = -R_0 C_1 P U_{\text{вх}};$ $W(P) = -TP;$ $T = R_0 C_1.$	Дифференцирование по времени
4		$U_{\text{вых}} = -\frac{U_{\text{вх}}}{R_1 C_0 P};$ $W(P) = -\frac{1}{TP};$ $T = R_1 C_0.$	Интегрирование по времени
5		$U_{\text{вых}} = -\frac{U_{\text{вх}} \cdot \frac{R_2}{R_1}}{R_2 C_1 P + 1};$ $K = \frac{R_2}{R_1}; \quad T = R_2 C_1.$	Интегрирование (с учетом потерь звена)

снимают напряжение, в определенном масштабе соответствующее выходному параметру системы.

В таблице 3 показаны схемы включения входных цепей, цепей обратных связей и выходной цепи для решающих блоков, выполняющих основные элементарные математические операции: умножение, деление или инвертирование (схема 1), суммирование (2), дифференцирование (3) и интегрирование (4) и интегрирование с учетом потерь звена (5).

Блок решающего усилителя обозначают треугольником, а обратные связи резисторами R_0, R_1, R_2 и R_n или конденсаторами C_0, C_1 . Суммирование осуществляется с помощью $R_1, R_2, \dots, R_n$, деление — R_1, R_0 , дифференцирование — C_1, R_0 и интегрирование — R_1, C_0 .

Поскольку числовые данные в реальных установках не равны, а пропорциональны входным и выходным значениям напряжений в аналоговой машине, то вводятся масштабные коэффициенты для зависимых переменных и времени.

За машинную единицу зависимых переменных обычно принимают напряжение 100 В. Машинная переменная X связана с соответствующей переменной x реального процесса через масштабный коэффициент m : $X = mx$. При выборе масштаба исходят из условия $mx < 1$ (100 В).

Через масштабный коэффициент времени m_t определяют масштабное время τ при известных значениях времени t реального процесса: $\tau = m_t t$. Часто моделирование ведут при масштабе $m_t = 1$, то есть в натуральном масштабе времени. В случае замедленного моделирования $m_t > 1$, а в случае ускоренного — $m_t < 1$.

Если P — оператор, выраженный в машинных единицах, то оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt} = \frac{d}{d\tau} m_t = m_t P$, а оператор интег-

рирования $\frac{1}{p} = \int dt = \frac{1}{m_t} \int d\tau = \frac{1}{m_t P}$.

На АВМ можно решать нелинейные уравнения и моделировать АСУ с нелинейными элементами. В таблице 4 показаны схемы набора основных типичных нелинейностей.

Зоны нечувствительности элементов автоматики моделируются схемой 1, а и б (табл. 4). Входной сигнал x_1 предварительно инвертируется на $-x_1$ и подается на вход схемы 1, а. Вследствие этого в случае положительного входного сигнала x_1 выходной сигнал x_2 тоже будет положительным. Однако сигнал x_2 появляется, только когда $|x_1| > |a|$. При меньших входных сигналах диоды D_1 и D_2 закрыты напряжениями, снимаемыми с потенциометров $+a$ и $-a$. В схеме 1, б в отличие от схемы 1, а не требуется блока предварительного инвертирования входного сигнала x_1 , так как сигналу $\mp x_1$ соответствует выходной сигнал $\pm x_2$.

В схеме 2 при росте положительного (отрицательного) значения входного сигнала x_1 на выходе пропорционально увеличивается отрицательное (положительное) значение x_2 до тех пор, пока не откроется диод D_2 (или D_1). Диоды D_1 и D_2 закрыты напряжениями, снимаемыми с потенциометров $+B$ и $-B$. После того как соответствующий диод откроется, выходной сигнал не изменяется, поскольку открывшийся диод шунтирует входной сигнал.

При отсутствии резистора R_0 обратной отрицательной связи и наличии предварительного инвертирования входного сигнала x_1 на $-x_1$ моделируют идеальную релейную характеристику типа статической характеристики нуль-индикатора (схема 3). Отсутствие отрицательной

Таблица 4

Нелинейности и схемы их моделирования

№ схемы	Наименование нелинейной зависимости	Вид нелинейной зависимости	Схема моделирования нелинейности
1	Зона нечувствительности		
2	Ограничение по выходной величине		
3	Идеальная релейная		
4	Релейная с гистерезисом		
5	Люфт, или зазор		
6	Релейная с зоной нечувствительности		
7	Релейная с зоной нечувствительности и гистерезисом		

обратной связи ведет к резкому увеличению коэффициента усиления решающего усилителя, благодаря чему выходной сигнал принимает предельное значение $\pm B$ при малейших значениях входного сигнала, а затем через диоды D_1 и D_2 шунтируется вход.

Релейная характеристика с гистерезисом, например поляризованного реле, моделируется схемой 4. По сравнению с характеристикой схемы 3 сдвиг в величинах срабатывания реле при $+a$ и отпускания его при $-a$ осуществляется обратной связью при помощи потенциометров $+B$ и $-B$, а положительная обратная связь через резистор R_2 обеспечивает воспроизведение характеристики при $-a < x_1 < +a$. Решающий блок 1 осуществляет инвертирование, а блок 2 — ограничение.

Во многих подвижных элементах автоматики имеется зазор (люфт), создающий статическую нелинейную характеристику 5, которая моделируется схемой 5. Предварительно инвертированный входной сигнал x_1 на $-x_1$ подается на схему моделирования зоны нечувствительности. Обратная связь осуществляется не по полному выходному напряжению, а по его части, снимаемой с потенциометра B .

Релейная характеристика с зоной нечувствительности, например электронных реле с коэффициентом возврата, равным единице, моделируется схемой 6. Потенциометры $\pm B$ совместно с диодами D_1 и D_2 моделируют зону нечувствительности, подобно схеме 1, а, решающий блок с потенциометрами $\pm B$ и диодами обратной связи D_3 и D_4 моделирует участки ограничения аналогично схеме 2.

Релейная характеристика с зоной нечувствительности и гистерезисом, например распространенных электромагнитных реле с коэффициентом возврата, меньшим единицы, и их схема моделирования показаны на схеме 7. Подобно схеме 4 положительная обратная связь с выхода x_2 вносит дополнительный сдвиг в величину $\pm a_1$ возврата реле. При помощи потенциометров P_1 и P_2 происходит изменение величин срабатывания реле $\pm a_2$, а при помощи диодов обратной связи — ограничение по выходному сигналу, как в схеме 2.

Полярность выходного напряжения каждого звена на модели получается обратной полярности входного напряжения из-за того, что усилители постоянного тока машины собраны с нечетным числом усилительных каскадов. Это необходимо учитывать при анализе полученных результатов измерения.

§ 2. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ АСУ

Пример 84. Составить на АВМ типа МН-7 схему математического моделирования двигателя постоянного тока ПН-85, основные параметры которого $n_0 = 2100$ об/мин, $U_n = 220$ В, $r_{нд}^* = 0,082$, $J = 0,16$ кг·м/с², $M_n = 37,2$ Н·м. В процессе решения можно пренебречь электромагнитным переходным режимом и влиянием сил сухого трения.

Решение. При заданных допущениях передаточная функция ПН-85

$$W_0(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta U} = \frac{k_d}{T_d p + 1},$$

где $k_d = \frac{\pi n_0}{30 U_n} = \frac{3,14 \cdot 2100}{30 \cdot 220} \approx 1$ рад/В·с — коэффициент усиления звена;

$T = \frac{J n_0 r_0}{9,55 M_n} = \frac{0,16 \cdot 2100 \cdot 0,08}{9,55 \cdot 37,2} = 0,08 \text{ с}$ — постоянная времени электромеханического процесса.

Для перехода к параметрам модели задаемся масштабами:

$$m_\omega = \frac{\omega_0}{|U_m|} = \frac{\pi n_0}{30 |U_m|} = 2,2 \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{В}},$$

где $U_m = \pm 100 \text{ В}$ — диапазон изменения напряжения операционных усилителей модели;

$m_t = 10$, откуда $T_m = m_t T_d = 0,8 \text{ с}$ — постоянная времени модели;

$m_U = \frac{U_n}{U_m} = \frac{220}{|100|} = 2,2$ — масштаб входного напряжения двигателя.

В результате передаточная функция модели

$$W(P) = \frac{\frac{m_U}{m_\omega} k_d}{m_t T_d P + 1} = \frac{k_m}{T_m P + 1} = \frac{1}{0,8 P + 1}.$$

Определяем параметры модели при моделировании по передаточным функциям, табл. 3: если $T_m = C_1 R_2$ и $C_1 = 1 \text{ мкФ}$, то

$$R_2 = \frac{T_m}{C_1} = \frac{0,8}{1 \cdot 10^{-6}} = 0,8 \text{ МОм}; \quad k_m = \frac{R_2}{R_1} = 1;$$

$$R_1 = \frac{R_2}{k_m} = 0,8 \text{ МОм}.$$

Схема данной модели представлена в таблице 3 (схема 5).

Пример 85. Составить на АВМ типа МН-7 схему модели реального дифференцирующего звена $R_0 C_0$ контура (рис. 24), если $U_r = 220 \text{ В}$, $U_0 = 110 \text{ В}$, $R_0 = 800 \text{ Ом}$, $C = 50 \text{ мкФ}$.

Решение. Передаточная функция этого звена выведена в примере 35: $W(p) = \frac{kT(p)}{Tp + 1}$, где $k = R_0' C = R_0 \frac{U_0}{U_r} C = 0,02$, $T = R_0 C = 0,04 \text{ с}$.

Зададимся масштабами: напряжения $m_U = \frac{U_r}{|U_m|} = \frac{220}{100} = 2,2$ и времени $m_t = 10$. Тогда передаточная функция модели

$$W(P) = \frac{m_t k p}{m_t T p + 1} = \frac{10 \cdot 0,02 P}{10 \cdot 0,04 P + 1} = \frac{0,2 P}{0,4 P + 1}.$$

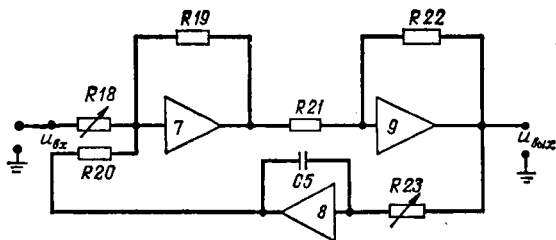


Рис. 65. Схема моделирования реального дифференцирующего звена.

Считая $U_0 = y$, а $U_r = x$, можно записать:

$$0,4Py = 0,2Px - y_0.$$

Разделив обе части уравнения на $0,4 P$, получим

$$y = 0,5x - 1,25 \frac{y}{P}.$$

Если на входе модели есть сигналы x и $-\frac{y}{P}$, то умножив их на соответствующие коэффициенты, просуммировав на входе решающего усилителя и проинтегрировав, найдем величину $-y$.

Выполнив инвертирование, получим окончательное решение. Параметры схемы моделирования (рис. 65) таковы:

$$m_t k = 0,2 = \frac{R_{20} R_{23} C_5}{R_{18}}; \quad m_t T = 0,4 = \frac{R_{20} R_{23} R_{21} C_5}{R_{19} R_{22}};$$

$$C_5 = 1 \text{ МкФ}; \quad R_{20} = R_{19} = R_{21} = R_{22} = 1 \text{ МОм}.$$

Тогда

$$R_{23} = \frac{0,4 R_{19} R_{22}}{R_{20} R_{21} C_5} = 0,4 \text{ МОм}, \quad R_{18} = \frac{R_{20} C_5 R_{23}}{0,2} = 2 \text{ МОм}.$$

Пример 86. Составить схему моделирования колебательного звена второго порядка, передаточная функция которого по примеру 34

$$W(p) = \frac{\varphi}{\eta} = \frac{k_m}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

при $k_m = 7$, $T_2 = 0,095$ с; $T_1 = 0,06$ с.

Параметры φ и η в примере 34 заданы в относительных единицах. Поэтому достаточно принять масштаб времени $m_t = 10$. Тогда передаточная функция модели

$$W(p) = \frac{k_m}{m_t^2 T_2^2 p^2 + m_t T_1 p + 1} = \frac{7}{0,9 p^2 + 0,6 p + 1}.$$

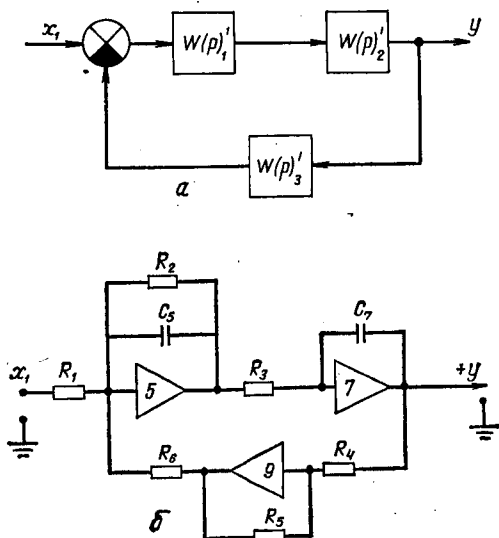


Рис. 66. Структурная схема колебательного звена, составленная на типовых звеньях (а) и схема его моделирования (б).

Эту передаточную функцию можно представить при помощи типовых звеньев: инерционного, которое последовательно соединено с интегральным, охваченных безынерционным звеном отрицательной обратной связи (рис. 66, а). После преобразований

$$W(p) = \frac{\frac{7}{0,6p(1,5p+1)}}{1 + \frac{1}{7} \frac{7}{0,6p(1,5p+1)}}$$

Пользуясь методом моделирования по передаточным функциям, можно составить схему модели (рис. 66, б), а затем найти ее параметры:

$$R_2 \cdot C_5 = 1,5 \text{ с}; \quad C_5 = C_7 = 1 \text{ мкФ}; \quad R_2 = 1,5 \text{ МОм}; \quad R_2/R_1 = 7;$$

$$R_1 = \frac{R_2}{7} = 0,214 \text{ МОм}; \quad R_3 C_7 = 0,6 \text{ с};$$

$$R_3 = 0,6 \text{ МОм}; \quad R_6 = 1 \text{ МОм}; \quad \frac{R_5}{R_4} = \frac{1}{7}, \quad R_5 = 0,1 \text{ МОм};$$

$$R_4 = 0,7 \text{ МОм}.$$

Пример 87. Составить схему моделирования ЭМУ в сочетании с генератором постоянного тока (рис. 24). Передаточная функция ЭМУ в сочетании с генератором выведена в примере 36:

$$W(p) = \frac{2C_3 C_{y1} W(p)_{y1} W(p)_n}{1 + C_n C_3 W(p)_n W(p)_2 + C_2 W(p)_2}.$$

Параметры ЭМУ:

$$R_y = 2000 \text{ Ом}; L_y = 80 \text{ Г}; R_n = 1,23 \text{ Ом}; L_n = 0,16 \text{ Г};$$

$$C_2 = 2,6 \text{ В/А}; C_3 = 4,2 \text{ В/А}; C_y = 6400 \text{ В/А};$$

$$L_{я} + L_n = 27,5 \text{ Г}; R_{я} + R_n = 65,5 \text{ Ом}; C_n = \frac{U_r}{I_B} = 108 \text{ В/А}.$$

Масштаб $m_U = 2,2$.

Решение. В соответствии с примером 36 передаточных функций для заданных параметров ЭМУ равны:

$$W(p)_y = \frac{\frac{1}{R_y}}{1 + \frac{L_y}{R_y} p} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,04p}; \quad W(p)_2 = \frac{\frac{1}{R_2}}{1 + \frac{L_2}{R_2} p} = \frac{0,81}{1 + 0,13p};$$

$$W(p)_n = \frac{\frac{1}{R_n}}{1 + \frac{L_n}{R_n} p} = \frac{0,0153}{1 + 0,42p}.$$

Подставив численные значения $W(p)_y$, $W(p)_n$, $W(p)_2$ в передаточную функцию ЭМУ, получим

$$W(p) = \frac{\frac{6,4}{1 + 0,04p} \cdot \frac{3,4}{1 + 0,13p}}{1 + \frac{2,65}{1 + 0,42p} \cdot \frac{2,4}{1 + 0,13p} + \frac{3,4 \cdot 0,62p}{1 + 0,13p}}.$$

Эту передаточную функцию можно преобразовать:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{\frac{3,4}{1 + 0,13p}}{1 + 2,27 \frac{1 + 0,19p}{1 + 0,42p} \cdot \frac{3,4}{1 + 0,13p}} \cdot \frac{6,4}{1 + 0,04p} = \\ &= W_1(p)' \cdot \frac{W(p)_2'}{1 + W(p)_2' W(p)_{o.c}}. \end{aligned}$$

Структурная схема, соответствующая данному выражению, изображена на рисунке 67, а. Очевидно, что в схеме два инерционных звена, а третье звено обратной связи — интегро-дифференцирующее.

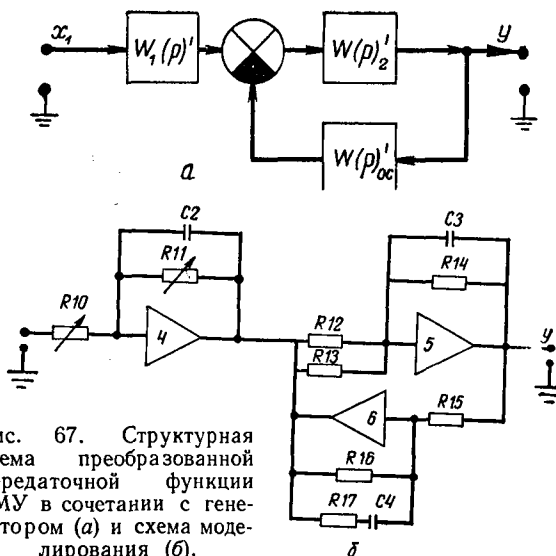


Рис. 67. Структурная схема преобразованной передаточной функции ЭМУ в сочетании с генератором (а) и схема моделирования (б).

При составлении модели схемы по передаточным функциям достаточно выявить схему модели интегро-дифференцирующего звена, поскольку модели инерционных звеньев известны (см. пример 84).

Передаточная функция интегро-дифференцирующего звена отрицательной обратной связи имеет вид

$$W(p)_{o.c} = \frac{y_{o.c}}{x_{o.c}} = 2,27 \frac{1 + 0,19p}{1 + 0,42p}.$$

При $m_t = 10$ передаточная функция модели

$$W(P) = \frac{Y_m}{X_m} = 2,27 \frac{1 + 1,9P}{1 + 4,2P}.$$

Для логического составления модели выполним некоторые преобразования $W(P)$:

$$2,27 (1,9P + 1) X_m = (4,2P + 1) Y_m.$$

Умножив обе части уравнения на T_1 и прибавив к правой части $T_2 Y_m - T_2 Y_m$, в окончательном виде получим

$$Y_m = X_m + \frac{0,56}{19P + 1} \cdot Y_m.$$

По этому выражению удобно составлять схему модели. В правой части множитель перед Y_m представляет собой

инерционное звено. Величину Y_m через это инерционное звено можно просуммировать с величиной X_m . Инерционное звено представляется возможным выполнить, как на активном элементе — операционном усилителе, так и на пассивных с использованием цепи резистор — конденсатор. В данной задаче применен второй способ исполнения. Общая схема моделирования ЭМУ в сочетании с генератором показана на рисунке 67, б. Параметры модели удобно определить из вышеприведенных выражений $W(p)_y$, $W(p)_2$ и $W(p)_n$ при $m_t = 10$ и $m_y = 2,2$.

$$C_2 = C_3 = C_4 = 1 \text{ мкФ}; C_2 \cdot R_{11} = 0,4 \text{ с}; R_{11} = 0,4/1 = 0,4 \text{ МОм}; \\ \frac{R_{11}}{R_{10}} = 6,4; R_{10} = 0,064 \text{ МОм}; C_3 R_{14} = 1,3 \text{ с}; R_{14} = 1,3 \text{ МОм}; \\ \frac{R_{14}}{R_{12}} = 3,4; R_{12} = 0,38 \text{ МОм}; R_{17} C_4 = 1,9 \text{ с}; R_{17} = 1,9 \text{ МОм}; \\ (R_{17} + R_{18}) C_4 = 4,2 \text{ с}; R_{18} = 2,3 \text{ МОм}; R_{18}/R_{15} = 2,27; \\ R_{15} = 1,02 \text{ МОм}; R_{19} = 1 \text{ МОм}.$$

Пример 88. Составить схему модели для автоматической системы управления частотой вращения двигателя постоянного тока (рис. 24), структурная схема которой изображена на рисунке 30.

Передаточная функция отдельных звеньев:

$$W(p)_d = W(p)_0 = \frac{k}{T_d p + 1} = \frac{1}{0,08p + 1}; W(p)_1 = k = 540;$$

$$W(p)_2 = \frac{6,4}{1 + 0,04p} \frac{\frac{3,4}{1 + 0,13p}}{1 + 2,27 \frac{1 + 0,19p}{1 + 0,42p} \frac{3,4}{1 + 0,13p}};$$

$$W(p)_{o.c1} = \frac{0,044p}{0,04p + 1}; W(p)_{o.c2} = k = 0,01.$$

Решение. Построение моделирующей схемы АСУ (рис. 30) удобно выполнять по передаточным функциям отдельных звеньев.

Для передаточных функций $W(p)_0$, $W(p)_{o.c1}$, $W(p)_2$ получены схемы моделирования в примерах 84, 85, 87.

Остается найти схемы моделей для $W(p)_1$ и $W(p)_{o.c2}$.

Поскольку $W(p)_1$ и $W(p)_{o.c2}$ — безынерционные звенья, они представляются в схемах моделирования простейшими операционными усилителями (табл. 3).

В связи с тем, что коэффициент усиления $W(p)_1 = 540$ очень велик, а $W(p)_{o.c2} = 0,01$ очень мал, лучше в системе

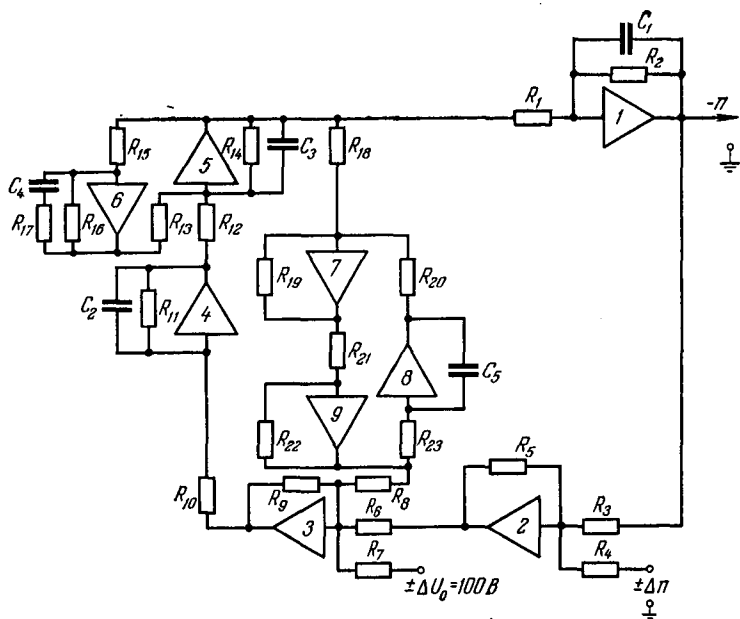


Рис. 68. Схема моделирования автоматической системы управления частотой вращения двигателя постоянного тока.

моделирования эти коэффициенты перераспределить так $W(p)'_1 = 5,4$, а $W(p)_{o.c.2} = 1$. Чтобы это перераспределение не исказило переходный процесс в модели, следует в 100 раз увеличить коэффициент усиления $W(p)_{o.c.1}$, то есть во столько же, во сколько было изменено соотношение коэффициентов $W(p)'_1$ и $W(p)_{o.c.2}$.

Схема моделирования АСУ представлена на рисунке 68. Передаточная функция $W(p)_0$ моделируется на операционном усилителе 1; $W(p)_{o.c.2}$ — на усилителе 2; $W(p)_1$ — на усилителе 3; $W(p)_2$ — на усилителях 4, 5, 6 и $W(p)_{o.c.1}$ — на усилителях 7, 8, 9.

Параметры модели:

$$C_1 = 1 \text{ мкФ}, R_1 = R_2 = 0,8 \text{ МОм};$$

$$\frac{R_5}{R_3} = 1; R_5 = 1 \text{ МОм}, R_3 = 1 \text{ МОм};$$

$$\frac{R_9}{R_8} = 5,4, R_9 = 1 \text{ МОм}; R_8 = \frac{1}{5,4} = 0,185 \text{ МОм};$$

$$R_7 = R_4 = 1 \text{ МОм}.$$

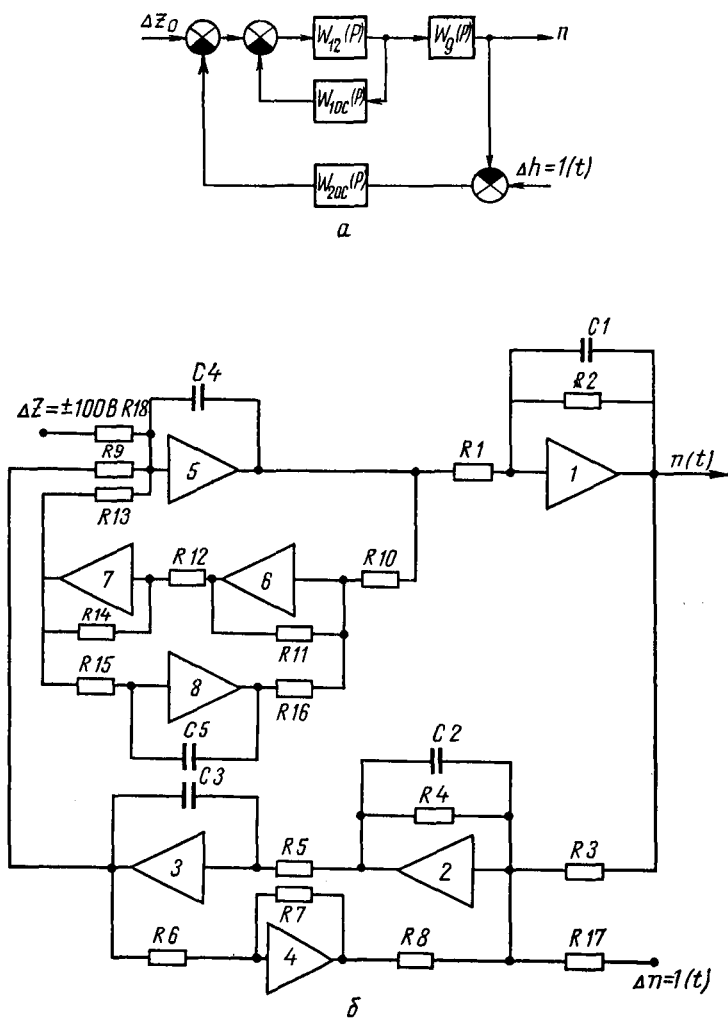


Рис. 69. Структурная схема автоматической системы управления частотой вращения двигателя внутреннего сгорания (а) и схема ее моделирования (б).

Из примера 87: $C_1 = C_2 = C_4 = 1 \text{ мкФ}$;

$$R_{11} = 0,4 \text{ МОм}; R_{10} = 0,064 \text{ МОм}; R_{14} = 1,3 \text{ МОм};$$

$$R_{12} = 0,38 \text{ МОм}; R_{17} = 1,9 \text{ МОм};$$

$$R_{15} = 1,02 \text{ МОм}; R_{16} = 2,3 \text{ МОм};$$

$$R_{19} = 1 \text{ МОм}.$$

Из примера 85: $C_5 = 1 \text{ мкФ}$;

$$R_{19} = R_{20} = R_{21} = R_{22} = 1 \text{ МОм};$$

$$R_{18} = 2 \text{ МОм}; R_{23} = 0,4 \text{ МОм}.$$

Пример 89. Составить схему моделирования автоматической системы управления частотой вращения двигателя внутреннего сгорания (рис. 26). Параметры схемы взять из примера 48.

Решение. Окончательно преобразованная структурная схема системы показана на рисунке 69, а. Моделирование выполняем по передаточным функциям этой схемы:

$$W(p)_d = \frac{1,25}{1,6p + 1}; \quad W(p)_{12} = \frac{1}{0,5p};$$

$$W(p)_{0.c1} = \frac{0,0004}{0,002p + 1};$$

$$W(p)_{0.c} = \frac{7}{0,09p^2 + 0,06p + 1}.$$

Модели всех передаточных функций известны (табл. 3, рис. 65, 66, б). Схема модели всей АСУ показана на рисунке 69, б. Принимаем $m_t = 10$, $m_n = 21 \frac{\text{об/мин}}{\text{В}}$.

Параметры схемы моделирования рассчитываем по параметрам передаточных функций:

$$R_2 C_1 = 16 \text{ с}; C_1 = 0,1 \text{ мкФ}; R_2 = 1,6 \text{ МОм}; \frac{R_2}{R_1} = 1,25;$$

$$R_1 = \frac{1,6}{1,25} = 1,28 \text{ МОм}; C_2 R_4 = 1,5 \text{ с}; C_2 = 1 \text{ мкФ};$$

$$R_4 = 1,5 \text{ МОм};$$

$$\frac{R_4}{R_3} = 7; R_3 = \frac{1,5}{7} = 0,215 \text{ МОм}; R_5 C_3 = 0,6 \text{ с};$$

$$C_3 = 1 \text{ мкФ};$$

$$R_5 = 0,6 \text{ МОм}; \frac{R_7}{R_6} = \frac{1}{7}; R_6 = 1 \text{ МОм};$$

$$R_7 = 0,143 \text{ МОм};$$

$$\begin{aligned}
 R_8 = R_{17} = 1 \text{ МОм}; \quad C_4 R_9 = 5 \text{ с}; \quad C_4 = 1 \text{ мкФ}; \quad R_9 = 5 \text{ МОм}; \\
 R_{18} = 1 \text{ МОм}; \quad R_{11} = 1 \text{ МОм}; \quad R_{10} = 0,2 \text{ МОм}; \quad C_5 = 1 \text{ мкФ}; \\
 R_{14} = 1 \text{ МОм}; \quad R_{12} R_{15} R_{16} = \frac{1}{10 \cdot 0,002} = 50; \quad R_{12} = 2 \text{ МОм}; \\
 R_{15} = 5 \text{ МОм}; \quad R_{16} = 5 \text{ Мом}.
 \end{aligned}$$

§ 3. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ АСУ

Пример 90. Составить схему моделирования звена чистого запаздывания, передаточная функция которого $W(p) = e^{-\tau p}$ при $\tau = 0,2 \text{ с}$.

Решение. Звено чистого запаздывания представляет собой нелинейность, которая при моделировании аппроксимируется разложением $e^{\tau p}$ в цепные дроби:

$$\begin{aligned}
 e^{\tau p} = 1 + \frac{\tau p}{1 - \tau p} + \frac{1 \tau p}{2 - \tau p} + \frac{2 \tau p}{3 - \tau p} + \dots \\
 \dots + \frac{n \tau p}{n + 1 - \tau p} + \dots + \dots
 \end{aligned}$$

где $n = 1, 2, 3$.

Для первых трех членов цепной дроби получим

$$e^{\tau p} = \frac{12 + 6\tau p + \tau^2 p^2}{12 - 6\tau p + \tau^2 p^2}.$$

Отсюда функцию звена чистого запаздывания можно представить в виде:

$$e^{-\tau p} = \frac{1}{e^{\tau p}} = \frac{12 - 6\tau p + \tau^2 p^2}{12 + 6\tau p + \tau^2 p^2} = 1 - \frac{12\tau p}{\tau^2 p^2 + 6\tau p + 12}.$$

Подставив численные значения, найдем

$$e^{-0,2p} = 1 - \frac{0,2p}{0,0033p^2 + 0,1p + 1}.$$

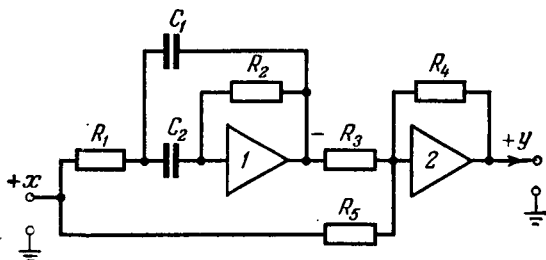


Рис. 70. Схема моделирования звена чистого запаздывания.

Очевидно, второе слагаемое правой части представляет собой произведение двух последовательно соединенных звеньев — дифференцирующего и апериодического второго порядка. На основании предыдущих примеров (85, 86) можно сделать вывод о том, что при моделировании данного звена по передаточным функциям потребуется пять операционных усилителей.

Используя пассивные элементы R и C , данную задачу представляется возможным решить на двух операционных усилителях (рис. 70).

Приняв $m_t = 1$ с, запишем $m_t R_2 C_2 = 0,2$; $m_t C_1 R_1 C_2 R_2 = 0,0033$; $m_t (C_1 R_1 + C_2 R_1) = 0,1$.

Решая совместно, получим

$$C_1 = 0,0194 \text{ мкФ}, R_1 = 0,85 \text{ МОм}, C_2 = 0,1 \text{ мкФ},$$

$$R_2 = 2 \text{ МОм}; R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ МОм}.$$

Пример 91. Составить схему моделирования нелинейной АСУ, структурная схема которой изображена на рисунке 57 и передаточная функция которой (см. пример 78)

$$W_0(p) = \frac{2}{p(1,5p+1)}.$$

Нелинейное звено описывается системой уравнений

$$x_2 = \pm 1 \quad \text{при} \quad |x_1| \geq 1$$

$$x_2 = 0 \quad \text{при} \quad |x_1| \leq 1$$

Решение. Линейная часть АСУ представляет собой произведение передаточных звеньев двух последовательно соединенных звеньев — интегрального и инерционного.

В соответствии с таблицей 3 можно определить схемы моделирования для каждого из линейных звеньев (рис. 71).

Нелинейность представляет собой однозначную характеристику релейного звена с зоной нечувствительности (см. табл. 4, п. 6).

Модель этого звена приведена на рисунке 71. При $m_t = 1$

$$R_1 C_1 = 1 \text{ с}; R_1 = 1 \text{ МОм}; C_1 = 1 \text{ мкФ}; \frac{R_3}{R_2} = 2;$$

$$R_3 C_2 = 1,5 \text{ с}; C_2 = 1 \text{ мкФ}; R_3 = 1,5 \text{ МОм}; R_2 = 0,75 \text{ МОм}.$$

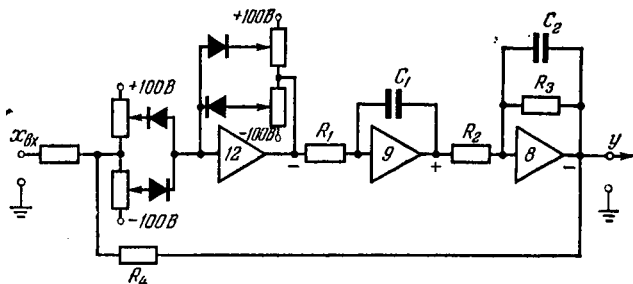


Рис. 71. Схема моделирования нелинейной АСУ.

Пример 92. Составить схему моделирования нелинейной АСУ, структурная схема которой изображена на рисунке 61, если передаточная функция линейной части АСУ

$$W_0(p) = \frac{1,7}{p^2 + 0,5p + 1},$$

а параметры нелинейного звена $x_2 = 3$ при $|x_1| > 0$.

Решение. Из условий задачи следует, что линейная часть АСУ представляет собой колебательное звено. Моделирование такого звена дано в примере 86. При $m_t = 1$ передаточная функция модели $W_0(p)$ и в процессе составления модели может быть представлена как

$$W(p) = \frac{\frac{3,4}{p(2p+1)}}{1 + \frac{1}{1,7} \cdot \frac{3,4}{p(2p+1)}}.$$

В таком случае удобно составить схему модели по передаточным функциям (рис. 72). Нелинейное звено представляет собой идеальное реле, модель которого приведена в таблице 4 (пункт 3).

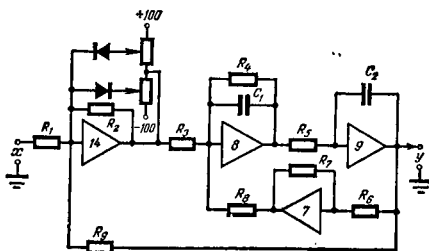


Рис. 72. Схема моделирования нелинейной АСУ.

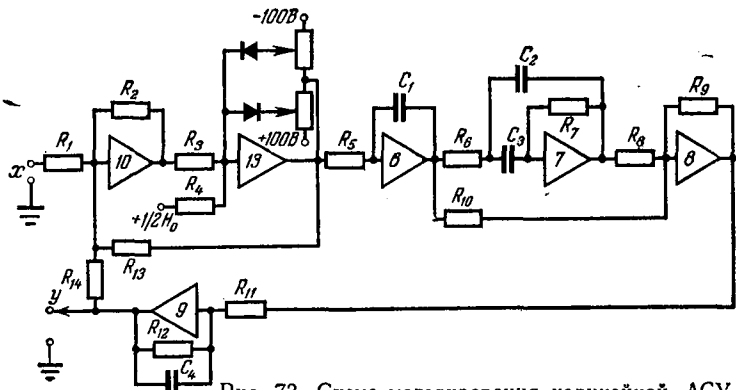


Рис. 73. Схема моделирования нелинейной АСУ.

Параметры модели $m_t = 1$ (R — [Ом], RC — [с], C — [мкФ]):

$$\frac{R_2}{R_1} = 3; R_1 = 1; R_2 = 3; R_4 \cdot C_1 = 2; C_1 = 1; R_4 = 2; \frac{R_4}{R_3} = 3,4;$$

$$R_3 = 0,59; R_5 \cdot C_2 = 1; R_5 = 1; C_2 = 1; \frac{R_7}{R_6} = 0,59;$$

$$R_6 = 1; R_7 = 0,59; R_8 = 1; R_9 = 1.$$

Пример 93. Составить схему моделирования АСУ башенной водоканчки, функциональная схема которой изображена на рисунке 22. Передаточные функции линейных звеньев

$$W_0(p) = \frac{3}{2p+1}, \quad W_1(p) = \frac{1}{p}.$$

Передаточная функция нелинейного звена чистого запаздывания

$$W_2(p) = e^{-\tau p}, \quad \text{где } \tau = 0,2 \text{ с.}$$

Гистерезисный релейный элемент имеет параметры

$$B = v_2 = 1; \pm a = \pm \frac{1}{2} H_0 = 0,5.$$

Решение. Схемы моделирования инерционного и интегрального линейных звеньев даны в примерах 84 и 85, а нелинейного звена чистого запаздывания — в примере 90. Схема моделирования релейного звена с гистерезисной петлей приведена в таблице 4 (пункт 4).

Схема модели изображена на рисунке 73. Ее параметры при $m_t = 1$ (R — [Ом], RC — [с], C — [мкФ]):

$$R_1 = R_2 = 1; R_4 = R_{13} = 1; R_5 C_1 = 1; R_5 = 1; C_1 = 1;$$

$$R_6 = 0,835; C_2 = 0,0194; C_3 = 0,1; R_7 = 2; R_8 = 1;$$

$$R_9 = 1; R_{10} = 1; R_{11} = 1; R_{13} C_4 = 2; C_4 = 1; R = 2; \frac{R_{12}}{R_{11}} = 3;$$

$$R_{11} = 0,67; R_{14} = 1.$$

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА



§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Все задачи по расчету показателей надежности решаются на основе теории вероятностей, математической статистики, теории массового обслуживания, теории информации и т. п.

Показатели надежности определяются в соответствии с ГОСТ 13216—67 и ГОСТ 13377—67. Термины, связанные с надежностью и утвержденные в ГОСТ 13216—67, можно разделить на четыре основные группы.

В первую группу входят изделия, надежность которых определяется. Под *изделием* подразумевают как отдельный элемент системы, так и систему в целом. Различают *восстанавливаемые* и *невосстанавливаемые* изделия, которые после наступления явления отказа (см. ниже) соответственно могут быть восстановлены или не могут быть восстановлены. Например, к восстанавливаемым изделиям относят комбайн, трактор, различные схемы АСУ (в частности, изображенные на рисунках 21 — 27) и др., а к невосстанавливаемым — шариковый подшипник, болт, гайку, лампу накаливания, резистор, конденсатор, транзистор и т. п.

Вторая группа терминов объединяет состояния и события, которые испытывают изделия. Изделие может находиться в состоянии исправности, неисправности, работоспособности.

Исправность — это состояние, при котором изделие в данный момент удовлетворяет всем требованиям, установленным как в отношении основных параметров, характеризующих выполнение заданных функций, так и в отношении второстепенных показателей, отражающих, например, удобство эксплуатации и т. д.

Неисправность — это состояние, при котором изделие в данный момент времени не удовлетворяет хотя бы одному из требований, установленных в отношении основных и второстепенных параметров.

Работоспособность — это состояние, при котором изделие в данный момент времени соответствует всем требованиям, установленным в отношении основных параметров, характеризующих нормальное выполнение заданных функций.

Отказ — это событие, заключающееся в полной или частичной утрате работоспособности изделия. В зависимости от характера изменения параметра принято различать внезапные (катастрофические), постепенные и кратковременные отказы. *Внезапные отказы* возникают в результате скачкообразного изменения одного или нескольких основных параметров (например, короткие металлические замыкания проводов в электрических схемах, разрыв шланга гидросистемы и т. п.).

Постепенные отказы происходят в результате плавного изменения параметров изделия вследствие износа, старения, нестабильности параметров отдельных элементов изделия. *Кратковременные отказы*, или сбои, вызваны появлением помех в линиях связи, источниках питания и т. п.

В третью группу включены термины, которые характеризуют совокупность свойств, определяющих пригодность изделия к эксплуатации: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, надежность.

Безотказность — свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого интервала времени.

Долговечность — свойство изделия длительно с возможными перерывами на ремонт сохранять работоспособность вплоть до разрушения или другого предельного состояния.

Ремонтпригодность — свойство изделия, заключающееся в приспособленности изделия к предупреждению, обнаружению и устранению неисправностей и отказов. Им обладают в основном восстанавливаемые изделия.

Самое важное свойство — **надежность**, под которой понимают способность изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в надлежащих пределах в течение требуемого промежутка времени, или нужной наработки, и обусловленное безотказностью, ремонтпригодностью и долговечностью.

Свойство изделия выполнять функции, для осуществления которых оно предназначено при реальной надежности и в определенных условиях, называют **эффективностью функционирования**. Она определяется общей надежностью АСУ.

В четвертую группу терминов входят количественные показатели, характеризующие надежность, безотказность, долговечность и эффективность функционирования изделий. Основными из них являются вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, интенсивность потока отказов (для сложных изделий), наработка на отказ или среднее время безотказно работы, срок службы, технический ресурс.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ — вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки отказ изделия не возникнет. Нижнее значение $P(t)$ при доверительной вероятности $P^* = 0,8$ должно выбираться в пределах $0,999-0,75$.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ — вероятность отказа невосстанавливаемого изделия в единицу времени. Интенсивность потока отказов $\Lambda(t)$ — среднее количество отказов восстанавливаемого изделия в единицу времени, взятого для рассматриваемого момента времени. Верхние значения $\lambda(t)$ и $\Lambda(t)$ при $P^* = 0,8$ для изделия может по ГОСТу находиться в пределах от $0,8 \cdot 10^{-6}$ до $50 \cdot 10^{-3}$ 1/ч.

Наработка на отказ $T_{\text{нар}}$ — среднее значение наработки восстанавливаемого изделия между двумя последовательно возникшими отказами. Нижнее значение $T_{\text{нар}}$ при $P^* = 0,8$ может находиться, в соответствии с ГОСТом, в пределах 20 000—320 ч.

Для восстанавливаемых изделий в процессе длительной эксплуатации очень показателен ряд коэффициентов эксплуатационной надежности.

Коэффициент готовности, который отражает вероятность того, что устройство в любой заданный момент времени рассматриваемого периода эксплуатации исправно:

$$K_r = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}}},$$

где $t_{\text{раб}}$ — время, в течение которого изделие находится в работе;
 $t_{\text{рем}}$ — время, в течение которого изделие ремонтировалось (среднее время ремонта изделия).

Коэффициент технического использования, характеризующий долю времени работы изделия по отношению к суммарному времени работы, ремонта и профилактики $t_{\text{проф}}$:

$$K_{\text{т. и}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{проф}}}.$$

Коэффициент использования, определяющий эффективность использования изделия:

$$K_{\text{и}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{э}}},$$

где $t_{\text{э}} = t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{проф}} + t_{\text{покоя}}$ — общее время эксплуатации изделия.

Коэффициент профилактики, характеризующий долю времени, затраченную на профилактику по отношению к времени работы:

$$K_{\text{проф}} = \frac{t_{\text{проф}}}{t_{\text{раб}}}.$$

Свойство эффективности функционирования может быть оценено и по *коэффициенту эффективности*:

$$K_{\text{э}} = \frac{B_{\text{п}}}{B_{\text{н}}},$$

где $B_{\text{п}}$ и $B_{\text{н}}$ — производительность соответственно с учетом появления отказов некоторых узлов и элементов изделия и нормальная — без появления отказов изделия.

В качестве величин $B_{\text{п}}$ и $B_{\text{н}}$ принимают также объемы выполненных работ, быстродействие работы, материальные потери, дальности полета и т. п.

Автоматические системы управления сельскохозяйственного назначения относятся, как правило, к изделиям с избыточной структурой, лишенным резервирования. Для них определяется *норма надежности*, то есть величина показателя надежности, подлежащая обеспечению. Чаще всего для АСУ сельскохозяйственного назначения норма надежности может устанавливаться в виде времени наработки на отказ $T_{\text{нар}}$. Она является непрерывной случайной величиной.

Непрерывные случайные величины подчиняются законам равномерного, экспоненциального, нормального, нормально-логарифмического распределений, распределений Реллея, Вейбула, Эрланга и гамма-распределения.

Наибольшее практическое значение приобретает экспоненциальный закон распределения, поскольку отказы большинства невосстанавливаемых изделий, особенно электрических, характеризуются экспоненциальным распределением. Для восстанавливаемых изделий, работающих в установившемся режиме и имеющих $T_{\text{нар}} \ll T_{\text{рес}}$, показатели надежности подчиняются этому же распределению.

Для экспоненциального закона распределения

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad P(t) = 1 - \int_{-\infty}^t f(t) dt = e^{-\lambda t}; \quad m_{\text{ср}} = \sigma = \frac{1}{\lambda},$$

где $f(t)$ — плотность вероятности;

$m_{\text{ср}}$ — математическое ожидание случайной величины;

σ — среднеквадратическое отклонение случайной величины.

При ориентировочных расчетах показателей надежности катастрофические, постепенные и кратковременные отказы могут приниматься независимыми. Тогда вероятность безотказной работы невосстанавливаемого изделия

$$P(t) = P_k(t) P_n(t) P_c(t),$$

где $P_k(t)$, $P_n(t)$ и $P_c(t)$ — соответственно вероятности безотказной работы при катастрофических, постепенных и кратковременных отказах.

Для катастрофических отказов при экспоненциальном законе распределения параметры надежности отдельных изделий АСУ определяют, пользуясь специальной литературой (18), или экспериментально по формуле

$$\lambda = \frac{M}{N t_{\text{раб}}},$$

где M — количество отказавших изделий;

N — общее количество изделий.

По результатам эксперимента время наработки на отказ можно подсчитать так:

$$T_{\text{нар}} \approx \sum_{i=1}^n t_{\text{раб } i},$$

где $t_{\text{раб } i}$ — время исправной работы i -го элемента.

Плотность вероятности

$$f(t) = \lambda(t) P(t).$$

При $\lambda = \text{const}$

$$f(t) = \frac{1}{T_{\text{нар}}} e^{-\frac{t}{T_{\text{нар}}}}.$$

Постепенные и кратковременные отказы происходят в процессе эксплуатации. Однако для АСУ сельскохозяйственного назначения пока еще накоплено мало статистических данных по этим видам отказа. Поэтому при расчете показателей надежности величины $P_n(t)$ и $P_c(t)$ нужно определять экспериментально или можно принять, что $P_n(t) = 1$ и $P_c(t) = 1$.

Показатели надежности зависят от режима работы элементов АСУ и условий окружающей среды (температура, влажность, давление воздуха, вибрации, удары, агрессивность среды), которые по возможности следует учитывать в результате расчета [18] или приближенно при помощи поправочного коэффициента K_λ ; $\lambda_i = \lambda_{i0} \cdot K_\lambda$, где λ_{i0} и λ_i — соот-

ветственно интенсивность отказов в лабораторных и реальных производственных условиях.

Для лабораторных и производственных помещений $K_\lambda = 1$, стационарных наземных устройств $K_\lambda = 10$, мобильных агрегатов, железнодорожных платформ $K_\lambda = 25 \div 30$, высокогорных условий работы $K_\lambda = 80$.

Вероятность безотказной работы АСУ — сложного восстанавливаемого изделия — определяется показателями надежности совокупности простых элементов ее структуры. При последовательном соединении элементов

$$P_\Sigma(t) = \prod_{i=1}^{i=n} P_i(t), \text{ а } F_\Sigma(t) = 1 - P_\Sigma(t),$$

где $P_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента. При параллельном соединении элементов

$$F_\Sigma(t) = \prod_{i=1}^{i=n} F_i(t), \text{ а } P_\Sigma(t) = 1 - F_\Sigma(t),$$

где $F_i(t)$ — вероятность отказов i -го элемента.

Эффективность функционирования (ее еще называют общей надежностью изделия) может характеризоваться общей вероятностью безотказной работы с учетом показателей эксплуатационной надежности:

$$P_n(t) = K_r P_\Sigma(t) = \frac{T_{\text{нар}}}{T_{\text{нар}} + t_{\text{рем}}} e^{\frac{-t_a}{T_{\text{нар}}}}.$$

Последовательность расчета показателей надежности АСУ с неизменной структурой такова:

1. Выделяют из всей АСУ основные элементы, выполняющие заданные функции, то есть составляют структурную схему АСУ.

2. Определяют режимы работы основных элементов и их изменение при отказах во вспомогательных элементах (источниках смещения, питания, в измерительных приборах и т. п.).

3. Выявляют пределы изменения условий окружающей среды (температуры, влажности, давления воздуха, агрессивности, ускорений, ударов, вибраций и т. п.).

4. С учетом режимов и условий работы каждого элемента определяют показатели простейших невосстанавливаемых изделий, из которых состоит АСУ.

5. Находят показатели надежности всей АСУ.

6. Вычисляют эксплуатационные коэффициенты надежности K_r , K_n , $K_{r,n}$ и т. д.

7. Определяют показатели эффективности функционирования.

Если расчетные показатели надежности АСУ ниже нормированных, то надежность системы можно повысить в результате улучшения технологии изготовления и монтажа отдельных элементов, снижения влияния шумов и помех в них, уменьшения нагрузки или резервирования отдельных элементов, проведения своевременных профилактических испытаний.

§ 2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Пример 94. Определить показатели надежности АСУ, изображенной на рисунке 22, за 1000 ч работы. Показатели надежности элементов схемы приведены в таблице 5.

Таблица 5

Интенсивность отказов элементов АСУ

Элементы АСУ	Количество элементов, шт.	Интенсивность отказов λ , 10^{-6} 1/ч	
		нижний предел	верхний предел
Рубильник трехполюсный	1	0,56	12,6
Предохранители	3	0,3	0,82
Ключ управления	1	0,25	1,0
Выпрямитель двухполупериодный	1	0,26	1,6
Электродный датчик уровня, расположенный в баке с водой	1	7,0	52,2
Глубинный насос с электродвигателем	1	3,33	31,3
Контактор	1	0,86	33,6
Соединительный кабель	1	0,002	0,17

Принимаем, что каждый отказ элемента АСУ ведет к нарушению работы всей АСУ. Отказы элементов подчиняются экспоненциальному закону. Система имеет номинальный режим загрузки и работает постоянно в помещении с диапазоном температур $+20^{\circ}\text{C} \div +2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажностью воздуха 90—75%.

Решение. Условия работы АСУ можно считать нормальными, для которых $K_{\lambda} = 10$. Из схемы видно, что все элементы АСУ соединены последовательно. Отказы элементов по условию задачи — независимые события. Тогда

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^{i=8} \bar{P}_i(t), \quad P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad t_x = 1000 \text{ ч.}$$

$$\text{Отсюда } \lambda_{\Sigma} = K_{\lambda} \sum_{i=1}^{i=8} \lambda_i.$$

Нижний предел интенсивности потока отказов:

$$\lambda_{\Sigma \text{ ниж}} = 10 (0,56 + 30,3 + 0,25 + 0,26 + 7 + 3,33 + 0,86 + 0,002) = 131 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Время наработки на отказ при этом

$$T_{\text{нар. верх}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma \text{ ниж}}} = \frac{1}{131 \cdot 10^{-6}} = 7650 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы

$$P_{\Sigma}(t)_{\text{верх}} = e^{-\lambda_{\Sigma} \cdot 1000} = e^{-131 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = e^{-0,131} \approx 0,88.$$

Верхний предел интенсивности потока отказов

$$\lambda_{\Sigma \text{ верх}} = 10 (12,6 + 3 \cdot 0,82 + 1 + 1,6 + 52,2 + 31,3 + 31,6 + 0,17) = 1349,3 \cdot 10^{-6} \approx 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Время наработки при этом

$$T_{\text{нар. ниж}} = \frac{10^3}{1,35} = 740 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы

$$P_{\Sigma}(t)_{\text{ниж}} = e^{-1,35 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}} \approx 0,26.$$

Расчетные показатели надежности близки к реальным. В условиях эксплуатации нижний предел срока службы двигателей глубинных насосов составляет 400—700 ч.

Пример 95. Норма надежности для АСУ (рис. 23) составляет $P(t)_{\text{нор}} = 0,95$. Определить, соответствует ли реальное значение $P_{\Sigma}(t)$ норме надежности за 1000 ч работы, если интенсивности отказов элементов следующие.

Элементы АСУ	Количество элементов, шт.	Среднее значение $\lambda_i 10^{-6} \text{ 1/ч}$
Генератор переменного тока	1	15,0
Возбудитель	1	12,4
Регулировочные реостаты	3	0,13
Выпрямитель селеновый	1	0,76
Трансформатор обратной связи	1	0,2
Угольный регулятор	1	15,0

Отказы всех элементов подчиняются экспоненциальному закону распределения. Максимальное время ремонта одного из изделий 100 ч.

Решение. Все элементы АСУ соединены последовательно. Отказ каждого элемента ведет к отказу всей АСУ. Полная вероятность безотказной работы АСУ при этих условиях

$$P_n(t) = K_T \prod_{i=1}^{i=6} e^{-\lambda_i t_{\text{раб}}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}}} e^{-t_{\text{раб}}} \cdot \left(\sum_1^6 \lambda_i \right) =$$

$$= \frac{1000}{1000 + 100} e^{-1000(15 + 12,4 + 3 \cdot 0,13 + 0,76 + 0,2 + 15)10^{-6}} \approx 0,951.$$

Показатель общей надежности соответствует норме надежности:

$$P_n(t) \approx P(t)_{\text{норм.}}$$

Пример 96. Определить время безотказной работы и время наработки на отказ для АСУ (рис. 24), если известно, что вероятность безотказной работы АСУ $P_{\Sigma}(t) = 0,95$ и система работает в нормальных промышленных условиях. Значения интенсивности потока отказов отдельных ее элементов приведены ниже.

Элементы АСУ	Количество элементов, шт.	Среднее значение λ , 10^{-6} 1/ч
Двигатель постоянного тока	1	9,36
Генератор постоянного тока	1	0,9
Электромашина усилитель	1	5,5
Ламповые триоды	4	7,8
Резисторы	5	0,07
Реостаты	4	0,13
Тахогенератор	1	0,3
Конденсатор бумажный	1	0,02
Источник постоянного тока	1	2,8

Отказы всех элементов имеют экспоненциальное распределение.

Решение. В соответствии с законом экспоненциального распределения можно записать:

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^{i=9} e^{-t \lambda_i K_{\lambda}} = e^{-t \sum_1^9 \lambda_i K_{\lambda}}$$

Отсюда

$$t_x = \frac{\ln P_{\Sigma}(t)}{K_{\lambda} \sum_1^9 \lambda_i} = \frac{\ln 0,95}{10 \cdot 51 \cdot 10^{-6}} = 100 \text{ ч.}$$

Для нормальных промышленных условий $K_{\lambda} = 10$, следовательно

$$\sum_1^9 \lambda_i = 10^{-6} (9,36 + 0,9 + 5,5 + 4 \cdot 7,8 + 5 \cdot 0,07 + 4 \cdot 0,13 + 0,3 + 0,02 + 2,8) \approx 51 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Время наработки на отказ

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{K_{\lambda} \sum_1^9 \lambda_i} = \frac{1}{10 \cdot 51 \cdot 10^{-6}} = 1960 \text{ ч.}$$

✓ **Пример 97.** Определить показатели надежности системы автоматического управления сушкой зерна (рис. 25) за 1000 ч работы при циклическом ее характере: сушка — 14 ч, перерыв — 10 ч. Значения интенсивности отказов отдельных элементов даны в таблице 6.

Таблица 6

Интенсивность отказов элементов АСУ

Элементы АСУ	Количество элементов, шт.	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$ 1/ч, в режиме	
		работы	покоя
Термоизмерительный мост	1	6,4	0,5
Регулирующая заслонка	1	4,3	1,5
Редуктор	1	6,3	1,2
Двигатель постоянного тока	1	0,35	0,1
Усилитель постоянного тока	1	15,5	0,6
Жесткая механическая обратная связь	1	0,04	0,02
Сушилка	1	0,3	0,1
Воздуховод	1	0,2	0,05
Блок питания	1	0,2	0,05
Терморезистор	1	7,2	0,4

Закон распределения отказов экспоненциальный.

Решение. При циклической работе экспоненциальный закон распределения катастрофических отказов запишется

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-n \sum_{i=1}^9 (\lambda_{pi} t_p + \sum \lambda_{ni} t_n) K_{\lambda}}$$

Подставляя в это выражение

$$n = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_n} = \frac{1000}{14 + 10} = 42 \text{ цикла работы,}$$

$$\Sigma \lambda_{pi} = 6,4 + 4,3 + 6,3 + 0,35 + 15,5 + 0,04 + 0,3 + 0,2 + 0,2 + 7,2 = 40,79 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч;}$$

$$\Sigma \lambda_{ni} = 0,5 + 1,5 + 1,2 + 0,1 + 0,6 + 0,02 + 0,1 + 0,05 + 0,05 + 0,4 = 4,66 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч и } K_{\lambda} = 10, \text{ найдем}$$

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-42 \cdot 10 (40,79 \cdot 14 + 4,66 \cdot 10) \cdot 10^{-6}} = e^{-0,26} \approx 0,77.$$

Время наработки на отказ

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{\lambda_{\text{экр}}} = \frac{t_{\text{раб}}}{-\ln P_{\Sigma}(t)} = \frac{1000}{0,26} = 3860 \text{ ч.}$$

Пример 98. Определить вероятность безотказной работы подшипника за 1000 ч работы. Глубина износа за это время $h_x = 0,02$ мм. Критическая величина износа $h_{\text{кр}} = 0,5$ мм. Среднеквадратическое отклонение $\sigma = 2,5$.

Решение. Вероятность величины износа подшипников во времени

$$\lambda = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\frac{(-h_x - \bar{h})^2}{2\sigma^2}} \cdot h_x \cdot \frac{1}{t}.$$

Вероятность безотказной работы во времени

$$\begin{aligned} P(t) &= e^{-\int_0^T \lambda dt} = e^{-\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(h_x - \bar{h})^2}{2\sigma^2}} \cdot h_x \ln T} = \\ &= e^{-\frac{1}{2,5 \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(0,02 - 2,5)^2}{2 \cdot 2,5^2}} \cdot 0,02 \cdot \ln 1000} = 0,805. \end{aligned}$$

Пример 99. Для двух бригад рассчитать и сравнить показатели надежности по катастрофическим отказам, по коэффициентам эксплуатационной надежности и по эффективности функционирования автоматических систем загрузки рабочих органов комбайнов СК-4 за 200 ч непрерывной работы. Каждый комбайн передовой бригады работал по 18 ч

чистого времени за сутки. В соответствии с нормами технической эксплуатации на профилактические мероприятия затрачивалось около 1 ч в сутки, устранение организационно-технических неполадок занимало около 3 ч в сутки. В этой бригаде средний намолот зерна на комбайн 80 ц/ч. Каждый комбайн отстающей бригады работал 7 ч чистого времени, на профилактику было использовано 0,2 ч в сутки, на организационно- и ремонтно-технические неполадки затрачивалось около 10,5 ч в сутки. Средний намолот составил 50 ц/ч. Значения интенсивности потока катастрофических отказов приняты такими:

Элементы АСУ	Количество элементов, шт.	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$ 1/ч
Плавающий транспортер	1	16,0
Полосковый датчик	1	15,3
Источник питания преобразователя	1	5,3
Электрический преобразователь	1	5,6
Электрический усилитель	1	5,5
Электродвигатель постоянного тока	1	3,2
Редуктор	1	1,6
Гидрораспределитель с соединительными шлангами	1	9,3
Вариатор ходовой части с клиноременной передачей	1	10,5
Двигатель внутреннего сгорания	1	50,0

Закон распределения катастрофических отказов можно считать экспоненциальным.

Решение. При экспоненциальном распределении отказов общая интенсивность потока отказов с учетом того, что для мобильных систем $K_\lambda = 30$

$$\lambda_\Sigma = K_\lambda \sum_{i=1}^9 \lambda_i = 30 (16,6 + 15,3 + 5,3 + 5,6 + 5,5 + 3,2 + 1,5 + 9,3 + 10,5 + 50) \cdot 10^{-6} \approx 0,037.$$

Время наработки на отказ

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{\lambda_\Sigma} = 270 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы за 200 ч

$$P_\Sigma(t) = e^{-\lambda_\Sigma t} = e^{-0,037 \cdot 200} = e^{-7,4} \approx 0,0006.$$

Поскольку $P_{\Sigma}(t)$ АСУ близки к нулю, необходимо проводить регулярные профилактические осмотры и технические обслуживания в соответствии с нормами технической эксплуатации комбайна. Эффективность этих мероприятий характеризуют показатели эксплуатационной надежности — коэффициенты готовности, использования, технического использования профилактики, эффективности функционирования и т. п. Они для обеих бригад подсчитаны и сведены в таблицу 7.

Т а б л и ц а 7

К примеру 99

Показатели эксплуатационной надежности	Формула расчета	Результаты расчета для бригад	
		передовой	отстающей
Коэффициент готовности	$K_r = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}}}$	0,86	0,4
Коэффициент технического использования	$K_{\text{т.и}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{проф}} + t_{\text{рем}}}$	0,82	0,396
Коэффициент использования	$K_{\text{и}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{проф}} + t_{\text{покою}}}$	0,75	0,29
Коэффициент профилактики	$K_{\text{пр}} = \frac{t_{\text{проф}}}{t_{\text{раб}}}$	0,056	0,029
Эффективность функционирования отстающей бригады по отношению к передовой	$K_{\text{э}} = \frac{B_{\text{ф}}}{B_{\text{н}}}$	1,0	0,63

§ 3. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В подавляющем числе случаев автоматизация сельскохозяйственных процессов связана с коренной заменой оборудования и помещений, с созданием новой технологии, обеспечивающей органичное применение методов и средств автоматизации. Основным критерием жизнеспособности новых технических решений является их экономическая целесообразность.

Экономическая эффективность автоматизации измеряется степенью уменьшения совокупного живого и прошлого труда, затрачиваемого на производство единицы продукции. При автоматизации сельскохозяйственных производственных процессов стоимость капитальных затрат обычно возрастает, а эксплуатационные расходы на единицу продукции существенно сокращаются. Другими словами, количество прошлого

труда возрастает в меньшей степени, чем уменьшаются затраты живого труда. Таким образом, эффективность автоматизации характеризуется суммарным сокращением затрат на производство продукции.

Основными показателями экономической эффективности автоматизации являются производительность труда и расчетные затраты, капитальные затраты и сроки их окупаемости, эксплуатационные издержки и себестоимость продукции. При этом существенное значение имеет также уменьшение потерь и улучшение качества продукции, облегчение труда человека и обеспечение безопасности его работы, увеличение числа часов использования и срока службы строительного и технологического оборудования.

Эффективность автоматизации выражается в конечном счете в росте производительности труда и продуктивности сельскохозяйственного производства, которые ведут к снижению себестоимости продукции.

Производительность труда — важнейший показатель экономической эффективности, который определяется количеством продукции, произведенной в единицу рабочего времени, или количеством рабочего времени, затраченного на производство единицы продукции.

Повышение производительности труда, которое произошло в результате применения автоматизации, отражает уменьшение затрат труда, выражаемое в процентах:

$$\Delta P = \frac{P_n - P_a}{P_n} \cdot 100\%.$$

Благодаря повышению производительности получается экономия труда:

$$\mathcal{E}_T = (P_n - P_a) Q_a,$$

где P_n — затраты труда на единицу продукции или вид работы при неавтоматизированном способе производства;

P_a — то же, при автоматизированном способе производства;

Q_a — годовое производство продукции при автоматизированном способе производства.

В состав капитальных затрат на автоматизацию входят балансовая цена установок и средств автоматизации и затраты на модернизацию действующей техники и технологии, балансовая цена строительства и реконструкции зданий в связи с внедрением автоматизации, остаточная стоимость основных средств, подлежащих ликвидации при внедрении устройств автоматики, за вычетом стоимости, полученной от реализации части ликвидируемых основных средств.

Остаточную стоимость определяют по формуле

$$K_c = K_n (1 - \rho_A T) - K_{\text{л}},$$

где K_n — первоначальная стоимость ликвидируемого оборудования;

ρ_A — годовая норма амортизации на реновацию;

T — число лет, отработанных ликвидируемым оборудованием;

$K_{\text{л}}$ — ликвидационная стоимость оборудования, которое может быть использовано в хозяйстве или передано другим хозяйствам.

Необходимо подчеркнуть, что при определении капитальных затрат на автоматизацию следует учитывать лишь те дополнительные затраты на здания, оборудование и перестройку технологии, которые вызваны только внедрением средств автоматизации.

Годовые эксплуатационные издержки производства складываются из амортизационных отчислений I_A , отчислений на текущий ремонт I_T , затрат на зарплату обслуживающего персонала I_o , стоимости электроэнергии I_e и стоимости горюче-смазочных материалов I_r :

$$I = I_A + I_T + I_o + I_e + I_r.$$

Амортизационные отчисления и отчисления на текущий ремонт определяются соответственно

$$I_A = \rho_A K \text{ и } I_T = \rho_T K,$$

где ρ_A — коэффициент амортизационных отчислений, определяемый по единым нормам отчислений по основным фондам народного хозяйства СССР;

ρ_T — коэффициент отчислений на текущий ремонт, определяемый по отраслевым нормам.

Годовой расход заработной платы обслуживающему персоналу

$$I_o = \sum_{j=1}^m D_{oj} C_{oj},$$

где $j = 1 \dots m$ — количество обслуживающего персонала;

D_{oj} — длительность работы j -го обслуживающего персонала в году, ч;

C_{oj} — часовая ставка для j -го обслуживающего персонала с учетом отчислений в соцстрах и надбавок к зарплате.

Затраты на электроэнергию

$$I_e = \sum_{i=1}^n D_{ei} K_{\pi i} P_{yi} C_{ei},$$

i — вид системы, расходующей электроэнергию;

P_y — установленная мощность системы, кВт;

D_e — длительность работы системы в году, ч;

C_e — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.;

K_{π} — коэффициент использования установленной мощности системы.

Затраты на горюче-смазочные материалы равны произведению массы израсходованных горюче-смазочных материалов на их преysкурantную цену с учетом транспортных расходов.

Экономия годовых эксплуатационных издержек

$$\mathcal{E}_n = I_n - I_a \pm D,$$

где I_n — годовые издержки при неавтоматизированном способе производства;

I_a — то же, при автоматизированном способе производства;

D — дополнительный доход (при знаке плюс) за счет увеличения количества продукции, за счет уменьшения потерь и т. п.; или стоимость убытка (при знаке минус) за счет недополученной продукции или ухудшения ее качества, за счет перерасхода материалов.

Если какой-либо процесс можно автоматизировать различными способами, то следует выбрать самый эффективный вариант автоматизации. При этом очень важно за базовый вариант сравнения принять наиболее

передовой и совершенный способ механизированного производства, применяемый в отечественной или зарубежной практике, поскольку при сравнении с менее совершенным способом производства можно получить в расчетах завышенную экономию средств. Фактически же этот уровень может быть достигнут за счет более прогрессивной технологии машинного способа производства без привлечения автоматизации.

Выбор наиболее эффективных направлений и оптимальных вариантов механизации и автоматизации определяется минимальным сроком окупаемости или максимальным коэффициентом эффективности капитальных вложений.

Срок окупаемости капитальных затрат на автоматизацию при одинаковом годовом объеме производства находят по формуле:

$$T_o = \frac{K_a - K_n}{I_n - I_a},$$

где K_n и K_a — капитальные затраты соответственно неавтоматизированного и автоматизированного производства ($K_n < K_a$);

I_n и I_a — эксплуатационные расходы соответственно неавтоматизированного и автоматизированного производства ($I_n > I_a$).

Если автоматизация влияет на себестоимость C единицы вырабатываемой продукции, на годовую выработку P рабочего, списочный штат $Ш$ рабочих и отпускаемую продажную цену $Ц$, отнесенную к единице вырабатываемой продукции, то при определении срока окупаемости следует пользоваться формулой

$$T_o = \frac{K_a - K_n}{(Ц_a - C_a) Ш_a P_a - (Ц_n - C_n) Ш_n P_n},$$

где K_a и K_n — соответственно первоначальные капиталовложения автоматизированного и неавтоматизированного производства.

Эта формула учитывает увеличение объема продукции благодаря использованию автоматизации ($Ш_a P_a > Ш_n P_n$), повышению качества вырабатываемой продукции ($Ц_a > Ц_n$) и снижению ее себестоимости ($C_a < C_n$).

По сроку окупаемости судят о степени эффективности автоматизации: чем меньше срок окупаемости, тем выше эффективность.

Расчетный срок окупаемости сравнивают с *нормативным сроком окупаемости*, который устанавливается директивными органами на основе экономического анализа хозяйства страны. В СССР нормативный срок окупаемости сельскохозяйственной техники принят равным 5 годам.

Нормативный коэффициент экономической эффективности дополнительных капитальных вложений представляет собой величину, обратную нормативному сроку окупаемости:

$$E = \frac{1}{T_{o.н}},$$

и для сельского хозяйства установлен равным 0,2.

Обобщающим показателем эффективности капитальных вложений могут служить так называемые приведенные, или расчетные, затраты, которые определяют по формуле

$$З = EK + И.$$

Следует отметить, что в процессе сравнения вариантов автоматизации может возникнуть такой случай, когда при внедрении новых устройств автоматизации капитальные вложения K_2 и годовые эксплуатационные расходы I_2 окажутся выше, чем для старого варианта K_1 и I_1 , но тем не менее второй вариант будет экономически эффективным за счет дополнительного дохода D вследствие увеличения продуктивности, уменьшения расхода кормов, улучшения качества продукции или сохранности поголовья скота и т. д. В соответствии с этим приведем неравенство, по которому определяют эффективность нового варианта:

$$EK_1 + I_1 > EK_2 + I_2 - D.$$

Ниже рассмотрены примеры определения экономической эффективности автоматизации стационарных сельскохозяйственных объектов. Более подробно с методикой определения экономической эффективности новой сельскохозяйственной техники можно ознакомиться по специальным литературным источникам [6, 13, 14].

§ 4. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Пример 100. Определить экономическую эффективность автоматизации водокачки со среднесуточным расходом воды $Q = 95 \text{ м}^3$. По данным [17], переход от ручной станции управления водокачкой на автоматическое управление требует увеличения капитальных вложений с 295 до 340 руб. и снижает годовые эксплуатационные издержки с 1425 до 880 руб. и затраты труда с 1157 до 96 чел.-ч

Таким образом, при вышепринятых обозначениях

$$K_n = 295 \text{ руб.} \quad I_n = 1425 \text{ руб.} \quad P_n = 1157 \text{ чел.-ч}$$

$$K_a = 340 \text{ руб.} \quad I_a = 880 \text{ руб.} \quad P_a = 96 \text{ чел.-ч}$$

Решение. Определяем себестоимость 1 м^3 воды неавтоматизированной водокачки:

$$C_n = \frac{I_n}{365 \cdot Q} = \frac{1425}{365 \cdot 95} = 4,1 \text{ коп./м}^3$$

и автоматизированной водокачки:

$$C_a = \frac{I_a}{365 \cdot Q} = \frac{880}{365 \cdot 95} = 2,54 \text{ коп./м}^3.$$

Находим снижение затрат труда:

$$\Delta P = \frac{P_n - P_a}{P_n} 100\% = \frac{1157 - 96}{1157} \cdot 100 = 92\%.$$

Вычисляем результирующий показатель эффективности — срок окупаемости дополнительных капитальных вложений:

$$T_o = \frac{K_a - K_n}{I_n - I_a} = \frac{340 - 295}{1425 - 880} = 0,0825 \text{ года} \approx 1 \text{ месяц.}$$

Нормативный срок окупаемости оборудования водокачек 5 лет, следовательно, автоматизация их имеет весьма высокие показатели эффективности.

Пример 101. Определить основные показатели эффективности автоматической линии в цехе по производству грабельных зубьев для уборочных машин. Автоматизация линии потребовала дополнительных капитальных вложений в сумме 204 900 руб. и позволила уменьшить число рабочих с 86 до 46 человек, повысить зарплату на 21%, увеличить выработку одного рабочего с 37 000 до 70 000 зубьев в год и снизить себестоимость зуба с 0,2 до 0,16 руб. Оптовая цена осталась прежней — 0,19 руб. за штуку.

Согласно вышепринятым обозначениям,

$$\begin{aligned} K_a - K_n &= 204\,900 \text{ руб.}, & C_n &= 0,2 \text{ руб./шт.}, \\ C_a &= 0,16 \text{ руб./шт.}, & Ш_n &= 86 \text{ чел.}, & Ш_a &= 46 \text{ чел.}, \\ Ц &= Ц_a = Ц_n = 0,19 \text{ руб./шт.}, & з &= 21\%, \\ P_n &= 37\,000 \text{ шт./чел.}, & P_a &= 70\,000 \text{ шт./чел.} \end{aligned}$$

Решение. Находим срок окупаемости капитальных затрат на автоматическую линию:

$$T_o = \frac{204\,900}{(0,19 - 0,16) \cdot 46 \cdot 70\,000 - (0,19 - 0,2) \cdot 86 \cdot 37\,000} = 1,6 \text{ года,}$$

то есть в несколько раз меньше нормативного срока окупаемости.

Расчетный коэффициент экономической эффективности дополнительных капитальных затрат на автоматизацию

$$E = \frac{1}{T_o} = \frac{1}{1,6} = 0,625.$$

Определяем повышение производительности труда, считая, что годовой выпуск продукции остался неизменным ($Ш_a P_a \approx Ш_n P_n$):

$$\Delta P = \frac{Ш_n - Ш_a}{Ш_n} \cdot 100 = \frac{86 - 46}{86} \cdot 100 = 46,5\%.$$

Вычисляем процент снижения себестоимости зубьев:

$$\Delta C = \frac{C_n - C_a}{C_n} \cdot 100 = \frac{0,2 - 0,16}{0,2} \cdot 100 = 20\%.$$

Пример 102. Определить эффективность автоматизации процесса регулирования температуры в теплице площадью $S = 1$ га. По экспериментальным данным, регулирование температуры дает повышение урожайности Q_a на 5% и экономию топлива на 15% при урожайности огурцов $Q_n = 0,18$ ц/м² и себестоимости $C_n = 35,7$ руб/ц. Удельные затраты на отопление в себестоимости 1 ц огурцов составляют 46%, то есть $I_T = 16,5$ руб/ц.

Стоимость системы регулирования температуры $K_a = K_n = 3000$ рублей (около 1% всех капитальных затрат).

Решение. Годовые эксплуатационные издержки производства при отсутствии регулирования температуры и одноразовым выгоне огурцов

$$I_n = C_n Q_n S = 35,7 \cdot 0,18 \cdot 10^4 = 64\,300 \text{ руб.}$$

Издержки производства I_a при наличии системы автоматического регулирования температуры, которые отличаются от I_n уменьшением издержек на расход топлива $\Delta I_T = 0,15 I_T Q_a S = 0,15 \cdot 16,5 \cdot 0,18 \cdot 10^4 = 4680$ руб., увеличением издержек на отчисление амортизации (14,2%), на текущий ремонт и техническое обслуживание (14%) системы регулирования температуры $\Delta I_{A.p} = (0,142 + 0,14) 3000 = 846$ руб., таковы

$$I_a = I_n - \Delta I_T + \Delta I_{A.p} = 64\,300 - 4680 + 846 = 60\,466 \text{ руб.}$$

Дополнительный доход от повышения урожайности огурцов на 5% при реализации по их себестоимости

$$D = 0,05 Q_n C_n S = 0,05 \cdot 0,18 \cdot 35,7 \cdot 10^4 = 3210 \text{ руб.}$$

Экономия годовых эксплуатационных издержек

$$\mathcal{E}_n = I_n - I_a + D = 64\,300 - 60\,466 + 3210 = 7044 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капитальных затрат на систему автоматического регулирования температуры

$$T_o = \frac{K_n - K_a}{\mathcal{E}_n} = \frac{3000}{7044} = 0,426 \text{ сезона.}$$

Фактически срок окупаемости будет меньше за счет того, что дополнительный доход D выше, поскольку огурцы реализуются по цене, большей их себестоимости.

Себестоимость C_a огурцов и процент ее снижения ΔC при автоматическом регулировании температуры:

$$C_a = \frac{I_a}{Q_a S} = \frac{60\,466}{0,189 \cdot 10^4} = 32 \text{ руб/ц}$$

и

$$\Delta C = \frac{C_n - C_a}{C_n} \cdot 100\% = \frac{35,7 - 32}{35,7} \cdot 100 = 10,4\%.$$

Пример 103. Определить экономическую целесообразность внедрения системы централизованного управления температурой в птичнике на 10 тысяч кур-несушек, разработанной в ВИЭСХе применительно к электрокалориферам по сравнению с серийной системой «Климат-4», использующей жидкостные теплогенераторы. По опытным данным ВИЭСХа, система централизованного управления обеспечивает увеличение яйценоскости кур-несушек на 1,2% и уменьшение расхода корма на 3%.

Решение. Структура капитальных и эксплуатационных затрат приведена в таблице 8.

Таблица 8

К примеру 103

Виды расхода	Обозначение	Стоимость, руб.	
		системы «Климат-4»	системы ВИЭСХа
Капитальные затраты на систему отопления		1380	1600
систему вентиляции		2300	2060
систему автоматики		980	1380
Всего на оборудование	K_o	4660	5040
Общие капитальные затраты	K	5640	6100
Эксплуатационные издержки:			
амортизационные отчисления (14%)	I_A	800	865
отчисления на текущий ремонт (21,8%)	I_p	1015	1095
затраты на электроэнергию	$I_э$	470	3370
затраты на топливо и смазочные материалы	I_T	1200	—
затраты на оплату обслуживающего персонала	I_o	660	60
Всего	I	4145	5390

Общие капитальные затраты определены по формуле

$$K = k_T K_0 + Z_m,$$

где $k_T = 1,11$ — коэффициент, учитывающий транспортно-складские расходы;

Z_m — затраты на монтаж оборудования (10% от стоимости оборудования).

Поскольку капитальные и эксплуатационные затраты по внедряемой системе выше, определим экономию за счет повышения яйценоскости $\mathcal{E}_1$ и уменьшения расхода корма $\mathcal{E}_2$.

Годовая экономия за счет повышения продуктивности птицы на 1,2% при яйценоскости 200 шт/г и цене яиц 0,1 руб/шт.

$$\mathcal{E}_1 = 0,012 \cdot 200 \cdot 10\,000 \cdot 0,1 = 2400 \text{ руб.}$$

Годовая экономия за счет уменьшения на 3% расхода корма при среднесуточном расходе 0,15 кг на голову и цене 0,2 руб/кг

$$\mathcal{E}_2 = 0,03 \cdot 0,15 \cdot 365 \cdot 10\,000 \cdot 0,2 = 3280 \text{ руб.}$$

Общая экономия

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 5680 \text{ руб.}$$

Минимальный необходимый доход, при котором сравниваемые системы имеют одинаковую экономическую эффективность

$$\begin{aligned} D &= E(K_2 - K_1) + I_2 - I_1 = \\ &= 0,2(5640 - 4150) + 5390 - 4145 = 1543 \text{ руб.}, \end{aligned}$$

где K_1 и K_2 — соответственно капитальные затраты на систему «Климат-4» и систему ВИЭСХа;

I_1 и I_2 — соответственно годовые издержки производства по сравниваемым системам.

Поскольку фактическая экономия больше (в $\frac{5680}{1543} = 3,7$ раза) необходимой, следовательно система ВИЭСХа эффективнее.

Срок окупаемости с учетом экономии $\mathcal{E}$

$$T_o = \frac{K_2 - K_1}{I_1 - I_2 + \mathcal{E}} = \frac{5640 - 4150}{4145 - 5390 + 5680} = 0,11 \text{ года.}$$

Пример 104. Определить экономически целесообразный способ управления активной вентиляцией в картофелехра-

нилище на 2000 тонн с четырьмя вентиляционными камерами, если возможные варианты таковы: 1 — ручное управление вентиляторами; 2 — при помощи ШАУ-АВ — системы (шкафа) автоматического управления активной вентиляцией; 3 — при помощи ШАХ-1 — системы (шкафа) автоматики хранилищ.

Решение. По опытным данным, переход с ручного на автоматическое управление вентиляцией сокращает порчу картофеля с 9 до 7,3%: Капитальные затраты на систему ШАУ-АВ составляют 3180 руб., а на ШАХ-1—1780 руб. Амортизационные отчисления равны 12%, отчисления на текущий ремонт — 3%. Средняя заготовительная цена картофеля 80 руб/т.

Определяем ущерб от потерь картофеля. При ручном управлении $U_p = 0,09 \cdot 2000 \cdot 80 = 14\,400$ руб., при автоматическом $U_a = 0,073 \cdot 2000 \cdot 80 = 11\,680$ руб. Следовательно, автоматическое управление дает экономию

$$D = U_p - U_a = 14\,400 - 11\,680 = 2720 \text{ руб.}$$

Находим годовые эксплуатационные издержки по трем вариантам. Издержки на электроэнергию и другие материалы остаются одинаковыми по всем вариантам, поэтому в расчеты их можно не вводить.

Вариант 1: $I_1 = I_A + I_T + I_O = 0 + 0 + 2040 = 2040$ руб.

Вариант 2: $I_2 = I_A + I_T + I_O = 0,12 \cdot 3180 + 0,03 \cdot 3180 + 570 = 1048$ руб.

Вариант 3: $I_3 = I_A + I_T + I_O = 0,12 \cdot 1780 + 0,03 \cdot 1780 + 570 = 837$ руб.

Годовые издержки на зарплату обслуживающего персонала определены следующим образом. При ручном управлении требуется на четырехкамерное овощехранилище круглосуточное дежурство одного рабочего со ставкой 0,34 руб/ч. Длительность хранения картофеля 250 дней. Тогда

$$I_O = 0,34 \cdot 24 \cdot 250 = 2040 \text{ руб.}$$

При автоматическом управлении нужен один специалист (ставка 0,57 руб/ч) для проведения профилактического обслуживания и записи температуры, причем он за 8-часовой рабочий день обслуживает два овощехранилища. Значит,

$$I_O = 0,57 \cdot \frac{8}{2} \cdot 250 = 570 \text{ руб.}$$

Определяем с учетом ущерба приведенные затраты:

Вариант 1: $Z_1 = EK_1 + I_1 + Y_p = 0,2 \cdot 0 + 2040 + 14\,400 = 16\,440$ руб;

Вариант 2: $Z_2 = 0,2 \cdot 3180 + 1048 + 11\,680 = 13\,364$ руб.;

Вариант 3: $Z_3 = 0,2 \cdot 1780 + 837 + 11\,680 = 12\,873$ руб.

Третий вариант наилучший, так как для него приведенные затраты минимальны.

Определяем срок окупаемости капитальных затрат варианта 3 по сравнению с вариантом 1 с учетом ущерба:

$$T_{O3} = \frac{K_a - K_n}{I_1 + Y_p - (I_3 + Y_3)} = \frac{1780}{16\,440 - 12\,517} = 0,45 \text{ года.}$$

Срок окупаемости варианта 2

$$T_{O2} = \frac{3180}{16\,440 - 12\,728} = 0,81 \text{ года.}$$

Повышение производительности труда при автоматизации

$$\Delta P = \frac{24 \cdot 250 - 4 \cdot 250}{24 \cdot 250} \cdot 100\% = 83,4\%.$$

Пример 105. Определить экономическую эффективность механизации и автоматизации процесса послеуборочной обработки зерна на очистительно-сушильном пункте совхоза.

По данным [11], капитальные затраты составили: на строительство — 143 тыс., на силовое оборудование — 36 тыс. и на систему автоматики — 3,5 тыс. рублей. Себестоимость обработки зерна до внедрения комплексной механизации 21,7 руб/т. После механизации издержки составили на зарплату 1700, на электроэнергию — 576 и на топливо — 600 руб. Потери зерна сократились на 2,5%, урожайность повысилась на 2%. Автоматизация уменьшила расходы на топливо на 10%, на электроэнергию на 15% и на зарплату до 950 руб. Она позволила повысить всхожесть семян, в результате которой совхоз получил прибыль 1500 руб.

Решение. Определяем годовые эксплуатационные издержки на послеуборочную обработку 3000 т зерна до механизации

$$I_n = I_o = 21,7 \cdot 3000 = 65\,100 \text{ руб.,}$$

после механизации

$$I_m = I_a + I_p + I_o + I_s + I_r = 0,06 \cdot 143\,000 + 0,2 \cdot 36\,000 + 1700 + 576 + 600 = 18\,456 \text{ руб.,}$$

после автоматизации

$$I_a = 0,06 \cdot 143\,000 + 0,2(36\,000 + 25\,000) + 950 + \\ + 0,85 \cdot 576 + 0,9 \cdot 600 = 18\,060 \text{ руб.}$$

Отчисления на амортизацию и текущий ремонт строительной части 6%, а оборудования 20%.

Находим дополнительный доход хозяйства от механизации зернопункта при стоимости зерна 108 руб/т:

за счет сокращения потерь $D_1 = 0,025 \cdot 3000 \cdot 108 = 8100$ руб.;

за счет повышения урожайности $D_2 = 0,02 \cdot 3000 \cdot 108 =$

$$= 6480 \text{ руб.};$$

Общий доход $D = D_1 + D_2 = 14\,580$ руб.

С учетом дополнительного дохода приведенные затраты:

до механизации $Z = I_0 = 65\,100$ руб.;

после механизации $Z = 0,2 \cdot 179\,000 + 18\,456 - \\ - 14\,580 = 39\,676$ руб.;

после автоматизации $Z = 0,2 \cdot 181\,500 + 18\,060 - \\ - 14\,580 - 1500 = 38\,280$ руб.

Следовательно, наиболее целесообразным является вариант автоматизированного зернопункта.

Определяем срок окупаемости капитальных затрат с учетом дополнительного дохода:

при строительстве и механизации зернопункта

$$T_{o.m} = \frac{K_m - K_n}{I_n - (I_m - D_m)} = \frac{179\,000}{65\,100 - 18\,456 + 14\,580} \approx 3 \text{ года,}$$

при автоматизации

$$T_{o.a} = \frac{K_a - K_m}{I_m - (I_a - D_a)} = \frac{2500}{18\,456 - 18\,060 + 1500} \approx 1,3 \text{ года.}$$

Себестоимость послеуборочной обработки зерна и процент ее снижения без учета дополнительного дохода после механизации:

$$C_m = \frac{I_m}{3000} = \frac{18\,456}{3000} = 6,15 \text{ руб/т; } \Delta C_m = \frac{21,7 - 6,15}{21,7} \cdot \\ \cdot 100\% = 72\%,$$

после автоматизации

$$C_a = \frac{I_a}{3000} = \frac{18\,060}{3000} = 6 \text{ руб/т; } \Delta C_a = \frac{6,15 - 6}{6,15} \cdot 100 = 2,5\%.$$

Глава IX

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО СРЕДСТВАМ И СИСТЕМАМ АВТОМАТИКИ



РАБОТА 1. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЙ И УСИЛИЙ

Целью работы является изучение принципа действия и конструкции датчиков давления, механических усилий и моментов.

Общие сведения. К датчикам давления относят многочисленные типы приборов для измерения сил действия и давлений газов и жидкостей.

Большинство датчиков давления использует принцип преобразования давления в механическое перемещение. Воспринимающие органы датчиков имеют поверхность, подверженную непосредственному воздействию измеряемого давления.

По конструктивному исполнению датчики давления подразделяют на датчики с механическими воспринимающими органами: жидкостные, поршневые, мембранные, сильфонные, с манометрическими трубчатыми пружинами, на датчики с электрическими и термическими воспринимающими органами: электрические, радиометрические, термокомпенсационные и датчики давления, основанные на измерении теплопроводности газа.

Датчики с механическими воспринимающими органами. В жидкостных датчиках давление воспринимается поверхностью жидкости, налитой в сосуд, или поверхностью жесткой стенки.

Противодействующее усилие создается в большинстве систем силой тяжести. Жидкостные датчики давления разделяют на следующие системы: U-образные (рис. 74, а), колокольные (рис. 74, б) и гидростатические, или дифференциальные (рис. 74, в).

В U-образной системе разность давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ уравновешивается весом столба жидкости h : $\Delta P = \gamma h$, где γ — плотность жидкости. В колокольной системе избыточное давление $\Delta P = P_1 - P_2$ вызывает перемещение колокола, по величине которого определяется давление P_1 . В дифференциальной системе разность давлений $P_1 - P_2$ пропорциональна углу поворота камеры кольцевых весов α . Жидкостные датчики давления наиболее точны и стабильны. Однако вследствие эксплуатационных неудобств (малые пределы измерения, необходимость строго вертикального положения, большие габариты и т. п.) они в последнее время вытесняются другими датчиками.

В поршневых датчиках давление контролируемой среды воздействует на поршень, который сжимает калиброванную пружину. Они не нашли широкого применения из-за пропуска жидкости или газа через зазор между поршнем и цилиндром, застопоривания поршня и др. Однако благодаря высокой стабильности поршневые датчики используют для тарировки манометрических систем других типов.

В мембранных датчиках (рис. 74, г) эластичная пластина (мембрана), находясь под давлением контролируемой среды, перемещает шток, жестко связанный с контактной системой.

Существуют датчики с плоской, хлопающей и гофрированной металлической или мягкой мембранами. Кольцевые гофры, выдавленные

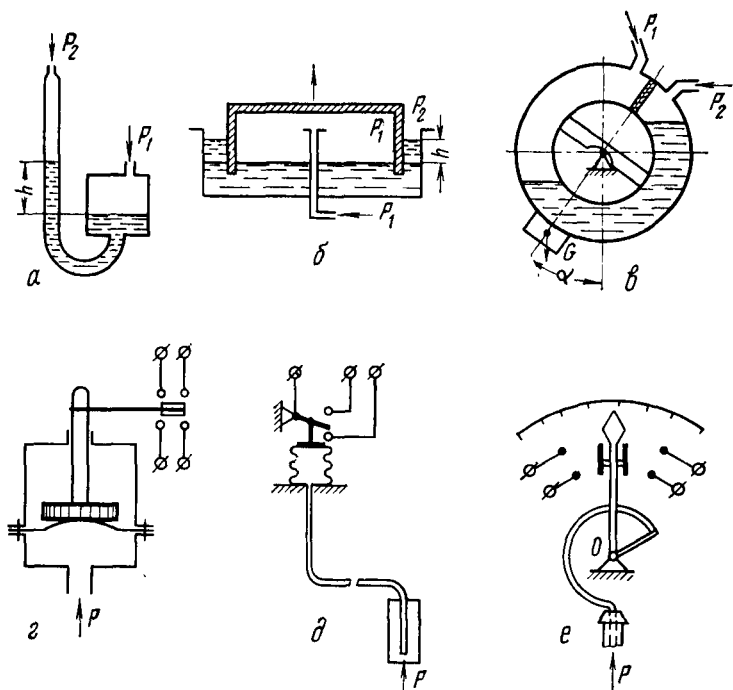


Рис. 74. Датчики давления с механическими воспринимающими органами:

а — жидкостный с U-образной системой; *б* — жидкостный с колокольной системой; *в* — гидростатический (дифференциальный); *г* — мембранный; *д* — сильфонный; *е* — с манометрической трубкой.

на мембране, способствуют снижению ее жесткости. Хлопающие мембраны, применяемые в реле давления, представляют собой упругие металлические пластины куполообразной формы, вершина купола которой при некотором избыточном давлении перебрасывается скачком из одного положения в другое. Мягкие мембраны изготавливают из пропитанной бензо- и маслостойкой резиновой, шелковой и капроновой тканей или из пластмасс. У датчиков с мягкой мембраной противодействующее усилие создается добавочным упругим элементом — пружиной.

Простота конструкции, надежность и достаточная точность измерений обеспечили широкое распространение датчиков этого типа.

Сильфонные датчики (рис. 74, *д*) представляют собой гофрированные тонкостенные трубки, выполненные из упругого материала. Разность наружного и внутреннего давлений создает силу, под действием которой происходит растяжение сильфона. Перемещение свободного конца сильфона передается указательной стрелке и подвижным контактам.

Принцип работы датчика с манометрической трубчатой пружиной (рис. 74, *е*) основан на том, что изогнутая по дуге тонкостенная трубка, имеющая овальное сечение, стремится выпрямиться при увеличении

давления контролируемой среды внутри нее. Перемещение свободного конца трубки используется для приведения в действие указательной стрелки и управления контактной системой.

Наибольшее применение находят одновитковые пружины эллиптического и плоскоовального сечений. Используются также витые, винтовые, спиральные, S-образные и другие трубчатые пружины.

Датчики давления с электрическими воспринимающими органами выполнены на основе пьезосопротивлений, пьезокристаллов, емкостных сопротивлений, а также ионизационного типа.

Принцип работы датчиков с пьезосопротивлением основан на том, что электрическое сопротивление металлов и полупроводников изменяется под действием статического давления. Малая чувствительность металлов к давлению ограничивает область применения их только измерением сверхвысоких давлений (более 10^8 Н/м²).

Наибольшей чувствительностью обладают полупроводниковые сопротивления — тензолиты, которые представляют собой столбик из угольного порошка, смешанного с бакелитовым лаком и обожженного в электропечи при высокой температуре. Тензолит наклеивают на тонкую бумагу, а ту, в свою очередь, — на испытываемую деталь. Тензолит включается в одно плечо измерительного моста. Сопротивление угольного столбика резко падает при увеличении давления. По значению сопротивления или тока, проходящего через него, судят о давлении.

Работа пьезодатчиков основана на том, что при воздействии на пьезокристалл механического давления, на гранях кристалла возникают электрические заряды, величина которых прямо пропорциональна механическим усилиям. В качестве воспринимающих элементов применяют кристаллы сахарозы, турмалина и винной кислоты.

В емкостном датчике давления используются вещества, диэлектрическая проницаемость которых изменяется под воздействием давления. К таким веществам относятся бензин, изоляционные жидкости, воздух, различные газы. Из твердых веществ этим свойством обладают сегнетовая соль, титанат бария и другие сегнетозлектрики. Вследствие малой чувствительности и зависимости характеристик от температуры датчики этой группы находят ограниченное применение.

В ионизационных датчиках используется зависимость интенсивности ионизации газа от его давления. В качестве ионизирующего фактора выступает поток электронов, γ -частиц или электрическое поле. Эти датчики служат для измерения весьма низких давлений.

Для замера давления газов в пределах $10^{-6} \div 10^{-1}$ Н/м² используются также радиометрические датчики, преимущество которых заключается в независимости показаний от состава и свойств газовой среды.

Для измерения давлений газов в диапазоне $0,1 \div 1000$ Н/м² служат датчики, основанные на измерении теплопроводности газа, которая при таких давлениях зависит от величины давления.

Тензометрические датчики (тензодатчики) применяют для измерения деформаций, давлений, сил, перемещений и ускорений; они могут быть использованы для измерения упругих колебаний с частотой до 50 кГц в условиях высоких температур и влажностей. Принцип действия проволочного тензометрического датчика основан на зависимости его электрического сопротивления от деформации.

Изменение сопротивления Δl проволоки при ее сжатии или растяжении связано с относительной деформацией: $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$.

Коэффициент чувствительности определяется уравнением

$$\bar{k} = 1 + 2\mu + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta r/r}{\varepsilon},$$

$\frac{\Delta \rho}{\rho}$ — относительное изменение удельного электрического сопротивления проволоки при ее деформации;
 μ — коэффициент Пуассона (для металлов $0,24 \div 0,40$).

Наиболее часто в этих датчиках используются нихромовые и константановые проволоки, для которых $\bar{k} = 1,9 \div 2,2$.

Основные технические данные тензометрических датчиков: чувствительность $\bar{k}$, номинальное электрическое сопротивление r , максимальная рассеиваемая мощность P .

При работе датчика на измеряемую деформацию реагирует лишь часть его длины, в связи с этим его чувствительность k меньше коэффициента $\bar{k}$, характеризующего чувствительность материала. Номинальное сопротивление проволочных тензодатчиков находится в диапазоне $10 \div 3000$ Ом.

Предельно допустимая мощность рассеивания определяется допустимым током и боковой поверхностью датчика. Для константовой проволоки при диаметре $0,025$ мм ток не должен превышать 20 мА, а при диаметре $0,1$ мм — 300 мА.

Максимальное значение относительного изменения сопротивления $\frac{\Delta r}{r}$ составляет долю процента, поэтому предъявляются повышенные требования к точности измерения, а в измерительной схеме предусматривается температурная компенсация.

На рисунке 5 решетка тензодатчика выполнена из проволоки, уложенной рядами и наклеенной на бумажную подкладку. К концам проволоки приваривают выводы, сверху на решетку наклеивают защитную бумажную полосу. Существуют также тензодатчики, изготовленные путем травления из фольги.

Тензодатчики наклеивают на испытываемую деталь клеем, который обладает высокой упругостью при сдвиге, высоким электрическим сопротивлением и не деформируется под действием окружающей среды.

На рисунке 75 показаны схемы включения в мост (θ) и наклейки двух датчиков на кронштейн (ε). Здесь $R_{д1}$ и $R_{д2}$ — сопротивление датчиков; R_2 и R_3 — постоянные сопротивления; R_1 — настроенное сопротивление, служащее для установки измерительного органа мкА на нуль.

Применение двух датчиков повышает чувствительность моста в два раза. Кроме того, включение второго датчика, как отмечалось ранее, необходимо также для температурной компенсации и исключения влияния неизмеряемых деформаций (например, поперечных).

Мостовые тензометрические схемы могут работать на постоянном и переменном токе. В нашем случае мост питается от источника постоянного напряжения 12 В, а измерительным органом является микроамперметр.

Указания к выполнению работы. 1. Ознакомиться с принципом действия и конструкцией датчиков давления, представленных на стенде и описанных в данной работе.

2. Снять тарировочную кривую с электрического датчика давления, выполненного на угольном столбике (рис. 75, б). Собрать схему

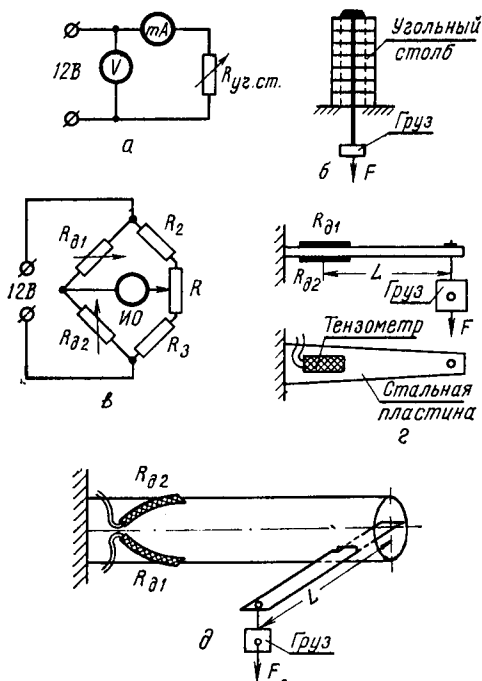


Рис. 75. Схемы испытаний датчиков механических величин.

и подать к столбику напряжение (рис. 75, а). Увеличивая давление на столбик разновесами F , снять показания миллиамперметра и вольтметра. Результаты эксперимента занести в протокол испытания, по которым, пользуясь законом Ома, определить зависимость $r_{\text{уг.ст}} = f(F)$.

3. Снять и построить тарировочную кривую для определения напряжения изгиба в стальной пластинке (рис. 75, г) при помощи тензоизмерительного моста (рис. 75, в). Тензодатчики $R_{д1}$ и $R_{д2}$ включают в два плеча моста, который питается напряжением 12 В постоянного тока. При отсутствии разновесов F мост уравнивают сопротивлением R . При равновесии моста стрелка микроамперметра мкА устанавливается на нуль. Затем конец стальной пластинки постепенно нагружают разновесами F и записывают показания микроамперметра.

Момент изгиба $M = FL$, а механическое напряжение изгиба

$$\sigma_{\text{из}} = \frac{M}{W},$$

где $W = \frac{bh^3}{\sigma}$ — момент сопротивления пластины в месте наклейки датчика; b — ширина пластины; h — высота пластины; L — плечо, равное расстоянию от места приложения груза до центра наклеенного тензодатчика.

По данным расчетов строят кривую $I = f(\sigma_{из})$.

4. Снять при помощи тензоизмерительного моста и построить тарировочную кривую для определения напряжения кручения в стальной трубе (рис. 75, д). При этом датчик $R_{д1}$ работает на растяжение, а датчик $R_{д2}$ — на сжатие, то есть сопротивление $R_{д1}$ увеличивается, а $R_{д2}$ уменьшается. Датчики наклеены на трубу под углом 45° к образующей цилиндрической поверхности. Мост, если нет разновесов, уравновешивают сопротивлением R_1 . Затем на рычаг закрепляют разновесы, которые создают вращающий момент $M = FL$. Увеличивая их вес, в протокол записывают показания микроамперметра.

Механическое напряжение кручения $\sigma_{кр}$ определяется как отношение момента кручения M к моменту сопротивления сечения трубы W ; $\sigma_{кр} = \frac{M}{W}$. Момент сопротивления сечения трубы

$$W = 0,2d_1^3 \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right],$$

где d_1 и d_2 — внешний и внутренний диаметры трубы, м.

По данным замеров и расчетов строят тарировочную кривую

$$I = f(\sigma_{кр}).$$

Содержание отчета. В отчете должны быть приведены краткие сведения об угольных и тензометрических датчиках, схемы их включения (рис. 75), оформленный протокол испытаний и кривые зависимостей

$$r_{уг.ст} = f(F), I = f(\sigma_{из}) \text{ и } I = f(\sigma_{кр}).$$

Протокол испытаний датчиков механических величин

Экспериментальные и расчетные данные

Снятие тарировочной кривой угольного датчика давления					Снятие тарировочной кривой тензометрического моста при измерении напряжений изгиба стальной пластины					Снятие тарировочной кривой тензометрического моста при измерении напряжений кручения стальной тонкостенной трубы				
$d_{внешн.} = \dots \text{м},$ $d_{внут.} = \dots \text{м},$ $S = \dots \text{м}^2$					$b = \dots \text{м},$ $h = \dots \text{м},$ $L = \dots \text{м},$ $W = \dots \text{м}^3$					$d_1 = \dots \text{м},$ $d_2 = \dots \text{м},$ $L = \dots \text{м},$ $W = \dots \text{м}^3$				
F		U_1	I	r	F_1		I	M	$\sigma_{из}$	F_1		I	M	$\sigma_{кр}$
кгс	Н				кгс	Н				кгс	Н			
		В	мА	Ом			мкА	Н·м	Н/м²			мкА	Н·м	Н/м²

Рекомендуемая литература [3, 15].

Контрольные вопросы

1. Для каких целей используются датчики механических усилий?
2. Поясните принцип действия жидкостных датчиков давления.
3. Расскажите о работе поршневых, мембранных и сильфонных датчиков давления.
4. В чем заключается принцип действия датчиков давления с электрическими и термическими воспринимающими органами?
5. Расскажите о принципе действия тензометрических датчиков.
6. Как можно тензодатчиком измерить механические усилия во вращающихся частях машин?
7. В чем состоит преимущество включения двух тензодатчиков в плечи измерительного моста?
8. Сравните преимущества и недостатки металлических и полупроводниковых тензодатчиков.
9. Какими датчиками удобнее измерять механические усилия на большом расстоянии?
10. Почему чувствительность тензодатчика меньше тензочувствительности материала, из которого изготовлен датчик?

РАБОТА 2

ОПТИЧЕСКИЕ ВОСПРИНИМАЮЩИЕ ОРГАНЫ В ДАТЧИКАХ АВТОМАТИКИ

Целью работы является изучение принципа действия и характеристик различных фоторезисторов и вакуумных фотоэлементов, фотодиодов и фототриодов, фототиристоров и составленных на их основе фотореле.

Общие сведения. В сельскохозяйственной технике оптические (световые) датчики используются в установках сортировки продуктов (томатов, яблок, смородины, клубники и т. д.) по цвету и определения качества на просвет (зерна, яиц), в регуляторах освещенности и интенсивности облучения в теплицах, в животноводстве и птицеводстве, в устройствах автоматического отключения и включения уличного освещения, в измерителях дымности воздуха и мутности воды, газоанализаторах, в устройствах контроля пламени в топках, а также в различных защитных устройствах и т. п.

В качестве воспринимающих органов в оптических датчиках используются фоторезисторы, вакуумные фотоэлементы, фотодиоды, фототриоды и фототиристоры.

У фоторезистора под действием света увеличивается количество свободных электронов, а следовательно, и электропроводность. Повышение электропроводности полупроводника под действием световой энергии называют *внутренним фотоэффектом*. Фоторезистор (рис. 76, а) в большинстве случаев представляет собой нанесенный на стеклянную пластину 5 тонкий слой полупроводникового вещества 4. К противоположным сторонам полупроводникового слоя прикрепляют металлические электроды 1, предназначенные для включения фоторезистора в электрическую цепь. Пластинка с нанесенным на нее полупроводниковым слоем запрессовывается в пластмассовую оправу 2 с отверстием (рабочим окном) для прохода световых лучей. Рабочее окно покрывают светопроницаемым лаком 3.

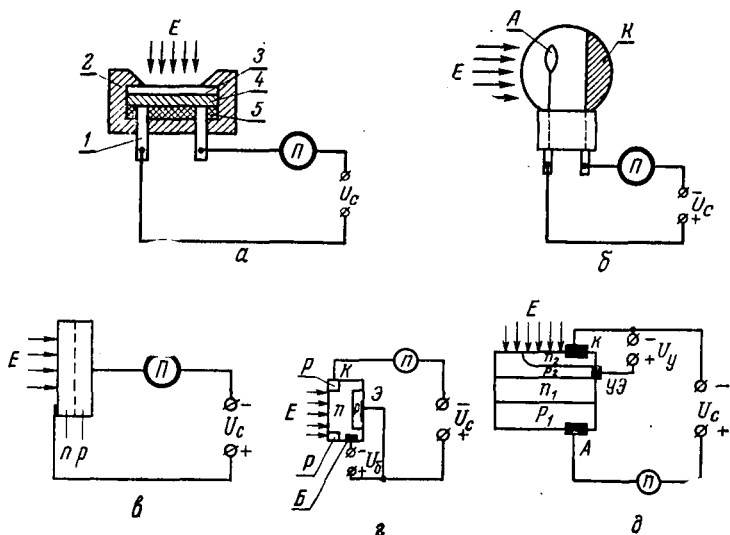


Рис. 76. Схемы включения:

а — фоторезистора; б — вакуумного фотоэлемента; в — фотодиода; г — фототриода; д — фототристора.

Фоторезисторы характеризуются высокой светочувствительностью, простой конструкцией, малыми габаритами, значительной мощностью рассеяния и практически неограниченным сроком службы. Они могут работать в цепях постоянного и переменного токов. Эти качества обусловили широкую область применения фоторезисторов. К недостаткам фоторезисторов следует отнести некоторую зависимость их параметров от температуры и нелинейную зависимость силы фототока от светового потока, а также относительно высокую инерционность (постоянная времени у них порядка $3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ при световом потоке 10^{-5} лм).

Вакуумный фотоэлемент представляет собой вакуумную или газонаполненную лампу с катодом K из светочувствительного слоя, нанесенного на жесткую подложку (внутреннюю поверхность стеклянного баллона), и анодом A в виде кольца или пластины.

Вакуумные фотоэлементы обычно работают в режиме насыщения, когда фототок зависит только от освещенности и не зависит от приложенного напряжения.

В отличие от фоторезистора электроны, возникшие в фотоэлементе под действием световой энергии, не остаются в освещенном слое, а удаляются от него (*внешний фотоэффект*). На рисунке 76, б приведена принципиальная схема включения вакуумного фотоэлемента. Для увеличения чувствительности колбу вакуумного фотоэлемента заполняют инертным газом. Фотоэлектроны, освобожденные светом, соударяясь с атомами газа, ионизируют его и под действием электрического поля усиливают ток. Такие фотоэлементы называются *ионными*.

Вакуумные фотоэлементы малоинерционны, но сильно подвержены старению, то есть нестабильности и ухудшению характеристик со временем.

Низкая чувствительность и малая выходная мощность вакуумных фотоэлементов обусловили применение усилителей, которые обычно объединяются в единую конструкцию с фотоэлементом и называются *фотоумножителями*.

В последнее время в автоматику начали широко внедряться фотодиоды, фототриоды и фототиристоры, принцип действия их основан на использовании свойств $p-n$ -перехода в германиевом или кремниевом слое.

Фотодиод — это полупроводниковый приемник лучистой энергии, в котором происходит направленное движение носителей тока при воздействии энергии оптического излучения. Режим работы фотодиода с внешним источником питания называют *фотопреобразовательным*, а без него — *фотогенераторным*.

На рисунке 76, *в* приведена принципиальная схема включения фотодиода в фотопреобразовательном режиме. Напряжение на $p-n$ -переход фотодиода подается запирающей полярности. При освещении происходит генерация носителей электрического заряда, которые под действием электрического поля разделяются и на границе $p-n$ -перехода создают разность потенциалов. Фотопреобразовательный режим дает значительное повышение светочувствительности, недоступное для обычных вентильных фотоэлементов.

Фототриод — это полупроводниковый приемник лучистой энергии, имеющий направленное движение носителей тока и обладающий свойством усиления фототока при действии энергии оптического излучения.

На рисунке 76, *г* приведена принципиальная схема включения фототриода.

Конструктивно фототриод представляет собой полупроводниковую пластинку с тремя чередующимися областями $p-n-p$ -проводимостей. Эти области имеют контактные выводы для включения фототриода в схему. Базовая область *Б* типа n -проводимости доступна для проникновения света. Под действием света в базовой области образуются пары электрон — дырка, которые под влиянием электрического поля диффундируют в эмиттерную *Э* и коллекторную *К* части триода. В результате создается ток, проходящий через эмиттерно-базовый переход, который усиливает ток коллектора (аналогично тому, как это происходит в обычном полупроводниковом триоде).

Фототриод по сравнению с фотодиодом имеет дополнительные возможности использования. Его работой можно управлять не только световым потоком, но и одновременно электрическим сигналом. Кроме того, фототриоды обладают более высокой чувствительностью, чем другие фотоэлементы.

Фототиристор — это четырехслойный полупроводниковый прибор с $p-n-p-n$ -переходами, управляемый светом (рис. 76, *д*). Фототиристор является новым полупроводниковым прибором, сочетающим в себе положительные свойства тиристора и преобразователя оптической энергии в электрическую. Принцип действия фототиристора аналогичен принципу действия фототриода. Под действием освещенности в полупроводниковых слоях происходит генерация пар электрон — дырка, которые под влиянием приложенного электрического поля участвуют в увеличении тока, протекающего через структуру фототиристора.

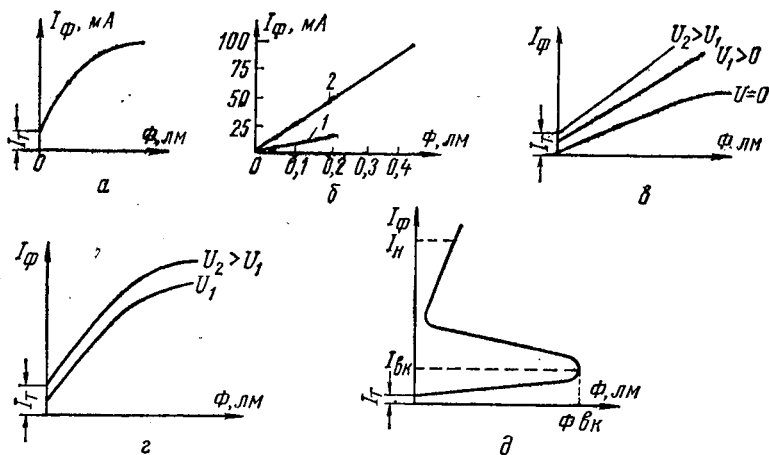


Рис. 77. Световые характеристики:

а — фоторезистора; б — кислородно-цезиевого 1 и сурьмяно-цезиевого 2 фотоэлементов; в — фотодиода; г — фототриода; д — фототиристора.

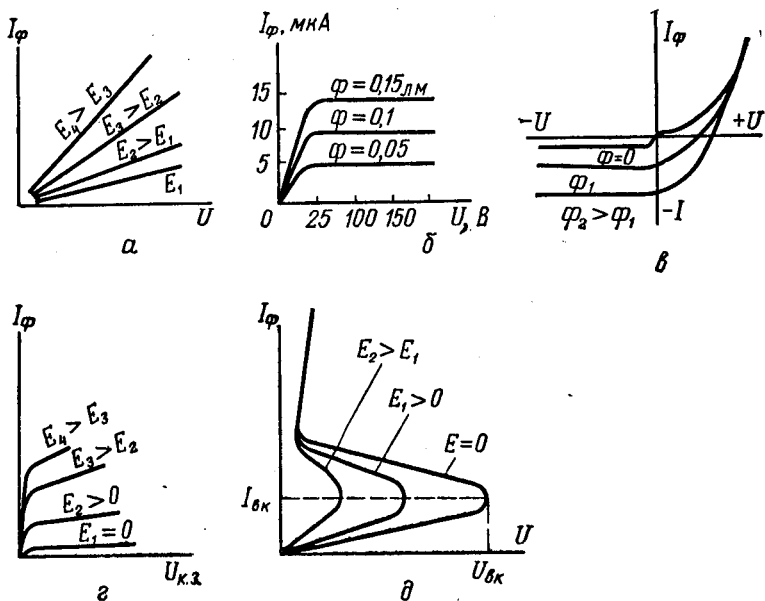


Рис. 78. Вольт-амперные характеристики:

а — фоторезистора; б — фотоэлемента; в — фотодиода; г — фототриода; д — фототиристора.

Воздействие света на $p-n-p-n$ -структуру имеет тот же результат, что и воздействие тока управляющего электрода УЭ (рис. 76, д) у тириستоров. Однако световому управлению фототиристором присуще важное преимущество перед электрическим, так как оно не предполагает гальванической связи с силовой цепью и позволяет использовать управляющий электрод для других схемных назначений, например, для установления необходимой чувствительности или температурной стабилизации.

Свойства фотовоспринимающих органов определяются рядом параметров и характеристик, из которых главными для схем автоматики являются световая и вольт-амперные характеристики и чувствительность.

Световой характеристикой $I_\Phi = f(\Phi)$ называют зависимость фототока от светового потока Φ (освещенности E) при неизменном приложенном напряжении.

Вольт-амперной характеристикой $I_\Phi = f(U)$ называют зависимость тока фотовоспринимающего органа от напряжения при постоянной освещенности.

На рисунке 77 приведены световые, а на рисунке 78 — вольт-амперные характеристики фотовоспринимающих органов.

Световые характеристики фоторезистора, фототриода и фототиристора (рис. 77, а, г, д) нелинейны, а фотоэлемента (рис. 77, б) — линейны, в чем состоит важное преимущество применения фотоэлементов в фотосилителях.

Для полупроводниковых фотовоспринимающих органов характерно наличие *темнового тока* I_T , обусловленного конечной величиной сопротивления элемента при отсутствии освещенности.

Чувствительность оптических датчиков разделяют на интегральную, удельную и спектральную.

Интегральная чувствительность (мкА/лм) численно равна силе фототока, протекающего по короткозамкнутой цепи фотовоспринимающего элемента под действием единицы светового потока, неразложенного в спектр:

$$k_n = \frac{I_\Phi}{\Phi},$$

где I_Φ и Φ — соответственно ток и световой поток.

В паспортных данных фоторезисторов приводится *удельная чувствительность* (мкА/лм·В), которая представляет собой отношение фототока к световому потоку при напряжении 1 В:

$$k_o = \frac{I_\Phi}{\Phi U},$$

где U — напряжение, приложенное к элементу.

Максимальную чувствительность находят, умножая удельную чувствительность на максимальную разность потенциалов.

Зависимость чувствительности элемента от длины волны светового потока называют спектральной характеристикой, а коэффициент чувствительности, найденный для определенной длины волны, — *спектральной чувствительностью*.

Указания к выполнению работы. 1. Изучить принципы действия и характеристики фотовоспринимающих органов. Ознакомиться с конструкциями фотовоспринимающих органов, представленных на стенде.

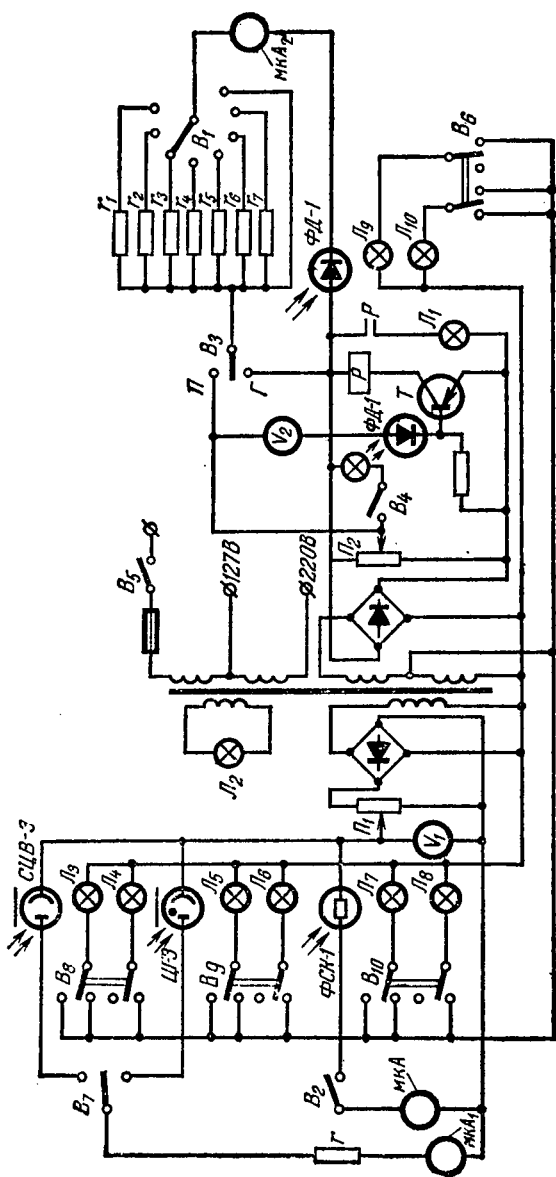


Рис. 79. Принципиальная электрическая схема стенда ЭСБ.

Протокол испытаний фотоэлементов и фотореле

[illegible]

2. Снять вольт-амперные характеристики фотозадающих элементов СЦВ-3 и ЦГ-3, фоторезистора ФСК-1 и фотодиода ФД-1 при двух постоянных освещенностях Φ_1 и Φ_2 .

Фотоэлементы и фотореле исследуют на стенде типа ЭС6 (рис. 79).

При снятии вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента СЦВ-3 тумблер B_7 устанавливают в положение «вакуумный», а затем тумблером B_8 включают лампу L_3 , создающую световой поток Φ_1 (остальные тумблеры B_9 , B_{10} и B_6 отключены). Изменяя потенциометром P_1 напряжение U_1 от 0 до 250 В, измеряют микроамперметром $мкА_1$ ток I фотоэлемента. Потом тумблером B_8 включают осветительные лампы L_3 и L_4 , дающие световой поток Φ_2 , и снимают новую вольт-амперную характеристику элемента СЦВ-3. Токи следует измерять после истечения процесса утомления фотокатода, при котором ток постепенно уменьшается. После этого аналогичным образом снимают вольт-амперные характеристики газонаполненного фотоэлемента ЦГ-3. Для этого тумблер B_7 переводят в положение «газонаполненный» (нижнее на схеме), а тумблером B_9 устанавливают световые потоки Φ_1 и Φ_2 при отключенных тумблерах B_8 , B_{10} и B_6 .

Для получения вольт-амперных характеристик фоторезистора ФСК-1 тумблеры B_8 , B_9 и B_6 необходимо поставить в среднее положение, включить тумблер B_2 и тумблером B_{10} установить сначала световой поток Φ_1 , а затем Φ_2 . Изменяя потенциометром P_1 напряжение от 0 до 60 В, записывают в протокол значения напряжения и тока, который измеряют миллиамперметром мкА.

При снятии вольт-амперных характеристик фотодиода ФД-1 в режиме фотопреобразователя тумблер B_3 нужно перевести в положение «фотопреобразователь» (верхнее на схеме положение $П$). Фотодиод оказывается включенным на напряжение, регулируемое потенциометром P_2 в пределах 0—15 В.

Тумблером B_1 включают нагрузочное сопротивление, заданное преподавателем. Изменяя потенциометром P_2 напряжение U_2 , записывают в протокол значения напряжения и тока, измеряемого микроамперметром мкА₂, при двух световых потоках Φ_1 и Φ_2 , которые устанавливают тумблером B_6 .

3. Снять нагрузочные характеристики фотодиода ФД-1 в режиме фотогенератора и фотопреобразователя. Для получения нагрузочных характеристик фотодиода в режиме фотогенератора тумблер B_3 устанавливают в положение «фотогенератор-Г», а тумблером B_6 задают световой поток Φ_1 . В этом случае фотодиод ФД-1 замкнут через прибор мкА₂ на один из резисторов $r_1 \div r_7$. Изменяя при помощи переключателя B_7 нагрузочное сопротивление, в протокол записывают показания микроамперметра мкА₂. Затем тумблером B_6 включают две осветительные лампы и снимают нагрузочные характеристики для потока Φ_2 .

Чтобы снять нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя, необходимо тумблер B_3 перевести в положение «фотопреобразователь — П» и потенциометром P_2 установить напряжение, заданное преподавателем. Поддерживая при помощи потенциометра P_2 напряжение U_2 неизменным, снимают аналогично предыдущему опыту нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя для двух значений Φ_1 и Φ_2 светового потока.

4. Исследовать работу схемы фотореле, состоящей из фотодиода ФД-1, триода T , слаботочного реле R и лампы L_1 . Для этого тумблером B_4 нужно включить осветительную лампу L_2 и, меняя потенциометром P_2 освещенность лампы L_2 , определить напряжение U_2 , а затем освещенность E^* , при которой срабатывает фотореле (загорается лампа L_1). Фотореле работает следующим образом. При увеличении освещенности сопротивление фотодиода ФД-1 падает, а ток, проходящий через фотодиод и базо-эмиттерный переход триода T , увеличивается и открывает триод T , в результате чего срабатывает реле R , контакты которого включают лампу L_1 .

Содержание отчета. Отчет должен содержать электрическую схему стенда (рис. 79), оформленный протокол, графики вольт-амперных характеристик испытанных фотоэлементов и нагрузочные характеристики $I = f(r)$ фотодиода ФД-1 в фотогенераторном и фотопреобразовательном режимах при $U = \text{const}$.

Рекомендуемая литература [3, 15].

Контрольные вопросы

1. Объясните физическую сущность работы фоторезисторов, вакуумных и полупроводниковых фотоэлементов.
2. Расскажите о преимуществах и недостатках фоторезисторов, сравнивая их с вакуумными и полупроводниковыми фотоэлементами.
3. Как определяются интегральная, удельная и спектральная чувствительности фотоэлементов?
4. Для каких целей используются фотоэлементы в схемах автоматики?
5. Что понимается под темновым током фоторезистора?
6. Объясните физическую сущность явления внешнего и внутреннего фотоэффекта.

* Освещенность E находят по предварительно снятой характеристике $E = f(U_p)$, представленной на стенде.

7. Для каких целей и каким газом наполняются ионные фотоэлементы?

8. Расскажите о принципе работы фотодиода в фотопреобразовательном и фотогенераторном режимах.

9. В чем заключаются преимущества и недостатки фототиристора в сравнении с фототриодом?

10. Расскажите, что понимается под световой и вольт-амперной характеристиками и приведите обоснование их вида по рисункам 77 и 78.

11. Как снимают нагрузочные характеристики?

12. Объясните работу схемы фотореле на рисунке 79.

РАБОТА 3

ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ — ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

Целью работы является изучение принципа действия датчиков температуры и исследование характеристик полупроводниковых терморезисторов.

Общие сведения. В качестве датчиков температуры используют элементы, физические свойства которых существенно зависят от температуры и незначительно подвержены влиянию других факторов, например влажности, состава среды и т. п. К таким физическим свойствам относятся явления теплового линейного или объемного расширения, изменения сопротивления, емкости или термоэлектродвижущей силы специального элемента, находящегося в контакте с контролируемой средой. Многие датчики используют принцип изменения физических параметров самой контролируемой среды под действием температуры: давления, плотности, вязкости и интенсивности радиационных излучений.

К датчикам, основанным на принципе теплового расширения жидкостей и газов, относятся жидкостные объемные и контактные термометры и манометрические термодатчики.

Для дистанционного контроля температуры служат термопары, термометры сопротивления, полупроводниковые терморезисторы.

Особенно большое распространение для дистанционного измерения температуры, сигнализации о повышении температуры в установках и различных агрегатах, как воспринимающие органы в различных схемах автоматики и телемеханики, а также в качестве термокомпенсаторов, стабилизаторов напряжения, ограничителей пускового тока, датчиков уровня жидкости и сыпучих материалов получили полупроводниковые терморезисторы (ПТР). Область применения ПТР непрерывно расширяется.

Сейчас промышленность выпускает несколько десятков типов ПТР с разнообразными электрическими параметрами: например, медно-марганцевые типа ММТ и кобальто-марганцевые типа КМТ сопротивлением от 1 Ом до 1 МОм (при 20 °С) с отклонением от номинала не более 20%. У полупроводниковых терморезисторов в отличие от металлических сопротивление больше и сильнее зависит от температуры.

Уравнение температурной характеристики

$$r_T = r_{\infty} e^{\frac{B}{T}},$$

где T — температура, К;

r_∞ и B — постоянные коэффициенты, определяемые по формулам

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{r_1}{r_2}; \quad r_\infty = r_0 e^{-\frac{B}{T}};$$

r_1 и r_2 — сопротивления ПТР при температурах T_1 и T_2 соответственно.

Температурный коэффициент сопротивления ПТР отрицателен:

$$\alpha_T = \frac{dr_T}{r_T dT} = -\frac{B}{T^2}$$

и в десятки раз больше, чем у металлов, причем не остается постоянным, а уменьшается с увеличением температуры T .

Серийно выпускаемые ПТР могут работать при температурах от -40 до $+180^\circ\text{C}$ и даже больших, при давлениях до 10^6 Н/м^2 и относительной влажности до 70%. Специальные герметизированные ПТР предназначены для использования в условиях агрессивной окружающей среды.

Характеристики ПТР относительно стабильны. По механической прочности и вибростойкости ПТР не уступают радиотехническим сопротивлениям. Срок их службы при нормальных режимах работы практически неограничен.

Максимально допустимая мощность рассеивания ПТР составляет для различных типов от 5 до 800 мВт.

Значительное сопротивление ПТР позволяет пренебречь сопротивлениями подводящих проводов, контактов и контактными э. д. с., что дает возможность измерять температуру на больших расстояниях.

Тепловая инерционность ПТР примерно равняется инерционности обычного ртутного термометра, а для некоторых типов ПТР в десятки раз меньше, что позволяет использовать их в качестве чувствительных датчиков при регулировании температуры малоинерционных объектов.

Указания к выполнению работы. 1. Ознакомиться с принципом действия и конструкцией термочувствительных элементов, представленных на стенде.

2. Снять вольт-амперные характеристики ПТР. Вольт-амперные характеристики ПТР снимают при комнатной температуре T_k и при заданной преподавателем температуре $T_1 > T_k$, напряжение на терморезисторе регулируют потенциометром (рис. 80, а).

Вольт-амперная характеристика ПТР (рис. 80, б) на начальном участке прямолинейна (токи малы и нагрев ПТР незначителен). По мере так называемого саморазогрева сопротивление ПТР падает, вследствие чего ток резко возрастает. Поэтому в процессе снятия падающей части характеристики нужно уменьшать напряжение питания. Результаты опыта записывают в протокол испытаний.

При использовании ПТР в качестве датчиков температуры рабочим участком является линейная часть вольт-амперной характеристики.

Для каждой точки вольт-амперной характеристики могут быть определены статические r_T и динамические r_d сопротивления:

$$r_T = \frac{U}{I} \quad \text{и} \quad r_d = \frac{dU}{dI}.$$

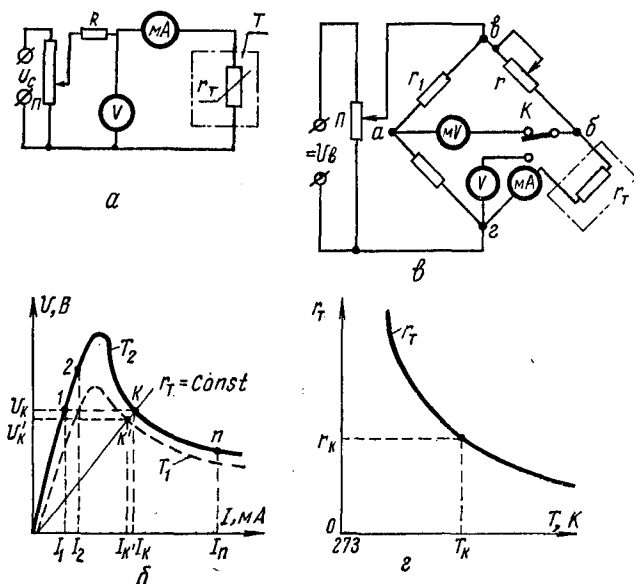


Рис. 80. Схемы испытания и характеристики ПТР:

a — схема для снятия вольт-амперной характеристики; *б* — схема для снятия температурной характеристики и градуировки моста; *в* — вольт-амперная характеристика; *г* — температурная характеристика.

3. Снять температурную характеристику ПТР $r_T = f(T)$ и определить коэффициенты r_∞ , B и α_T . Электрическая схема для определения температурной характеристики представляет собой измерительный мост, в одно из плеч которого включен ПТР (рис. 80, б). Мост получает питание от источника постоянного тока. Напряжение поддерживают неизменным (не более 12 В) при помощи потенциометра Π . Для соответствующих измерений служат миллиамперметр, вольтметр и милливольтметр постоянного тока.

Терморезистор помещают в термостат, температура в котором измеряется ртутным термометром. При снятии температурной характеристики ключ K нужно перевести на вольтметр V . Постепенно увеличивая температуру, записывают в протокол испытаний показания ртутного термометра, вольтметра и миллиамперметра. По этим данным определяют сопротивление ПТР. Для построения характеристики $r_T = f(T)$ достаточно 5—8 опытных точек в интервале от $T_K = 293\text{ K}$ до $T \leq 373\text{ K}$ (рис. 80, г). При этом следует помнить, что записывать результаты испытаний можно только через 2—4 мин после того, как установится заданная температура в термостате. Постоянные коэффициенты r_∞ , B и температурный коэффициент сопротивления α_T определяют подобно тому, как это было сделано в примере 7.

4. Протарировать мост для измерения температуры при помощи ПТР по показаниям милливольтметра, включенного в измерительную диагональ моста.

Тарировать мост рекомендуется одновременно со снятием температурной характеристики. В протокол испытаний записывают показания милливольтметра. При начальной (комнатной) температуре мост уравнивается переменным резистором r . Ключ K переводят на милливольтметр mV . По результатам измерений строят тарировочную кривую $T = f(V)$.

5. Составить схему термореле (рис. 81, а) и определить его параметры: температуру срабатывания и возврата. Вольт-амперные характеристики ПТР, соответствующие двум значениям температуры окружающей среды T_1 и T_2 (причем $T_1 < T_2$), приведены на рисунке 81, б. Сопротивления реле r_p и добавочное r_d выбирают так, чтобы прямые $U_n - I r_p$ и $I_n - I(r_p + r_d)$, выражающие падение напряжения на ПТР, пересекали вольт-амперные характеристики, как показано на этом рисунке. Вольт-амперная характеристика, соответствующая ПТР температуре T_1 , располагается выше характеристики, отвечающей температуре T_2 . При увеличении температуры до значения T_2 появляется релейный эффект, то есть скачок тока от I_1 до I_2 . Поскольку ток срабатывания реле P выбирают меньшим, чем ток I_2 , то релейный эффект до конца не развивается. Когда ток достигает значения $I_{ср}$ срабатывает реле P и одним контактом P_1 включает (расшунтирует) сопротивление r_d , а другим P_2 замыкает сигнальную лампу $ЛС$. Реле P оказывается включенным последовательно с ПТР и резистором r_d , а его ток падает до значения I_3 , которое несколько больше, чем ток возврата реле. Если температура начнет уменьшаться, то ток реле P будет плавно убывать до значения I_4 , соответствующего температуре T_1 . Вслед за этим возникает обратный релейный эффект, при котором ток упадет до значения I_5 .

Изменяя напряжение U_n , можно регулировать значение уставки температур срабатывания и возврата реле и получить максимальный коэффициент возврата ($k_B = 0,97$).

Испытание реле проводят следующим образом. Изменяя температуру терморезистора, измеряют токи срабатывания $I_{ср}$ и возврата I_v реле. Зная напряжения, токи и сопротивления реле r_p и резистора r_d , рассчитывают сопротивления терморезистора при срабатывании $r_{Tср} = \frac{U}{I} - r_p$ и возврате реле $r_{Tv} = \frac{U}{I_v} - (r_p + r_d)$. По температурной характеристике определяют соответствующие им температуры срабатывания $T_{ср}$ и возврата T_v реле.

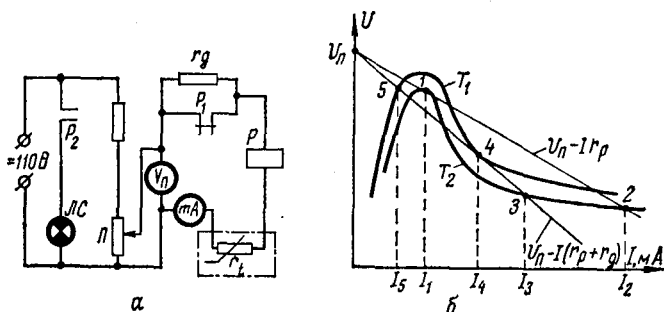


Рис. 81. Полупроводниковый терморезистор в схеме термореле (а) и вольт-амперные характеристики реле (б).

6. Ознакомиться с методом построения вольт-амперной характеристики ПТР для заданной температуры окружающей среды по известным температурной и вольт-амперной характеристикам при какой-либо другой температуре.

При построении семейства вольт-амперных характеристик обычно известны температурная характеристика ПТР $r_T = f(T)$, часто заданная двумя точками (при 293 К и 393 К), и вольт-амперная характеристика при одном значении температуры, например 293 К. По этим данным в случае необходимости можно построить серию вольт-амперных кривых для различных значений температуры. Вольт-амперная характеристика ПТР определяется графоаналитическим методом в такой последовательности (см. рис. 80, б и з):

а) известную вольт-амперную характеристику при температуре T_2 разбивают на ряд отрезков 1, 2...к,...п;

б) для каждой точки вычисляют сопротивление $r_k = \frac{U_k}{I_k}$.

Затем по температурной характеристике находят температуру T_k тела ПТР, соответствующую данному значению его сопротивления, а по

формуле $b = \frac{I_n^2 r_k}{T_k - T_2}$ определяют коэффициент рассеяния b , учитывающий все виды распространения тепла от рабочего тела ПТР. Зависимость коэффициента рассеяния от температуры перегрева $b = f(T_k - T_2)$ называется *характеристикой рассеяния*. Она неизменна для всех экземпляров ПТР одного и того же типа;

в) зная характеристику рассеяния ПТР, можно определить вольт-амперную характеристику для любого значения температуры окружающей среды, например для $T_1 = T_2 + \Delta T$. С этой целью необходимо определить температуру перегрева ПТР $\Delta T_k = T_k - (T_2 + \Delta T)$ и сопротивление r_k по температурной характеристике для T_k . Затем значения тока и напряжения новой вольт-амперной характеристики вычисляют по формулам

$$I_{k'} = \sqrt{\frac{b \Delta T_k}{r_k}} \text{ и } U_{k'} = I_{k'} \cdot r_k.$$

В точках k' и k температура и сопротивление ПТР постоянны. После этого расчеты повторяют для определения других координат вольт-амперной характеристики.

Протокол испытаний ПТР типа _____ с номинальным значением $r_n = \dots \text{кОм}$

Вольт-амперная характеристика				Температурная характеристика			Тарирование моста	
Т, К	U_n , В	I , мА	r_T , кОм	Т, К	I , мА	r_T , кОм	Т, К	U , мВ

Значения температур срабатывания и возврата термореле: $T_{ср} = \dots \text{К}$; $T_{в} = \dots \text{К}$.

Значения коэффициентов: $B = \dots \text{К}$; $r_{\infty} = \dots \text{кОм}$.

Содержание отчета. Отчет должен содержать краткое описание характеристик ПТР, схемы лабораторной установки, протокол испытаний, расчеты и графики снятых характеристик.

Рекомендуемая литература [3, 15, 19].

Контрольные вопросы

1. Перечислите типы датчиков температуры и объясните принципы их работы.
2. Сравните между собой датчики температуры по преимуществам и недостаткам.
3. Назовите типы ПТР.
4. Расскажите о преимуществах ПТР, сравнивая их с металлическими терморезисторами.
5. Для каких целей используются ПТР в схемах автоматики?
6. Объясните принцип работы термореле, выполненных на ПТР.
7. Перечислите основные характеристики ПТР.
8. Объясните причины нелинейности вольт-амперной характеристики ПТР.
9. Как построить семейство вольт-амперных характеристик ПТР по вольт-амперной и температурной характеристикам?
10. Одинаковы ли знаки температурных коэффициентов сопротивления полупроводниковых и металлических терморезисторов?

РАБОТА 4

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Целью работы является изучение принципа действия и исследование характеристик магнитных усилителей.

Общие сведения. В современных системах автоматики для управления исполнительными механизмами требуется мощность, во много раз превышающая выходную мощность сигнала датчиков. Для усиления сигналов применяются различные типы усилителей. В сельскохозяйственной автоматике используются главным образом электромеханические, магнитные, электронные и гидравлические усилители, значительно реже — пневматические, ионные и электромашинные.

Магнитные усилители (МУ) благодаря своим существенным преимуществам в ряде случаев вытесняют электромашинные и электронные. Они не имеют подвижных частей, долговечны, нечувствительны к вибрациям и толчкам, устойчиво работают непосредственно от сети переменного тока при значительных колебаниях напряжения. Коэффициент усиления МУ весьма велик ($10^3 \div 10^6$), поэтому их можно использовать для усиления очень малых сигналов постоянного тока. МУ обеспечивают возможность простого суммирования нескольких сигналов. Максимальная выходная мощность МУ достигает нескольких десятков киловатт. Недостатки МУ: значительная инерционность и большая масса, зависимость коэффициента усиления от частоты и напряжения источника питания, низкий коэффициент мощности и искажение формы кривой тока нагрузки.

Магнитными эти усилители называют потому, что их работа основана на использовании зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных материалов на переменном токе от постоянного подмагничивающего тока.

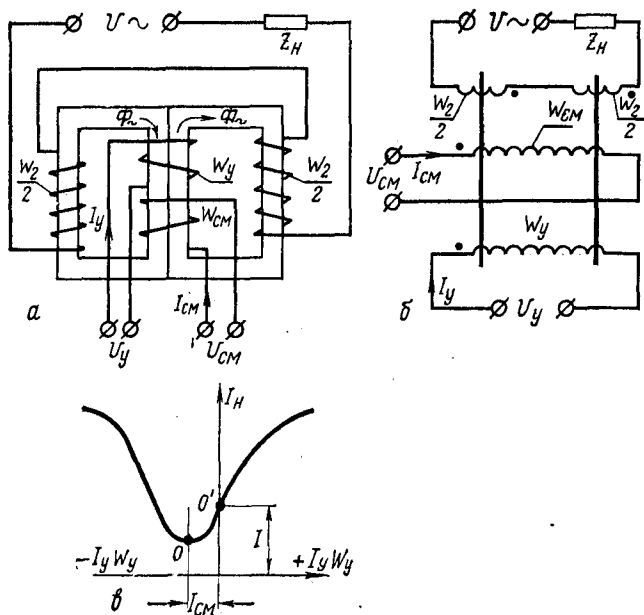


Рис. 82. Магнитный усилитель:

a — общая схема; *б* — принципиальная схема; *в* — характеристика управления с обмоткой смещения.

С увеличением постоянного подмагничивания магнитная проницаемость магнитопровода падает, следовательно, уменьшается индуктивное сопротивление обмотки переменного тока, которое пропорционально магнитной проницаемости, а ток и напряжение на нагрузке, включенной последовательно с этой обмоткой, растут.

Конструктивно МУ представляет собой замкнутый магнитопровод, составленный из двух тороидных или двух П-образных сердечников с несколькими обмотками. На крайних стержнях магнитопровода (рис. 82, *a*) находятся две секции $\frac{w_1}{2}$ и $\frac{w_2}{2}$ так называемой *силовой обмотки* переменного тока.

Чтобы обмотка переменного тока не наводила э. д. с. в обмотке управления и других обмотках МУ, их располагают на стержнях магнитопровода так, что переменные магнитные потоки взаимно компенсируются.

Нагрузку z_H включают в цепь переменного тока. Коэффициенты усиления МУ вычисляются по следующим выражениям:

$$k_i = \frac{\Delta I_H}{\Delta I_y},$$

по напряжению

$$k_u = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_y} = \frac{\Delta I_H z_H}{\Delta I_y r_y} = k_i \frac{z_H}{r_y},$$

по мощности

$$k_p = \frac{\Delta P_n}{\Delta P_y} = k_l^2 \frac{z_n}{r_y},$$

где ΔI_n , ΔU_n и ΔP_n — изменение тока, напряжения и мощности в нагрузке при изменении соответственно ΔI_y , ΔU_y и ΔP_y цепи управления;

r_n и r_y — активное сопротивление нагрузки и цепи управления.

Магнитные усилители только с одной обмоткой управления одинаково реагируют на различную полярность тока управления, причем в начале характеристики (относительно точки O) при незначительных токах управления усиление мало (рис. 82, в). Для создания МУ, чувствительного к полярности сигнала, и увеличения коэффициента усиления при малых токах управления применяется так называемая *обмотка смещения* $w_{см}$, которая получает питание от стабилизированного источника постоянного тока. Характеристика МУ с обмоткой смещения показана на рисунке 82, в.

Эффективным средством увеличения коэффициента усиления МУ оказывается введение *внешней и внутренней положительных обратных связей* (о. с.). Схемы МУ с внешней и внутренней обратными связями показаны соответственно на рисунке 83, а и б.

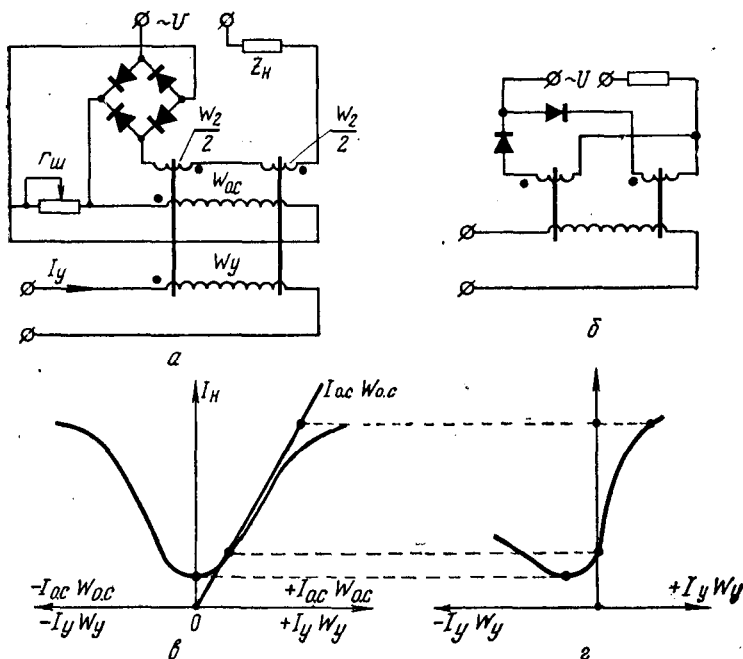


Рис. 83. Схемы магнитного усилителя с внешней (а) и внутренней (б) обратными связями и характеристики управления (в, г).

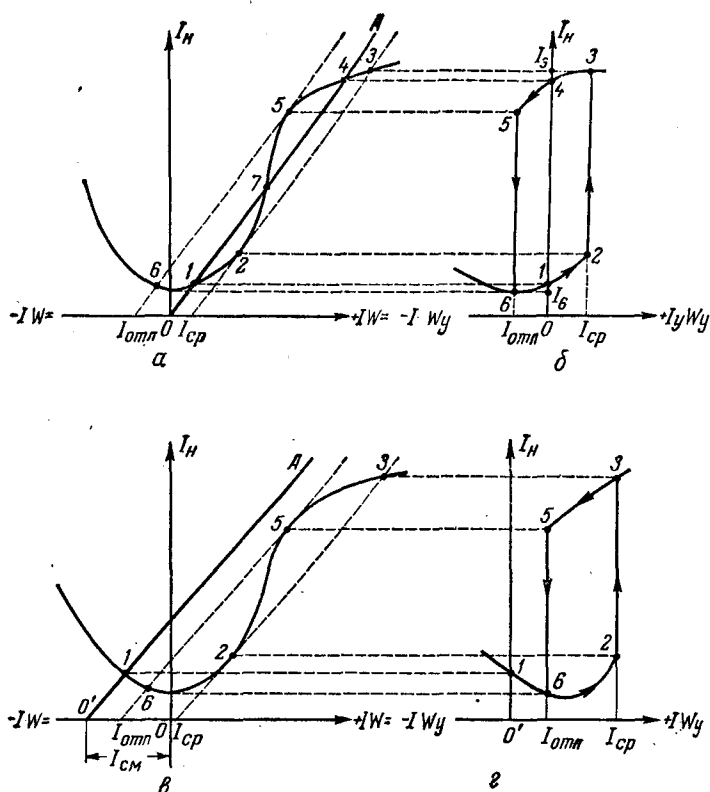


Рис. 84. Характеристики магнитного усилителя в релейном режиме:

a — без обмотки смещения; *б* — магнитного поляризованного реле; *в* — с обмоткой смещения; *г* — магнитного нейтрального реле.

Основное уравнение МУ с обратной связью для прямолинейного участка характеристики управления имеет следующий вид:

$$\Delta I_H \omega_2 = \Delta I_Y \omega_Y \pm \Delta I_{0.c} \cdot \omega_{0.c}.$$

Пренебрегая коэффициентом выпрямления, можно считать, что токи $\Delta I_{0.c} \approx \Delta I_H$. Тогда

$$\Delta I_H = \frac{\omega_Y}{\omega_2} \frac{\Delta I_Y}{1 \mp \frac{\omega_{0.c}}{\omega_Y} \cdot \frac{\omega_Y}{\omega_2}}.$$

Величину $k_{o.c} = \frac{\omega_{o.c}}{\omega_y}$ называют коэффициентом обратной связи по току. Принимая во внимание вышеприведенные выражения для k_i , k_u и k_p , нетрудно убедиться в том, что коэффициенты усиления МУ с обратной связью

$$k_{i.o.c} = \frac{k_i}{1 \mp k_{o.c} k_i}, \quad k_{u.o.c} = \frac{k_u}{1 \mp k_{o.c} k_i}$$

и

$$k_{p.o.c} = \frac{k_p}{(1 \mp k_{o.c} k_i)^2}.$$

Если коэффициент положительной обратной связи $k_{o.c} = \frac{1}{k_i}$, то МУ можно использовать в качестве *бесконтактного реле*.

При достаточно большом коэффициенте обратной связи его прямолинейная характеристика касается или пересекает характеристику управления магнитного усилителя в трех точках 1, 7, 4 при $I_y = 0$ (рис. 84, а). Когда ток управления не равен нулю, прямая обратной связи ОА перемещается параллельно самой себе вправо или влево в зависимости от знака сигналов в обмотке управления.

Если ток управления МУ постепенно увеличивать, то точка 1 плавно переходит в точку 2. При дальнейшем увеличении тока I_y рабочая точка скачком перемещается во второе устойчивое положение 3, ток в нагрузке принимает значение I_3 , после чего меняется незначительно. Если теперь ток снижать до нуля, а затем увеличивать его в обратном направлении, то ток нагрузки будет изменяться в соответствии с участком 3—4—5 характеристики управления МУ, и при $I_y = I_{отп}$ ток нагрузки I_n скачком уменьшается до значения I_6 .

Таким образом, значение $I_y = I_{ср}$ соответствует току срабатывания, а значение $I_y = -I_{отп}$ — току отпускания магнитного поляризованного бесконтактного реле (рис. 84, б). Для получения характеристики МУ, аналогичной характеристике *нейтрального электромагнитного реле*, МУ необходимо дополнить обмоткой смещения и пропустить через нее такой ток, чтобы при отсутствии тока управления прямая ОА пересекала характеристику МУ всего лишь в одной точке (рис. 84, в). В этом случае скачкообразное изменение тока нагрузки I_n будет происходить только при положительных значениях тока управления (рис. 84, г).

Указания к выполнению работы. 1. Ознакомиться с принципом действия, типами и конструкциями магнитных усилителей, представленных на стенде и описанных в работе. На стенде установлены: магнитный усилитель, соответствующие измерительные приборы, рубильники, выпрямительный мост, нагрузочные и регулировочные сопротивления (рис. 85).

2. Снять следующие характеристики МУ: без обмотки смещения, с обмоткой смещения (рис. 82, в), с обратной связью, но без обмотки смещения (рис. 83, г) и в релейном режиме (рис. 84, а).

При снятии характеристик измерительные приборы подключают к зажимам обмоток МУ и, поочередно собирая схемы (рис. 82, а и 83, а), в соответствии с заданием измеряют токи и напряжения в нагрузке и обмотке управления для 5—8 значений тока управления. Результаты заносят в протокол испытаний.

При этом необходимо провести испытания при следующих характерных токах обмотки управления. Для МУ без смещения и обратной связи

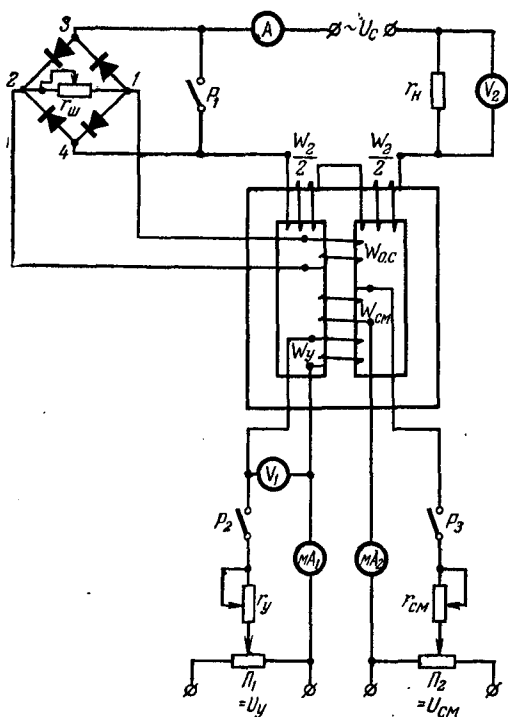


Рис. 85. Схема испытаний магнитного усилителя.

при токе от $I_y = 0$ до I_y , при котором $I_n = I_{n.\max}$. Для МУ с обмоткой смещения, а также МУ с обмоткой обратной связи, но без обмотки смещения при токах управления от $I_y = 0$ до $I_y = \pm I_{y.\max}$ и при токе $-I_y$, когда $I_n = I_{n.\min}$. МУ в релейный режим переводят, увеличивая сопротивление $r_{ш}$ (рис. 83, а и 85), и при этом записывают значения токов I_y и I_n , соответствующие следующим точкам характеристики (рис. 84, а и б): 1, 2, 3, 4, 5, 6, а также $I_y > I_{cr}$ и $-I_y > I_v$.

2. По результатам опытов строят характеристики управления всех испытанных схем МУ и определяют для каждой схемы коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности для одного и того же тока управления, соответствующего крутому подъему правой части построенной характеристики. Коэффициенты усиления определяют по приведенным в данной работе формулам.

Содержание отчета. Отчет должен содержать схему испытаний, протокол испытаний, расчетные коэффициенты усиления и характеристики, построенные по опытным данным.

Рекомендуемая литература [3, 15].

Протокол испытаний схем МУ

Параметры	Схемы магнитного усилителя															
	МУ без обмоток обратной связи и смещения $\omega_y = \dots$				МУ с обмоткой смещения $\omega_{см} = \dots$ $\omega_y = \dots$				МУ с обмоткой внешней обратной связи $\omega_{о.с} = \dots$ $\omega_y = \dots$				МУ в релейном режиме $\omega_{о.с} = \dots$ $\omega_y = \dots$			
	I_y	U_y	I_H	U_H	I_y	U_y	I_H	U_H	I_y	U_y	I_H	U_H	I_y	U_y	I_H	U_H
$I_y > 0$																
$I_y < 0$																
k_t																
k_H																
k_p																

Контрольные вопросы

1. Каковы функции усилителей в системах автоматики?
2. Какими параметрами характеризуется усилитель?
3. Назовите типы усилителей, которые наиболее перспективны для использования в схемах сельскохозяйственной автоматики.
4. Объясните принцип работы МУ.
5. Расскажите о преимуществах и недостатках МУ, сравнивая их с другими электрическими усилителями.
6. Для чего нужны и как действуют обмотки смещения и обратной связи МУ?
7. Чем отличается расположение обмоток постоянного тока МУ на магнитопроводе от обмоток переменного тока?
8. Из каких соображений выбирают тот или иной тип обратной связи МУ?
9. Как влияет на коэффициент усиления МУ изменение частоты и напряжения переменного тока?
10. При каких условиях МУ переходит в релейный режим и для каких целей он служит?
11. Как определить коэффициент усиления МУ?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ И ШАГОВЫЕ ИСКАТЕЛИ

Целью работы является изучение принципа действия, конструкции и испытание реле постоянного и переменного тока и электромагнитных шаговых искателей.

Общие сведения. Реле называют элемент автоматического устройства, у которого при воздействии входной величины скачкообразно изменяется выходная величина. Реле состоит из воспринимающего органа (на него непосредственно действуют входные сигналы), исполнительного органа (предназначенного для передачи сигналов во внешнюю цепь) и промежуточного органа (преобразующего и передающего сигнала от воспринимающих органов к исполнительным).

В сельскохозяйственной автоматике нашли широкое распространение электрические и механические реле. Электрические реле реагируют на напряжение, ток, мощность, полярность, фазу, частоту, длительность импульса, а механические — на давление, перемещение, скорость, вращающий момент, уровень контролируемой среды, температуру и т. п.

В данной работе изучаются электрические реле, работающие на электромагнитном принципе, и поляризованные реле, реагирующие на полярность электрического тока. Принципы работы реле описаны в специальной литературе [3].

Электромагнитные реле по ряду признаков разделяют на отдельные типы. По роду тока различают *реле постоянного тока* и *реле переменного тока* (промышленной и высокой частоты); по числу обмоток — *однообмоточные* и *многообмоточные*; по числу контактных групп — *с одной парой контактов* и *многоконтактные*, по зависимости срабатывания от направления тока в его обмотках — *поляризованные* и *нейтральные* (срабатывание последних не зависит от направления тока в его обмотках); по времени действия — *быстродействующие* (с временем срабатывания $t_{ср} = 1 \div 50$ мс), *нормально действующие* ($50 \div 150$ мс) и *медленно действующие* ($0,15 \div 1$ с). Реле с $t_{ср} < 1$ мс называют *безынерционными*, а с $t_{ср} \geq 1$ с — *реле выдержки времени*.

По назначению различают *основные реле* — токовые, напряжения и др., реагирующие на изменение тока, напряжения и т. д.; *вспомогательные реле* — промежуточные, служащие для размножения числа контактов, передачи воздействия от одних реле к другим и повышения коммутационной способности контактов; *реле времени*, предназначенные для введения выдержки времени; *сигнальные реле* — фиксирующие действия основных реле и управляющие световыми и звуковыми сигналами.

В зависимости от области применения используются дополнительные признаки в классификации реле.

На монтажных и электрических схемах автоматике реле изображают в условных обозначениях в соответствии с ГОСТ 2.725—68.

Например, монтажное обозначение реле типа РПН, имеющего 3 обмотки и 12 контактных пружин, показано на рисунке 86, а. Выводы обмоток обозначены буквами. Первая обмотка присоединена к выводам а и б, вторая — к в и г, третья — к г и д.

Контактные пружины реле расположены в три ряда. Номера контактных пружин состоят из двух цифр. Первая цифра означает ряд, вторая — номер пружины в ряду. Начало отсчета принято со стороны выводов обмотки.

Для замедления реле постоянного тока на отпускание параллельно обмотке реле включают конденсаторы, полупроводниковые диоды и ре-

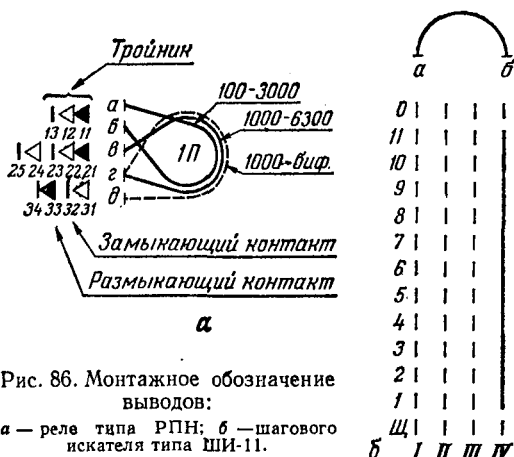


Рис. 86. Монтажное обозначение выводов:

а — реле типа РПН; б — шагового искателя типа ШИ-11.

зисторы или на магнитопровод укладывают короткозамкнутый виток. Эти же приемы уменьшают искрение контактов при разрыве ими электрических цепей с индуктивной нагрузкой. Для снижения искрения контактов параллельно им подключают также конденсаторы или высокоомные резисторы.

Электромагнитные шаговые искатели, называемые также шаговыми распределителями, служат для поочередного подключения ряда выходных электрических цепей к одному входу, то есть они имеют один вход и несколько выходов и могут осуществлять соединение этого входа с любым из выходов. Искатель состоит из трех основных частей: контактного поля, ротора и привода.

Контактное поле (статор) представляет собой совокупность неподвижных контактных элементов (ламель, пластин, штифтов), которые изолированы друг от друга и к которым подключаются выходные электрические линии. **Ротор** является подвижной частью искателя, на которой укреплены щетки, устанавливающие соединения с соответствующими контактами поля. К щеткам присоединяется входная электрическая линия. **Привод** (движущий механизм) передвигает ротор в требуемое положение. Кроме того, в искателях имеются дополнительные контактные группы, которые срабатывают при определенном положении ротора или привода.

В основу названий искателей обычно положены некоторые конструктивные признаки; так, например, в наиболее распространенном шаговом искателе при срабатывании привода щетки ротора переходят с одних ламелей на соседние — ротор делает «шаг», отсюда и название — **шаговый**.

Шаговые искатели разделяют на вращательные ШИ и подъемно-вращательные (декадные) ДШИ.

Вращательные шаговые искатели отличаются друг от друга емкостью контактного поля: числом пластин в ряду и числом рядов, а также типом привода, который может быть прямого и обратного действия. Привод прямого действия осуществляет движение ротора при притяжении электромагнитного якоря, а обратного действия — при отпуске якоря в результате усилия возвратных пружин.

В зависимости от числа пластин в ряду искателям ШИ придается тот или иной номер, например, ШИ-17 означает, что шаговый искатель имеет 17 пластин в ряду.

Контактное поле искателя ДШИ состоит из секций, в каждой из которых расположено 10 горизонтальных рядов по 10 пластин в каждом. По числу пластин в горизонтальных рядах подъемно-вращательный искатель назван *декадно-шаговым*.

Искатель ДШИ снабжен двумя приводами: один для подъема (поступательного движения), другой для вращательного. Работа ДШИ делится на два этапа: сначала механизм подъема щетки поднимаются до требуемого ряда, а затем механизм вращения щетки поворачиваются в ряду до нужной пластины. Искатель ДШИ имеет две шкалы для указания места положения щеток. Монтажная схема искателя показана на рисунке 86, б. Номера контактных рядов обозначают римскими цифрами, номера контактов в ряду — арабскими, а щетку — буквой Щ.

Указания и порядок выполнения работы. 1. Ознакомиться с конструктивным исполнением установленных на стенде реле, затем тестером определить выводы обмоток реле, имеющих две и более обмоток (реле типа РКН, РПН, РМУГ и РП-5).

2. Измерить в каждом реле токи и напряжения срабатывания и отпускания. Для определения токов и напряжений срабатывания и отпускания испытываемое реле включают в схему, изображенную на рисунке 87. Ток и напряжение срабатывания определяют в момент загорания лампы Л при плавном увеличении напряжения. Каждый замер для реле, представленных на стенде, делают 3 раза, а в протокол записывают среднее значение.

3. Собрать схему двухрелейного генератора импульсов и опробовать работу шагового искателя. Двухрелейный генератор импульсов (пульс-пара или пульс-схема) составляют из двух реле — 1П и 2П (рис. 88, а) и подключают к зажимам а и в (см. рис. 87). При замыкании ключа пуска КП срабатывает реле 1П и образует цепь реле 2П. Реле 2П размыкает цепь реле 1П, которое, в свою очередь, разрывает цепь реле 2П. Последнее, размыкая свои контакты, замкнет цепь реле 1П. Таким образом, в результате многократного повторения описанного процесса формируются импульсы напряжения. Временная диаграмма работы двухрелейного генератора импульсов показана на рисунке 88, б.

Затем к двухрелейному генератору импульсов подключают шаговый искатель, ключом КП подают питание на схему и следят за движением ротора шагового искателя.

4. Определить коэффициенты возврата и запаса реле, ампер-витки срабатывания и отпускания. Для вычисления

$$\text{коэффициента возврата } k_{\text{в}} = \frac{I_{\text{отп}}}{I_{\text{ср}}},$$

коэффициентов запаса срабатывания

$$k_{\text{з. ср}} = \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{ср}}} \text{ и отпускания } k_{\text{з. отп}} = \frac{I_{\text{отп}}}{I_{\text{н}}},$$

ампер-витков срабатывания $I w_{\text{ср}}$ и отпускания $I w_{\text{отп}}$ необходимо при испытании реле записать в протокол паспортные данные каждой обмотки.

5. Рассчитать для одного из реле значение токоограничивающего сопротивления в цепи самоудерживания. Токоограничивающее сопротивление служит для

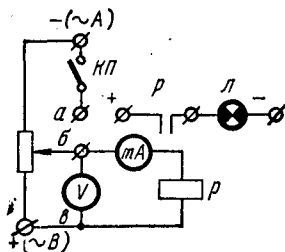


Рис. 87 Схема испытания реле.

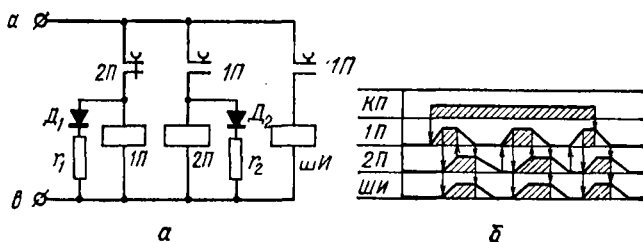


Рис. 88. Двухрелейный генератор импульсов:
 а — электрическая схема; б — временная диаграмма работы.

уменьшения тока, вызывающего нагревание обмотки реле в рабочем состоянии. Его значение r_T определяют по минимальному току удерживания $I_{уд}$, то есть по току, при котором реле надежно удерживает свои контакты при условии, что напряжение питания имеет наименьшее допустимое значение.

По току отпускания (см. пункт 2) находят ток удерживания реле

$$I_{уд} = k_n I_{отп},$$

где $k_n = 1,4 \div 3$ — коэффициент надежности.

Зная минимальное напряжение питания U_{min} (задается руководителем) и сопротивление обмотки реле r_p (определяется из опыта), находим

$$r_T = \frac{U_{min}}{I_{уд}} - r_p.$$

Протокол испытаний электромагнитных реле и шагового искателя

Реле	Опытные и расчетные параметры реле										
	I_{cp}	U_{cp}	$I_{отп}$	$U_{отп}$	U_H	r_p	I_H	k_B	$k_{3,cp}$	$k_{3,отп}$	$I_{ш,cp}$
С прямоугольным магнитопроводом, нейтральное — РПН											
обмотка 1											
обмотка 2											
Клапанное, нейтральное — РКН											
Малогобаритное, унифицированное, герметическое — РМУГ											

Реле	Замеренные и расчетные параметры реле									
	$I_{ср}$	$U_{ср}$	$I_{отп}$	$U_{отп}$	U_n	r_p	I_n	k_B	$k_{з.ср}$	$k_{з.отп}$
Малогабаритное (Цыпкина) — МРЦ										
Многоконтактное, унифицированное — МКУ-48										
Переменного тока — РПТ-100										
Поляризованное — РП-5										
Шаговый искатель										

Результаты расчета записывают в последовательности их определения

$$\begin{aligned}
 I_{отп} &= \dots \text{ мА}; & k_n &= \dots; \\
 I_{уд} &= \dots \text{ мА}; & U_{min} &= \dots \text{ В}; \\
 r_p &= \dots \text{ кОм}; & r_T &= \dots \text{ кОм}.
 \end{aligned}$$

Содержание отчета. Отчет должен содержать электрические схемы (рис. 86—88), оформленный протокол испытаний и результаты расчета токоограничивающего сопротивления для одного из реле.

Рекомендуемая литература [3].

Контрольные вопросы

1. Перечислите и охарактеризуйте параметры реле автоматики.
2. Назовите основные узлы реле и шагового искателя.
3. Чем отличается поляризованное реле от нейтрального?
4. Какие способы применяют для замедления действия реле при срабатывании и отпуске и для уменьшения искрения их контактов?
5. В чем состоит назначение шаговых искателей?
6. Как изображают элементы реле на монтажных схемах?
7. По каким признакам разделяются реле на различные типы?
8. Расскажите о работе схемы пульс-пары.
9. Для чего нужно токоограничивающее сопротивление в цепи самодерживания реле.

РАБОТА 6 ПРОГРАММНЫЕ УСТРОЙСТВА

Целью работы является изучение принципов исполнения программных устройств и способов их настройки на заданную программу на примере многоцепного командного прибора типа МКП.

Общие сведения. Программные устройства обеспечивают автоматическую подачу команд для осуществления технологических или иных

процессов по заданной плавной функции или ступенчатому графику во времени. Какую-либо определенную программу наиболее часто задают при помощи часовых и моторных автоматов, конечных выключателей и различных реле времени (2РВМ, РВ4, МКП и др.).

В сельскохозяйственном производстве программные устройства применяют на животноводческих и птицеводческих фермах для раздачи кормов, управления дополнительным освещением, вентиляцией, микроклиматом в теплицах, овощехранилищах, на птицефабриках и в других производственных помещениях. На ремонтных предприятиях программное управление может быть использовано для поддержания температурного режима печи закалки деталей, режимов высокочастотной закалки, при гальванизации и осталивании деталей, на автоматизированных станках обкатки двигателей, при управлении автоматизированными станками и т. д.

Преимущество программного управления состоит в том, что оно обеспечивает технологичность, точность и быстродействие выполнения производственных процессов.

Программные устройства являются элементами частичной автоматизации и выполняются по разомкнутой функциональной схеме (рис. 89). В общем случае функциональные схемы программных систем управления могут содержать программно-задающий орган ПЗО, усилительный орган УО, исполнительный орган ИО и управляемый объект УО. Каждый из основных органов ПЗО, УО, ИО может иметь вспомогательные органы, отдельные или общие на все органы, блоки питания БП.

Программно-задающие органы этих устройств выполняются с помощью синхронного электродвигателя. Синхронные двигатели обладают жесткой внешней характеристикой и обеспечивают постоянную частоту вращения при колебаниях напряжения питания или момента сопротивления на его валу. Они тем самым гарантируют высокую точность управления и позволяют исключить необходимость в применении дополнительных стабилизирующих элементов.

Исполнительные органы, располагаемые обычно вне программных устройств, являются частью агрегата, непосредственно выполняющего технологические операции, — объекта управления ОУ.

Автоматические системы программного управления содержат информацию только о задаче управления. Эта информация сообщается устройству извне оператором на основании заранее отработанных оптимальных графиков нагрузок или технологических карт протекания того или иного процесса. В соответствии с этой информацией программные устройства автоматически управляют во времени технологическим процессом.

В данной работе конструкция программных устройств и их настройка на заданную программу изучается на примере многоцепного командного прибора МКП (рис. 90).

Многоцепной командный прибор МКП состоит из синхронного двигателя 3, понижающих редукторов 1 и 2, программного барабана 6 с кулачками 7 и контактов 8.

Прибор включают тумблером 5 или кнопкой — дистанционно. При этом загорается лампочка 4.

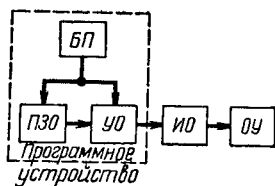


Рис. 89. Функциональная схема программных устройств.

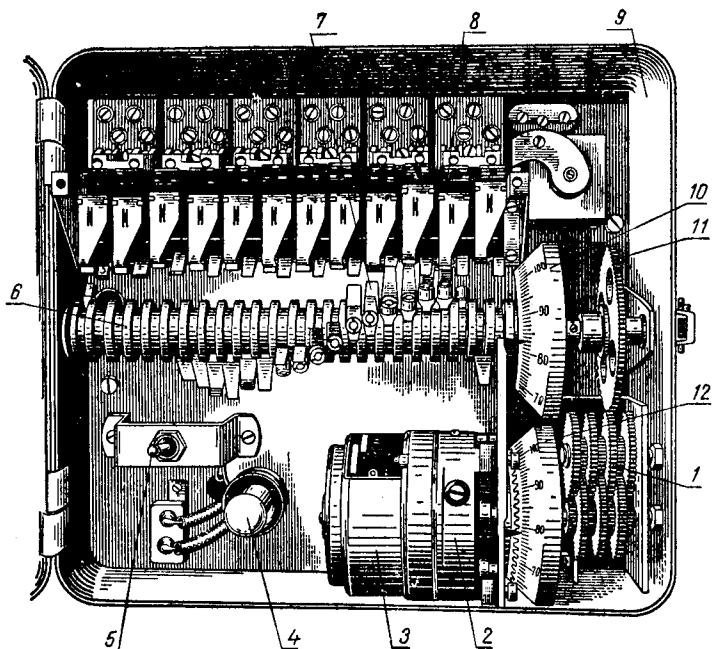


Рис. 90. Многоцепной командный прибор МКП программного управления:

1 — внешний редуктор; 2 — встроенный редуктор; 3 — синхронный двигатель; 4 — сигнальная лампочка; 5 — тумблер; 6 — программный барабан; 7 — кулачки; 8 — контактные пары; 9 — кожух; 10 — верхний колокол; 11 — скользящая шестерня; 12 — нижний колокол.

Вращение синхронного электродвигателя (со строго постоянной скоростью) передается с большим замедлением валуку программного барабана 6 через встроенный внешний редуктор.

Скользящая шестерня 11 допускает перестройку на четыре положения (I, II, III и IV, считая слева), благодаря чему продолжительность цикла можно изменять в широких пределах — от 30 с до 24 ч.

Программу работы задают, устанавливая кулачки на барабане в определенных положениях. Левые кулачки сбрасывают, а правые взводят защелки быстродействующих путевых выключателей и соответственно замыкают и размыкают контакты.

Если программный автомат не предназначен для круглосуточной циклической работы, то один из кулачков используется для остановки электродвигателя.

В процессе настройки программы необходимо задать МКП время полного цикла $T_{\text{ц}}$ протекания технологического процесса и время на выполнение отдельных операций — включения $T_{\text{в}}$ и отключения $T_{\text{о}}$ исполнительного органа, которые определяют в данной работе по графикам (рис. 91) индивидуальным для каждой бригады.

Для определенного времени $T_{ц}$ по таблице находят деление, на которое нужно установить нижний колокол 12, и положение скользящей шестерни 11. За время $T_{ц}$ распределительный вал 6 совершит только один оборот.

На распределительном валу расположен верхний колокол 10, разбитый на 100 равных делений. При помощи этого колокола задаются определенные значения времени $T_{в}$ и T_{0} .

За полное время $T_{ц}$ МКП может обеспечить одиннадцать таких операций.

Например, графикам на рисунке 91 соответствует 5 операций. Для каждой операции выбирают свою контактную пару — от первой до пятой для заданных графиков. По формуле $A_i = \frac{T \cdot 100}{T_{ц}}$ находят число

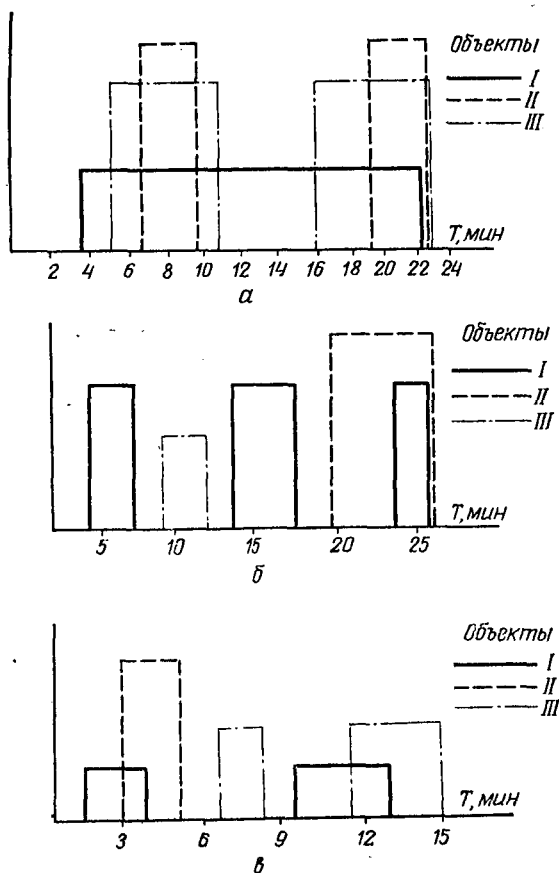


Рис. 91. Графики технологических процессов управления.

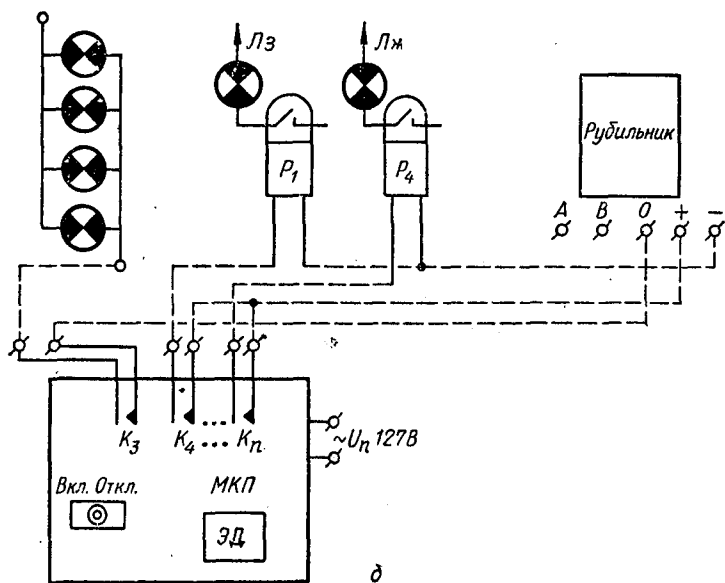
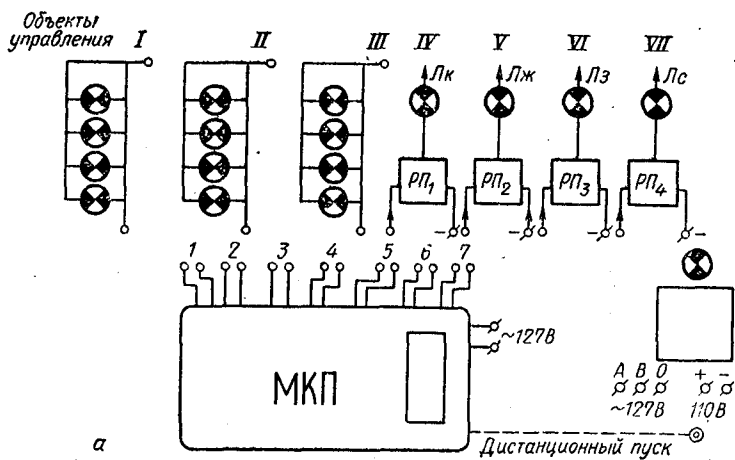


Рис. 92. Общий вид стенда испытаний (а) и схема соединений системы программного управления (б).

делений, отвечающее определенной операции $T = T_v$ включения или $T = T_o$ отключения.

Например, при $T_{ц} = 80$ мин 44 с время первой операции включения $T_v = 4$ мин, а $T_{о1} = 20$ мин. Тогда

$$A_{в1} = \frac{100 \cdot 240}{4844} = 5 \text{ делений, } A_{о1} = \frac{1200 \cdot 100}{4844} = 25 \text{ делений.}$$

Установив 5 делений на верхнем колоколе, левый кулачок первой контактной пары доводят до зацепления с защелкой и закрепляют. Затем, установив 25 делений, правый кулачок доводят до зацепления с соответствующей ему защелкой и закрепляют. Таким образом задают время первой операции включения — отключение и аналогично этому — время всех последующих операций.

Закончив настройку операций включения и отключения, верхний колокол устанавливают в нулевое положение. Скользящая шестерня устанавливается в нужном (III) положении и фиксируется стопорной гайкой.

Не разрешается настраивать все кулачки на одновременное срабатывание, когда скользящая шестерня находится в крайнем левом (I) положении.

Указание к выполнению работы. 1. Ознакомиться с принципом действия и конструктивным исполнением описанных в работе и представленных на стенде программных устройств, а также с самим стендом испытаний.

В качестве объектов управления (рис. 92, а) I, II, III служат соответственно три группы ламп накаливания, имитирующих автоматическое включение дополнительного освещения в птичниках, а в качестве объектов IV ÷ VII — усилительные элементы — промежуточные реле $P_1 \div P_4$ с сигнальными лампами, позволяющими размножить число одноименных управляющих команд и управлять несколькими исполнительными элементами.

2. Определить параметры настройки программного устройства МКП. Каждая бригада определяет параметры настройки по индивидуальному графику (рис. 91, а, б, в). По графику следует найти $T_{ц}$ и задать его устройству.

Из графиков видно, что МКП должно управлять тремя объектами: I, II, III (рис. 91). Внимательно изучив график, можно заметить, что некоторые объекты включаются по одному разу, а другие — по два-три раза. В соответствии с графиком нужно определить количество операций включения — отключение, их последовательность во времени. Для каждой операции следует выбрать свою контактную пару и найти значения T_v и T_o . Все найденные параметры необходимо внести в протокол испытаний и отметить, каким объектом управляет данная контактная пара. Для каждой операции включения и отключения нужно рассчитать число делений верхнего колокола и результаты расчета также записать в протокол испытаний.

3. Выполнить настройку МКП.

4. Собрать схему управления объектами устройством МКП (рис. 92, б).

5. Включить схему программного управления и хронометром проверить программу работы, заданную МКП. Если нет хронометра, можно использовать часы с секундной стрелкой. Результаты испытаний записать в протокол.

грешность работы МКП по формуле

$$\Delta t_i\% = \frac{t_{i \text{ действ}} - t_{i \text{ расч}}}{t_{i \text{ расч}}} \cdot 100\%.$$

7. Сделать выводы по точности срабатывания МКП.

Содержание отчета. Отчет должен содержать схему испытаний программного управления, индивидуальный график каждой бригады, протокол испытаний с расчетными и экспериментальными результатами, выводы.

Протокол испытаний МКП

[illegible]

Контрольные вопросы

1. В чем достоинства применения программных устройств автоматики?
2. Какова функциональная схема устройства автоматического программного управления по виду и какие элементы она может содержать?
3. Какую информацию содержат программные устройства управления и какое назначение они имеют?
4. Поясните принципы выполнения ПЗО.
5. Расскажите об устройстве командного автомата МКП и о назначении отдельных его элементов.
6. Почему в программных устройствах используется синхронный электродвигатель?
7. Сколько команд может выдать автомат МКП и каким образом их можно размножить?

8. Какие кулачки распределительного вала МКП действуют на подачу и какие на снятие команды?

9. Поясните порядок настройки автомата МКП на заданную продолжительность цикла 100 мин, 6 ч, 24 ч; как определяют требуемое деление нижнего колокола и каким образом выбирают положение скользящей шестерни распределительного вала?

10. Расскажите о порядке настройки автомата МКП на заданное время операции управления; как найти число делений верхнего колокола?

11. Назовите несколько типовых командных автоматов и программных регулирующих устройств.

12. Для управления какими технологическими процессами сельскохозяйственного производства можно применять программные устройства?

РАБОТА 7

ТРАНЗИСТОРНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

Целью работы является изучение принципа действия транзисторных логических элементов.

Общие сведения. Полупроводниковые логические элементы находят наиболее широкое применение благодаря малым габаритам и массе, относительной простоте схем и малому потреблению электрической энергии. Их обычно строят на маломощных триодах и диодах.

К выходу элементов подключают электромагнитные реле или через усилительные элементы — магнитные пускатели, электромагниты, контакторы, магнитные муфты и т. п.

При помощи одних и тех же логических элементов можно выполнить несколько логических операций. Для этого в логических элементах предусмотрена возможность несложного изменения схемы и соответствующие комбинации их друг с другом.

В работе изучаются транзисторные логические элементы типа Т-101, Т-107, которые реализуют логические операции ИЛИ, И, НЕ, ШТРИХ ШЕФФЕРА, СТРЕЛКА ПИРСА, ЗАПРЕТ, ПАМЯТЬ, ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ. Схемы этих элементов приведены на рисунке 93.

Операция ЗАДЕРЖКА осуществляется бесконтактными элементами выдержки времени типа Т-301, Т-302, Т-303 и Т-304 с регулируемой выдержкой времени. Элементы Т-301 и Т-302 используются в качестве интегрирующих или дифференцирующих цепочек, а Т-303 и Т-304 как бесконтактные реле времени с выдержками от 0,5 до 100 с. Принцип реализации операции ЗАДЕРЖКА рассмотрим на примере схемы элемента Т-303 (рис. 94).

Элемент Т-303 обеспечивает задержку прохождения сигнала от 0,5 до 10 с. Если в течение этого времени сигнал на входе исчезает, то на выходе сигнал вообще не появится. Выходной сигнал пропадает одновременно с исчезновением входного сигнала.

Выходной транзистор T_4 выполняет роль усилителя и имеет два входа. Первый вход осуществляется по цепи: коллектор триода T_1 , резистор R_4 и база триода T_4 , а второй — коллектор триода T_3 , диод D_6 и база триода T_4 .

Сигнал на нагрузке, подключаемой к выводам 9 и 15, появляется только при отсутствии сигналов на обоих входах, что соответствует открытому состоянию транзисторов T_1 и T_3 и закрытому T_4 .

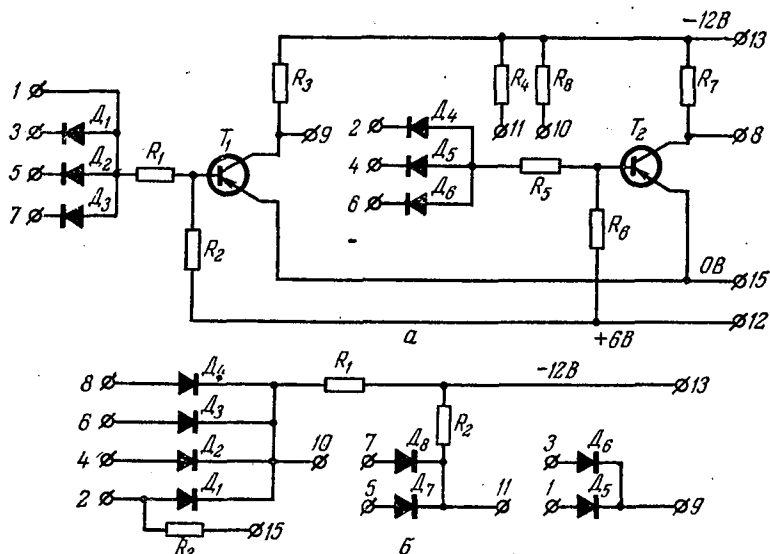


Рис. 93. Схемы логических элементов:
а — элемента Т-101; б — элемента Т-107.

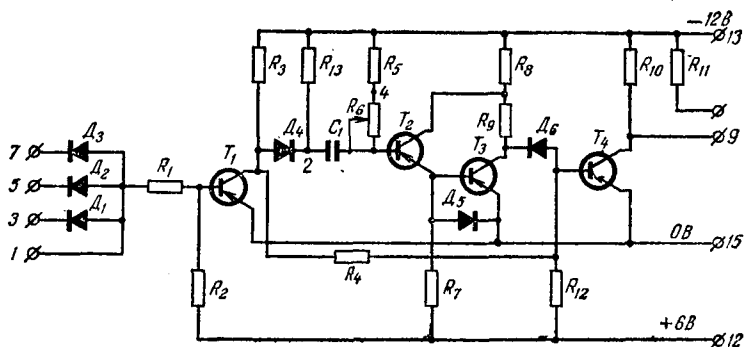


Рис. 94. Электрическая схема элемента Т-303, осуществляющего операцию ЗАДЕРЖКА.

При подаче отрицательного сигнала на один из входов 3—7 транзистор T_1 открывается, при этом потенциал точки 2 принимает нулевое значение, а транзисторы T_2 и T_3 закрываются. Вследствие этого транзистор T_4 через диод D_2 удерживается в открытом состоянии. Транзисторы T_2 и T_3 закрыты до тех пор, пока емкость C_1 полностью не разрядится на источник питания через резисторы R_5 , R_6 и эмиттер-коллектор транзистора T_1 . Затем емкость C_1 заряжается напряжением обратной полярности, что вызывает открытие транзисторов T_2 и T_3 и закрытие T_4 . Благодаря этому на нагрузке (выводы 9 и 15) появляется выходное напряжение. При снятии входного сигнала транзисторы T_1 , T_2 и T_3 закрываются, транзистор T_4 открывается и шунтирует нагрузку.

Время заряда конденсатора C_1 определяется произведением $C_1 R_{13}$, а время разряда — $C_1 (R_5 + R_6)$. Поскольку $R_5 + R_6 \gg R_{13}$, то выдержка времени определяется в основном временем разряда, которое зависит от величины регулировочного сопротивления R_6 и изменяется в пределах от 0,5 до 10 с.

Использование принципа перезаряда предварительно заряженной емкости C_1 через большое сопротивление R_6 напряжением обратной полярности значительно повышает стабильность уставок времени срабатывания элемента при изменении напряжения питания.

Цифрами с 1 по 15 обозначена маркировка выводов элементов.

Указания и порядок выполнения работы. 1. Изучить основные логические операции и ознакомиться с конструкциями и схемами реализующих их логических элементов Т-101 и Т-107 (рис. 93).

Для выполнения лабораторной работы на стенде собраны электрические схемы элементов Т-101, Т-107 и Т-303, а также представлено другое необходимое оборудование: источник питания, электросекундомер, реле и сигнальная лампа.

Питание на логические элементы подается от унифицированного блока питания, например типа ЭТ-П100С. Сигналы отрицательной полярности получают в результате соответствующего включения реостатов r_4 — r_7 (рис. 95, а). Сигналы x_1 , x_2 и x_3 подают на вход испытываемых элементов через переключатели Π_1 , Π_2 и Π_3 . Значение сигнала x_2 изменяют движком реостата r_6 , который выведен на лицевую сторону стенда (остальные реостаты расположены за стендом).

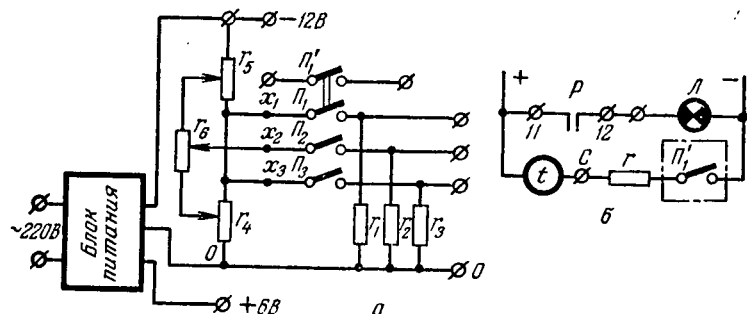


Рис. 95. Электрическая схема стенда для испытания логических элементов.

Элементы типа «Логика Т» рассчитаны на работу с релейными характеристиками входных сигналов. Поскольку транзисторные логические элементы могут работать от бесконтактных датчиков с конечной величиной входного сопротивления, то необходимо преобразовать непрерывный сигнал датчика в дискретный при помощи элементов Т-202 или Т-203. Для имитации безразрывности входных цепей элемента включены резисторы r_1 , r_2 и r_3 .

В качестве нагрузки используется реле P (ток срабатывания до 10 мА, напряжение 6 В), например реле типа МРЦ. Реле управляет сигнальной лампой (рис. 95, б), по зажиганию которой судят о наличии сигнала на выходе логического элемента.

2. На основании элементов Т-101 и Т-107 собрать соответствующие схемы и осуществить логические операции НЕ, ИЛИ-НЕ, ИЛИ, ЗАПРЕТ, ПАМЯТЬ, И, ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ.

Для реализации основных логических операций на стенде поочередно собирают электрические схемы, выполненные на элементах Т-101 и Т-107. Схемы рекомендуется вычертить и внести в отчет до прихода в лабораторию.

Напряжения питания во всех схемах подводятся: +6 В — на вывод 12; 0 — на вывод 15; —12 В — на вывод 13. Нагрузка (реле P) подключается к выходу элемента и к выводу 15. Сигналы на входы схем рекомендуется подавать в соответствии с математическими выражениями логических операций, которые записаны в левой графе протокола испытаний. При появлении сигнала на выходе логического элемента (реле при этом срабатывает) в правую графу протокола испытаний записывают 1, а при отсутствии сигнала — 0.

Для получения схемы выполнения логической операции НЕ клемму 9 соединяют с клеммой 11 (рис. 93, а), а нагрузка присоединяется к клеммам 9 и 15.

Если на входы 3, 5 или 7 (на базу триода T_1) подать сигнал отрицательной полярности по отношению к клемме 15, то триод T_1 открывается и его коллекторный потенциал (на клемме 9) становится почти равным потенциалу эмиттера (клемма 15), то есть нагрузка шунтируется триодом. При отсутствии отрицательного сигнала на базе триода T_1 коллектор его приобретает потенциал, близкий к потенциалу источника питания, а на нагрузке появляется напряжение.

Операция **ИЛИ-НЕ** выполняется на элементе Т-101. Для этого клемму 9 объединяют с клеммой 11 (рис. 93, а). Сигналы отрицательной полярности подают к клеммам 3, 5, 7, а нагрузку присоединяют к клеммам 9—15. При отсутствии входных сигналов на нагрузке есть напряжение, поскольку триод T_1 закрыт положительным напряжением смещения +6 В, подаваемым с клеммы 12 через резистор R_2 .

Сигнал (напряжение) на выходе исчезает, когда подается сигнал, хотя бы на один из трех входов, поскольку триод T_1 в этом случае открывается и шунтирует нагрузку (реле).

Для получения логической операции **ИЛИ** на элементе Т-101 необходимо клемму 9 соединить с одной из клемм 2, 4 или 6, а клемму 8 — с клеммой 10. Реле подключают к клеммам 8 и 15. При подаче отрицательного сигнала на любой из входов 3, 5, 7 триод T_1 открывается, а триод T_2 закрывается и на реле появляется напряжение.

Операция **ЗАПРЕТ** осуществляется на логическом элементе Т-101. Клемму 9 соединяют с клеммами 2 и 11, а клемму 8 — с клеммой 10. Входной сигнал подают к клемме 3, 5 или 7, а сигнал запрета — к клемме 4. Реле подключают к клеммам 8 и 15. При подаче сигнала на вход появляется сигнал на прямом выходе (на реле) и исчезает на инверсном

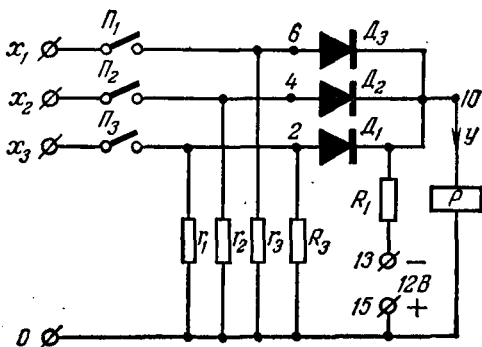


Рис. 96. Электрическая схема включения элемента Т-107 для осуществления операции И.

(на клемме 9). Это состояние сохраняется до снятия входного сигнала или подачи сигнала запрета. Триод T_2 под действием сигнала запрета открывается и шунтирует нагрузку. После подачи питания состояние схемы произвольное.

Операция **ПАМЯТЬ** выполняется на логическом элементе Т-101. Клемму 9 объединяют с клеммами 2 и 11, а клемму 8 — с клеммами 10 и 7. Входной сигнал подают к клеммам 3 или 5, а запретный — к клемме 4. Нагрузку подключают к клеммам 8 и 15. При отсутствии сигнала запрета и наличии входного сигнала триод T_1 открывается, а T_2 закрывается, и на нагрузке (реле) появляется напряжение. Эту операцию называют *включением памяти*. Такое состояние сохраняется до подачи сигнала запрета на вход 4, что равносильно отключению памяти. Если будет подан сигнал запрета к клемме 4, то триод T_2 открывается и при помощи обратной связи (соединение 8—7) закроет триод T_1 .

Операция **И** реализуется логическим элементом Т-107. Входные сигналы отрицательной полярности подают на выводы 2, 4, 6, а нагрузку (реле) подключают к объединенному выводу 10 и к общему нулевому выводу 15. Схема соединений элемента Т-107 на стенде показана на рисунке 96. При отсутствии сигналов диоды D_1 , D_2 , D_3 открыты и подключают резисторы r_1 , r_2 , r_3 и R_3 параллельно нагрузке (реле P). Поскольку сопротивление резистора R_1 выбирается большим, чем сопротивление резисторов r_1 , r_2 и R_3 , то напряжение на реле P будет меньше напряжения срабатывания и равно потере напряжения на параллельно включенных резисторах r_1 , r_2 , r_3 и R_3 .

Если сигналы поданы на один или два входа, то реле P зашунтировано тем диодом, на котором сигнала нет, и лишь когда будут поданы сигналы отрицательной полярности на все входы 2, 4, 6, диоды D_1 , D_2 , D_3 закрываются и больше не шунтируют реле P . Ток от источника 12 В, проходя через резистор R_1 и реле P , создает на последнем падение напряжения, превышающее напряжение срабатывания реле P .

Операция **ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ** выполняется на элементах Т-101 и Т-107, включенных по схеме, изображенной на рисунке 97. При отсутствии сигналов x_1 и x_2 триод T_1 закрыт напряжением смещения +6 В, а на нагрузке (реле P) имеется напряжение. Ток в нагрузке проходит

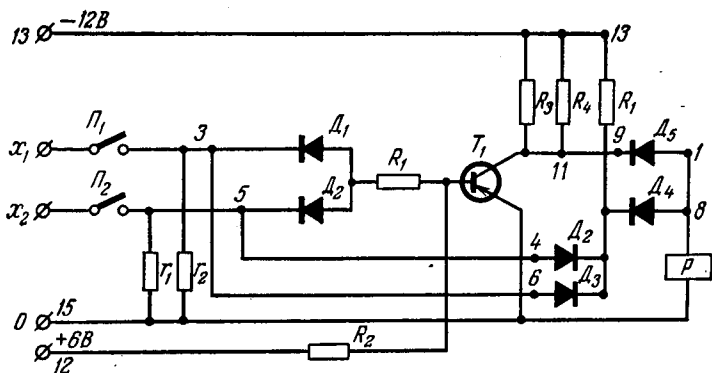


Рис. 97. Электрическая схема соединения элементов Т-101 и Т-107 для осуществления операции ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ.

через диод D_5 и резисторы R_3 и R_4 . Если будут включены оба сигнала, то триод T_1 открывается, а диоды D_2 и D_3 закрываются. Ток в реле P проходит через диод D_4 и резистор R_1 .

Сигнал, поданный только на один из входов, открывает транзистор T_1 и закрывает либо диод D_2 (сигнал x_2), либо диод D_3 (сигнал x_1).

Таким образом, нагрузка шунтируется дважды: одним из диодов D_2 или D_3 и транзистором T_1 , то есть на нагрузке напряжение отсутствует. Следовательно, сигнал на выходе логического элемента, выполняющего функцию ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ, существует только тогда, когда на входы элемента поданы равнозначные сигналы.

Функция **ЗАДЕРЖКА** осуществляется логическим элементом Т-303 (см. рис. 94). При испытании элемента Т-303 реле подключают к клеммам 9 и 15 и подают на любой из входов 3, 5, 7 сигнал x_1 . Для измерения выдержки времени включают электрический секундомер по схеме, изображенной на рисунке 95, б. Контакт 12 реле P нужно отъединить от L и присоединить к зажиму C , а ротор секундомера совместно с его резистором r включить последовательно с контактами переключателя $П_1$. Входной сигнал подают через переключатель $П_1$ на вход 7 элемента Т-303.

Изменяя величину сопротивления резистора R_8 , измеряют секундомером выдержку времени: время от момента подачи сигнала до остановки секундомера (ротор секундомера шунтируется контактами). Результаты записывают в протокол.

Содержание отчета. Отчет должен содержать перечень логических операций и их математические уравнения, электрические схемы выполняемых в работе логических операций и оформленный протокол испытаний.

Рекомендуемая литература [3, 7].

Контрольные вопросы

1. Каково назначение логических элементов?
2. В чем преимущества схем автоматики, выполненных на логических элементах?

Протокол испытаний логических элементов

Логическая операция и ее математическое уравнение	Сигналы на выходе							
Операция НЕ $y = \bar{x}$	1. $y = \bar{0} =$ 2. $y = \bar{1} =$							
Операции ИЛИ $y = x_1 + x_2 + x_3$	1. $y = 0 + 0 + 0 =$ 2. $y = 0 + 0 + 1 =$ 3. $y = 0 + 1 + 1 =$ 4. $y = 1 + 1 + 1 =$							
Операция И $y = x_1 x_2$	1. $y = 0 \cdot 0 =$ 2. $y = 0 \cdot 1 =$ 3. $y = 1 \cdot 0 =$ 4. $y = 1 \cdot 1 =$							
Операция ИЛИ-НЕ $y = \overline{x_1 + x_2 + x_3}$	1. $y = \overline{0 + 0 + 0} =$ 2. $y = \overline{0 + 0 + 1} =$ 3. $y = \overline{0 + 1 + 1} =$ 4. $y = \overline{1 + 1 + 1} =$							
Операция ЗАПРЕТ $y = x_1 \bar{x}_2$	1. $y = 1 \cdot \bar{0} =$ 2. $y = 0 \cdot \bar{1} =$ 3. $y = 0 \cdot \bar{0} =$ 4. $y = 1 \cdot \bar{1} =$							
Операция ПАМЯТЬ $y = (x_1 + y_1) \bar{x}_2$	1. $y = (1 + 1) \bar{1} =$ 2. $y = (0 + 1) \bar{1} =$ 3. $y = (1 + 1) \bar{0} =$ 4. $y = (0 + 1) \bar{0} =$							
Операция ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ $y = x_1 x_2 + \bar{x}_1 \bar{x}_2$	1. $y = 0 \cdot 0 + \bar{0} \cdot \bar{0} =$ 2. $y = 1 \cdot 1 + \bar{1} \cdot \bar{1} =$ 3. $y = 1 \cdot 0 + \bar{1} \cdot \bar{0} =$ 4. $y = 0 \cdot 1 + \bar{0} \cdot \bar{1} =$							
Временная характеристика элемента типа Т-303, выполняющего операцию ЗАДЕРЖКА	$R_{\delta},$ кОм							
	t, с							

3. Расскажите об основных логических функциях.
4. Объясните принцип работы логических элементов Т-101 и Т-107.
5. Для каких целей применяется напряжение смещения $+6\text{ В}$ в схемах транзисторных логических элементов?
6. В чем заключаются преимущества и недостатки транзисторных логических элементов по сравнению с магнитными?
7. Какие элементы автоматики включают на выход логических элементов?
8. Объясните принцип работы элемента Т-303.
9. Появится ли сигнал на выходе элемента Т-303, если время действия входного сигнала меньше, чем время выдержки элемента?
10. Какими параметрами схемы определяется время возврата элемента Т-303?
11. Благодаря чему повышается стабильность времени срабатывания элемента Т-303?

РАБОТА 8

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ГЕНЕРАТОРА ПРИ ПОМОЩИ УГОЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

Целью работы является изучение замкнутой системы регулирования, принципа действия обратных связей и характеристик регулирования.

Общие сведения. Для регулирования напряжения синхронных генераторов до 1000 В используется автоматический угольный регулятор возбуждения (РУН).

Принцип действия угольного регулятора возбуждения РУН и его функциональная схема рассмотрены в примере 22, передаточная функция в примере 27. С целью регулирования возбуждения генератора, работающего параллельно с другими, и получения возможности изменения коэффициента статизма статических характеристик схема дополняется добавочным регулируемым сопротивлением r_T , которое вводится в цепь трансформатора тока T_T в свободную фазу, то есть в фазу, которая не использована для включения воспринимающего органа регулятора возбуждения (рис. 98).

Действие добавочного сопротивления, названного компенсатором реактивной мощности, заключается в следующем. Так как вектор напряжения фазы В составляет с вектором линейного напряжения U_{AC} угол 90° , то при $\cos \varphi = 0$ вектор тока I_B в этой фазе направлен так же, как вектор напряжения U_{AC} (при иных значениях $\cos \varphi$ ток дает слагающую, пропорциональную $\sin \varphi$ и совпадающую по фазе с вектором напряжения U_{AC}). От величины реактивной нагрузки генератора зависит ток в активном сопротивлении r_T . Измерительный орган регулятора включается на сумму линейного напряжения U_{AC} и часть падения напряжения от вторичного реактивного тока I_T в сопротивлении r_T . Поэтому при увеличении реактивной нагрузки генератора регулятор снижает его возбуждение, а следовательно, и реактивную нагрузку.

Статические характеристики регулирования с положительным или отрицательным коэффициентом статизма обеспечиваются следующим

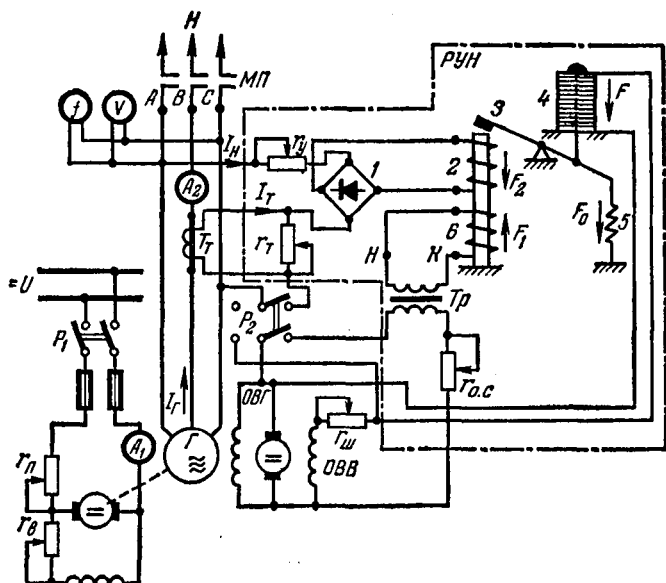


Рис. 98. Схема лабораторного стенда для исследования АСУ напряжения синхронного генератора.

образом. Согласно схеме, изображенной на рисунке 98, напряжение на воспринимающем органе регулятора $\dot{U} = \dot{U}_r \pm \dot{I}_T r_T - \dot{I}_H (r_y + r_T)$. Поскольку $I_H \ll I_T$, а вектор напряжения генератора $\dot{U}_r$ направлен одинаково (при знаке «+») или встречно (при знаке «-») с вектором падения напряжения от реактивной составляющей тока $\dot{I}_T$, можно последнее равенство записать так: $U = U_r \pm I_{T.p} \cdot r_T$, где $I_{T.p}$ — реактивная составляющая тока I_T .

Учитывая, что при $I_T = 0$ $\dot{U} = U_{x.x}$, получим (рис. 99, а) характеристику 1 *токовой стабилизации*:

$$U_r = U_{x.x} - I_{T.p} r_T$$

и характеристику 2 *токовой компенсации*:

$$U_r = U_{x.x} + I_{T.p} r_T.$$

Схема токовой компенсации позволяет повышать напряжение на генераторе при росте реактивной нагрузки, что обеспечивает компенсацию потерь напряжения в электропередающих элементах и вследствие этого стабилизацию напряжения у отдаленных от генератора потребителей.

Из-за инерционности электромагнита 2, обмоток возбуждения *ОВВ* и *ОВГ* и подвижных частей регулятора система без обратной связи не

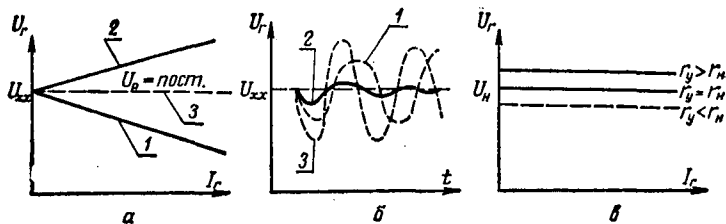


Рис. 99. Характеристики регулирования:

а — внешние характеристики регулирования:
 1 — с токовой стабилизацией; 2 — с токовой компенсацией; 3 — астатическая;
б — кривые переходного процесса; 1 — без обратной связи; 2 — с отрицательной обратной связью; 3 — с положительной обратной связью; *в* — графики изменения напряжения на генераторе при регулировании.

работоспособна, так как возникает непрерывный колебательный процесс (рис. 99, б).

Поэтому в регуляторы вводят устройство гибкой обратной связи, состоящее из трансформатора Tr , включенного на напряжение возбуждателя, резистора $r_{p.c}$ и обмотки $б$, расположенной на одном магнитопроводе с рабочей обмоткой 2 регулятора (рис. 98). В процессе регулирования изменение постоянного напряжения на возбуждатель трансформируется во вторичную обмотку трансформатора Tr , замкнутую на электромагнит $б$. Ток в обмотке $б$ создает усилие F_1 , обратное по направлению усилию F_2 рабочей обмотки. Благодаря этому система регулирования скорее обеспечивает заданное напряжение и одновременно уменьшает величину перерегулирования (кривая 2 на рисунке 99, б).

Переменный резистор r_y служит для установки определенного значения напряжения на генераторе (рис. 99, а), а реостат r_T — для задания определенного коэффициента статизма характеристики регулятора и степени компенсации реактивной мощности.

Указания и порядок выполнения работы. 1. Ознакомиться со стендом и аппаратурой управления и собрать схему.

Стенд (рис. 98) оборудован синхронным генератором трехфазного тока (230 В, 4,5 кВт·А) с возбуждением на валу. Генератор спарен с двигателями постоянного тока параллельного возбуждения.

На стенде все цепи, за исключением цепей регулятора РУН, собраны. Двигатель включают рубильником P_1 . В цепь двигателя введены амперметр A_1 и пусковой реостат r_n . Во избежание перегорания предохранителей включать двигатель нужно только при полностью введенном пусковом реостате $r_n = r_{max}$. Для регулирования скорости вращения двигателя в цепи его возбуждения находится реостат r_b .

В качестве нагрузки принят потенциал-регулятор Н. Операции включения и отключения нагрузки выполняет магнитный пускатель МП, кнопки управления которого выведены на щит лабораторного стенда. Регулятор включают и отключают при помощи переключателя P_2 , устанавливаемого в первом случае в положение, при котором дешунтируется угловой столбик и подключается к возбуждению обмотка стабилизирующего трансформатора Tr .

Режим токовой стабилизации задают реостатом r_T . Токовая стабилизация или компенсация отключена, если движок реостата полностью выведен. Чтобы перестроить токовую стабилизацию на токовую компен-

сацию, нужно поменять между собой концы вторичной обмотки трансформатора тока T_T .

При снятии внешних характеристик нужно строго следить за постоянством частоты. Начальную уставку напряжения задают при помощи реостата r_y . Когда регулятор включают, сопротивление шунтового реостата полностью выводят ($r_{ш} = 0$). Внешние характеристики можно снимать по 5—6 точкам, причем первую при холостом ходе, а последнюю при максимально возможной нагрузке.

2. Снять внешние характеристики генератора без регулятора.

При разомкнутом переключателе P_2 (регулятор отъединен) включить двигатель постоянного тока, реостатом возбуждения r_v устанавливают номинальную частоту вращения двигателя, при которой показания частотомера $f = 50$ Гц, и задают при помощи шунтового реостата $r_{ш}$ напряжение генератора, равное $U_{х.х} = 230$ В. Пускателем $МП$ подключают реактор H — нагрузку, постепенно ее увеличивают и снимают внешнюю характеристику $U_T = \psi(I_T)$. При этом реостатом r_v поддерживают частоту $f = 50$ Гц, не изменяя положение движка реостата $r_{ш}$.

3. Снять внешнюю характеристику регулирования без токовой стабилизации.

Регулятор включают без устройства токовой стабилизации и компенсации при выведенных сопротивлениях стабилизации ($r_T = 0$) и шунтового реостата ($r_{ш} = 0$). На генераторе устанавливают номинальное напряжение 230 В при номинальной частоте 50 Гц. Включив нагрузочный реактор, снимают внешнюю характеристику регулирования (аналогично пункту 2 при отрицательной обратной связи). Затем переключают трансформатор Tr на положительную обратную связь и наблюдают за неустойчивой работой агрегата. Отключать и переключать обратную связь можно на зажимах H и K трансформатора Tr .

4. Снять внешнюю характеристику регулирования с токовой стабилизацией.

Сначала нужно расшунтировать реостат r_T и убедиться, что с повышением тока I_T напряжение U_T падает, а затем снять зависимость $U_T = \psi(I_T)$ в том же порядке, что и в пункте 2.

5. Снять внешнюю характеристику регулирования с токовой компенсацией.

Прежде необходимо поменять местами концы вторичной обмотки трансформатора тока на реостате r_T , а потом снять характеристику $U_T = \psi(I_T)$.

6. Построить экспериментальные характеристики регулирования и определить коэффициенты статизма.

По результатам опыта строят экспериментальные характеристики, сравнивают их с расчетными и объясняют причину некоторого расхождения. Коэффициент статизма определяют по формуле

$$k_c = \frac{U_{х.х} - U_H}{U_H} \cdot 100\%.$$

При загрузке генератора током I_T , отличным от номинального, напряжение на генераторе будет U_T и тогда коэффициент статизма

$$k_c = \frac{U_{х.х} - U_T}{U_H} \cdot \frac{I_H}{I_T} \cdot 100\%.$$

Содержание отчета. Отчет должен содержать электрическую схему стенда с регулятором, данные измерений, статические характеристики регулирования и расчетные коэффициенты статизма.

Протокол испытаний АСУ напряжением генераторов

Без регулятора напряжения $k_c =$		С регулятором типа РУН					
		без токовой стабилизации и компенсации $k_c =$		с токовой ста- билизацией $k_c =$		с токовой ком- пенсацией $k_c =$	
I_r, A	U_r, B	I_r, A	U_r, B	I_r, A	U_r, B	U_r, B	I_r, A

Контрольные вопросы

1. Расскажите о принципе действия и назначении угольного регулятора напряжения.
2. Для чего предназначен каждый элемент схемы?
3. Какие характеристики регулирования вам известны?
4. Что такое коэффициент статизма и как его можно изменить на регуляторе РУН?
5. Каково назначение токовой компенсации?
6. Что нужно сделать, если регулятор работает в неустойчивом режиме?
7. Как настроить регулятор на заданное напряжение?
8. Как влияет на работу регулятора изменение сопротивления $r_{o.c}$?
9. Объясните на примере регулятора РУН назначение обратных связей в АСУ.

РАБОТА 9

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Целью работы является изучение функциональной и структурной схем АСУ прямого и косвенного действия, определение статических и динамических характеристик звеньев и всей АСУ, изучение переходного процесса АСУ.

Общие сведения. Наиболее характерны АСУ частотой вращения двигателей: при помощи центробежного маятника — на двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и при помощи электрического устройства — на электроприводе металлообрабатывающих станков.

Принципиальная, функциональная и структурная схемы управления с центробежным маятником показаны на рисунке 100, а, б, в. В лаборатории вместо ДВС целесообразно применять двигатель постоянного тока (ДПТ). Их динамические свойства одинаковы, в то время как использование ДПТ позволяет существенно упростить условия проведения работы.

Данная АСУ относится к непрерывным, статическим, одноконтурным, замкнутым системам прямого действия, обеспечивающим технологическое управление частотой вращения двигателя при отклонении ее от заданного значения.

Функциональная схема (рис. 100, б) показывает, что система в основном состоит из управляемого объекта УО, воспринимающего органа ВО, усилительного органа УО, исполнительного органа ИО и одного вспомогательного элемента — блока питания БП. Управляемой величиной ОУ является частота вращения двигателя ($y = \omega$, с⁻¹ или $y = n$, об/мин), управляющим параметром — ток возбуждения двигателя ($x = i_b$).

В качестве органа ВО используется центробежный маятник топливного насоса трактора ДТ-54. Входной параметр ВО — частота вращения, а выходной — перемещение муфты центробежного маятника (z_1). В качестве органа УО применена система рычагов ab, cd , у которой входной параметр — перемещение муфты центробежного маятника (z_1), а выходной — перемещение ползунка (z_2) реостата возбуждения. Исполнительным органом служит реостат возбуждения R_b , установленный в цепи обмотки возбуждения, при помощи которого изменяется управляющий параметр i_b .

Принцип работы, подобной АСУ, удобно пояснить, пользуясь функциональной схемой. При появлении возмущающего воздействия $N(t)$ (момента сопротивления на валу двигателя) изменяется значение управляющего параметра y . Возникшее вследствие этого перемещение муфты центробежного маятника, через систему механических рычагов вызывает перемещение ползунка реостата R_b и приводит к изменению тока i_b возбуждения двигателя, что способствует восстановлению частоты вращения двигателя до нужного значения. Аналогично работает АСУ частотой вращения дизельного

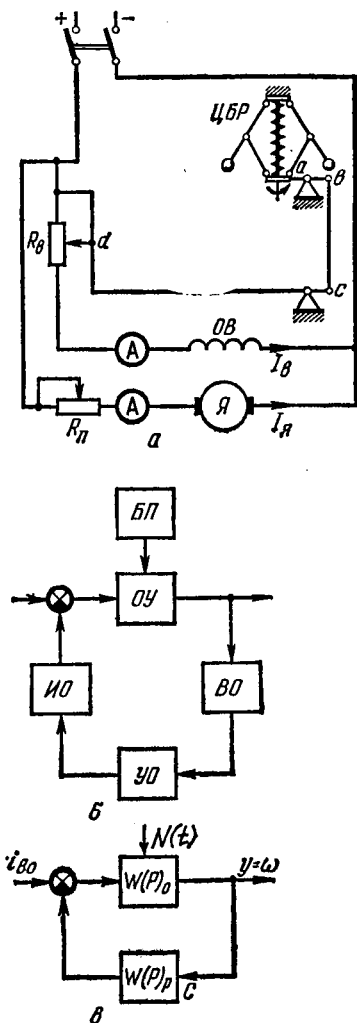


Рис. 100. Принципиальная (а), функциональная (б) и структурная (в) схемы АСУ с центробежным регулятором.

двигателя трактора. Только в этой системе в качестве органов *ОУ* и *ИО* служат соответственно двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и топливный насос.

Статическая характеристика АСУ представляет собой зависимость частоты вращения двигателя от момента сопротивления на его валу. Однако в двигателях постоянного тока момент сопротивления на валу пропорционален току якоря. Поэтому в лабораторной работ за статическую характеристику удобнее принять зависимость частоты вращения от тока в цепи якоря $\omega = f(I_{\text{я}})$.

О динамических свойствах АСУ наглядное представление дает структурная схема (рис. 100, *в*), которая может быть легко получена из функциональной (рис. 100, *б*).

Динамические свойства АСУ в самом общем случае характеризуются временной зависимостью $y = f(t)$. Зависимости $y(t)$ могут быть апериодическими и колебательными, сходящимися и расходящимися. Сходящиеся характеристики свидетельствуют об устойчивости, а расходящиеся — о неустойчивости процесса.

Зависимости $y(t)$ характеризуются следующими параметрами: апериодические — постоянной времени T , временем t_n переходного процесса, за которое система приходит в установившееся состояние, динамической ошибкой δ ; колебательные — максимальной величиной перерегулирования Δy_1 в первый полупериод, колебательностью $d = \ln \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2}$, временем t_n переходного процесса, динамической ошибкой δ .

В рассматриваемой АСУ два безынерционных звена — *УО* и *ИО*. При объединении *УО* с *ВО*, а *ИО* с *ОУ* получается структурная схема, состоящая всего из двух звеньев: одно инерционное (*ИО* в сочетании с *ОУ*), а другой — второго порядка (*ВО* в сочетании с *УО*).

Основное преимущество АСУ прямого действия заключается в их предельной простоте.

К основным недостаткам данной автоматической системы управления можно отнести:

1) наличие статической ошибки:

$$\sigma = \frac{1}{1 + k_c},$$

где $k_c = \frac{\Delta \omega I_{\text{я.н}}}{\Delta I_{\text{я.н}} \omega_n}$ — относительный номинальный коэффициент усиления АСУ;

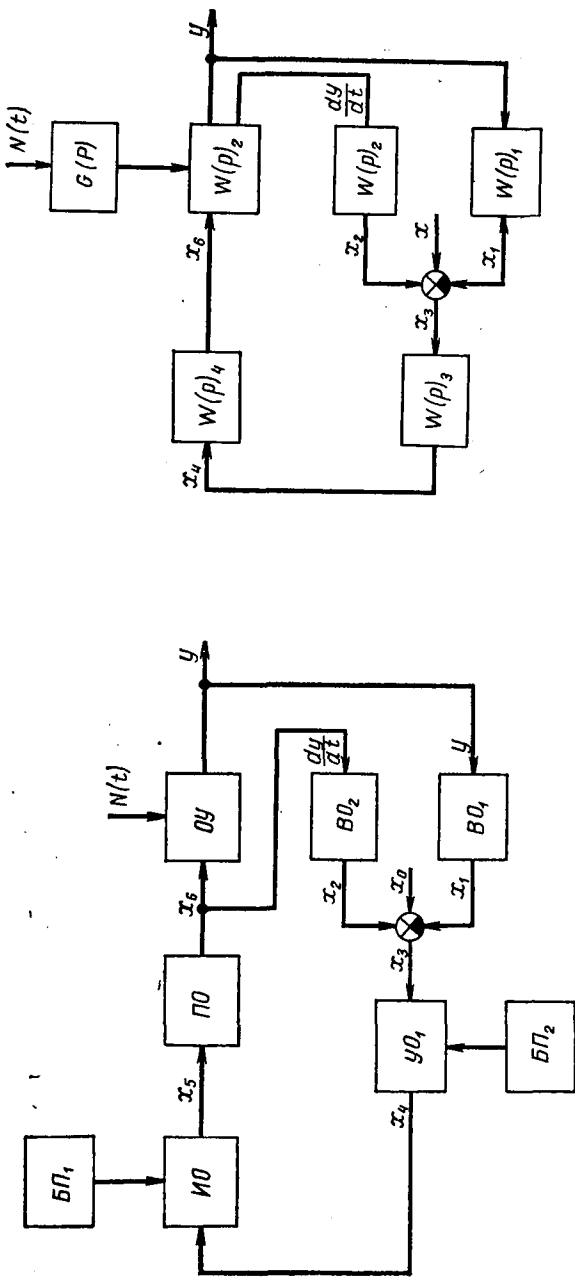
2) наличие динамической ошибки вследствие инерционности, обусловленной принципом управления по отклонению управляемого параметра:

$$\delta = \frac{\omega(t) - \omega_{\infty}}{\omega_{\infty}} \cdot 100\%,$$

где $\omega(t)$; ω_{∞} — текущее и установившееся значения частоты вращения двигателя.

Там, где требуется высокая точность управления, применяют более сложные АСУ.

Принципиальная схема автоматической системы управления частотой вращения электропривода металлообрабатывающих станков изображена на рисунке 101, *а*, ее функциональная и структурная схемы — на рисунке 102, *а* и *б*.



б

а

Рис. 102. Функциональная (а) и структурная (б) схемы АСУ частотой вращения электропривода металлообрабатывающих станков.

Судя по классификационным признакам, можно сказать, что данная АСУ принадлежит к непрерывным, астатическим, одноконтурным, стабилизирующим, замкнутым системам косвенного действия, обеспечивающим по комбинированному принципу технологическое управление частотой вращения электродвигателя.

Функциональная схема системы (рис. 102, а) состоит из 9 основных органов: управляемого объекта ОУ, двух воспринимающих органов $ВО_1$ и $ВО_2$, суммирующего элемента задатчика с x_0 , усилительного органа УО, исполнительного органа ИО, преобразующего органа ПО и двух блоков питания БП₁ и БП₂.

Управляемый объект — двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (тип П — 21, $P_n = 1,5$ кВт, $U_n = 220$ В, $n_n = 3000$ об/мин). Управляемый параметр — частота вращения двигателя ($y \equiv \omega \equiv n$), управляющий — напряжения питания электродвигателя ($x \equiv U_a$).

В качестве органа $ВО_1$ служит тахогенератор ТГ (тип МТГ-30П). На выходе $ВО_1$ появляется напряжение $U_{т.г.}$, пропорциональное отклонению управляемого параметра y от некоторого заданного значения. В качестве органа $ВО_2$ используется дифференцирующее звено, состоящее из резистора R_8 и конденсатора C_4 , присоединенным к зажимам якоря. На выходе $ВО_2$ появляется сигнал x_2 , соответствующий отклонению возмущения ($N(t) = I_a$) и пропорциональный производной $\frac{dy}{dt}$. Орган

$ВО_2$ обеспечивает устойчивость регулирования и стабилизирует колебания во время переходного процесса. Задатчиком служит резистор R_9 , подключенный к источнику стабилизированного выпрямленного напряжения трансформатора Tr_1 . Очевидно, сигнал задатчика x_0 представляет собой напряжение U_0 на части резистора R_9 . Усилительный орган представляет собой трехкаскадный транзисторный усилитель постоянного тока, входной сигнал которого $x_3 = x_0 - (x_1 + x_2)$. Выходным сигналом x_4 усилителя является напряжение на обмотке управления исполнительного органа, включенной в коллекторную цепь транзистора T_4 . В качестве органа ИО служит трехфазный магнитный усилитель, работающий по схеме с самонасыщением, то есть с внутренней обратной связью, выполненной на диодах $D_1 \div D_6$.

Выходным сигналом x_5 органа ИО является переменное напряжение, поступающее на трехфазный полупроводниковый выпрямитель $D_7 \div D_{12}$, который играет роль преобразующего органа ПО. В ПО трехфазное напряжение переменного тока (сигнал x_5) преобразуется в напряжение постоянного тока цепи якоря двигателя, представляющего собой сигнал x_6 . В качестве элемента БП₁ используется сеть переменного трехфазного тока напряжением 380 В, а в качестве элемента БП₂ — однофазный трансформатор Tr_1 .

Принцип работы АСУ поясняется рисунком 102. Возмущающим воздействием является изменение механического момента на валу двигателя, при возникновении которого становится другой величина управляемого параметра, что приводит к изменению выходных сигналов воспринимающих органов $ВО_1$ и $ВО_2$. Разность сигналов $x_0 - (x_1 + x_2) = x_3$ поступает на вход транзисторного усилителя, что, в свою очередь, скаывается на величине напряжения соответственно на выходе МУ и выпрямителя $D_7 \div D_{12}$. Увеличение момента на валу приведет к такому увеличению напряжения на зажимах якоря $U = x_6$, что частота вращения двигателя останется неизменной. Нагрузка $N(t)$ на валу двигателя постоянного тока создается при помощи трехфазного асинхронного электродвигателя АД, работающего в качестве электротормоза. Схема

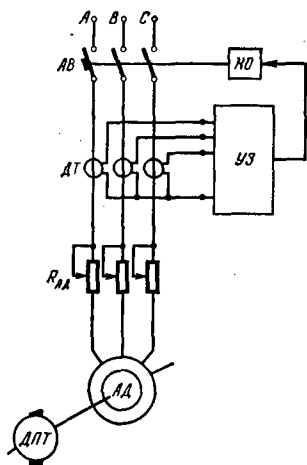


Рис. 103. Принципиальная схема включения асинхронного двигателя.

оно уменьшает коэффициент усиления АСУ, который приходится повышать при помощи дополнительных усилителей. Орган УО — практически безынерционное звено с $W(p)_3 = k_3$. Орган ИО на магнитных усилителях в сочетании с безынерционным органом ПО можно считать инерционным звеном первого порядка с $W(p)_4 = \frac{k_4}{T_4 p + 1}$; $T_4 = \frac{k_p}{4f} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} \cdot I_{\text{ВХ}} \cdot 4f}$.

Так как нагрузка на вал ДПТ задается асинхронным двигателем, передаточная функция которого $G(p) = \frac{k_n}{T_n p + 1}$, то при скачкообразном возмущающем воздействии, то есть включении и отключении напряжения питания на валу ДПТ не будет скачка $N(t)$. $G(p)$ можно считать нормированной передаточной функцией, определяющей $N(t)$ через скачок напряжения питания асинхронного двигателя: $N(p) = G(p) U_n(p)$.

Указания и порядок выполнения работы. 1. Ознакомиться со стендом испытания и всеми приборами, собрать поочередно схемы испытания (рис. 100 и 102).

2. Снять статические характеристики звеньев.

Для схемы на рисунке 100 при разомкнутой АСУ снимают характеристики $z_2 = f(\omega)$ (ВО в сочетании с УО) и $\omega = f(z_2)$ при трех постоянных значениях тока якоря: $I_{\text{я1}}, I_{\text{я2}}, I_{\text{я3}}$. Размыкают АСУ, отъединяя рычаг от ползунка реостата R_B . При снятии первой характеристики частоту вращения изменяют при помощи реостата R_0 (рис. 101).

Для АСУ (рис. 101) статические характеристики звеньев снимают при замкнутой АСУ, измеряя электронным вольтметром ВК-7 напряжения на входе и выходе каждого элемента. О частоте вращения ω двигателя постоянного тока (ОУ) судят по напряжению тахогенератора $U_{\text{т.г.}}$, поскольку их связывает прямо пропорциональная зависимость (рис. 104). Перемещение z_2 измеряют по шкале, размещенной на реостате R_B .

включения АД показана на рисунке 103. Асинхронный электродвигатель соединен в звезду и подключается на напряжение 127 В через реостаты РАД. Реостатами РАД регулируют напряжение питания на зажимах асинхронного двигателя, а следовательно, и его тормозной момент $N(t)$.

Динамические свойства АСУ определяются ее структурной схемой (рис. 102, б). Орган ОУ представляет собой инерционное звено с функцией

$$W(p)_0 = \frac{k_0}{T_0 p + 1}, \text{ орган } BO_1 — \text{ инерционное звено с } W(p)_1 = \frac{k_1}{T_1 p + 1};$$

поскольку $T_1 = 0,001$ с, его зачастую считают усилительным звеном. Орган BO_2 — реальное дифференцирующее звено с $W(p)_2 = \frac{T_2 p}{T_2 p + 1}$; $T_2 = R_8 C_4 = 0,02$ с. Это звено снижает максимальную величину перерегулирования, сокращает время t_n и т. д. Однако

3. Поочередно снять статические характеристики $\omega = f[N(t)]$ замкнутых АСУ (рис. 100 и 101).

Поскольку $N(t) = I_{\text{я}}$, то можно снять зависимость $\omega = f(I_{\text{я}})$. Изменяют $N(t)$ при помощи асинхронного двигателя, включенного по схеме, приведенной на рисунке 103.

4. Построить графики экспериментальных статических характеристик для отдельных звеньев и систем в целом. Для АСУ (рис. 100) по экспериментальным характеристикам отдельных звеньев построить расчетную характеристику замкнутой АСУ. Эту характеристику следует нанести на одном графике с экспериментальной кривой $\omega = f(I_{\text{я}})$.

5. Поочередно снять динамические характеристики $\omega = f(t)$ АСУ (рис. 100; 101; 103).

Поскольку $\omega = U_{\text{т.г}}$, то об $\omega(t)$ можно судить по $U_{\text{т.г}} = f(t)$ при изменении $N(t)$. $N(t)$ удобно задавать включением или отключением напряжения питания тормозного асинхронного электродвигателя (рис. 103). Зависимость $U_{\text{т.г}} = f(t)$ целесообразно наблюдать на экране осциллографа ИО-6, обладающего послесвечением до 10 с.

По временным характеристикам определить параметры T , t_n , Δy_1 .

6. Проверить устойчивость работы АСУ включением и отключением схемы (рис. 103) на номинальную нагрузку.

7. Вычислить коэффициенты усиления звеньев, статическую и динамическую ошибки, сделать выводы по работе.

Содержание отчета. Отчет должен содержать программу, схемы и протоколы испытаний, графики и результаты расчетов, выводы по работе.

Рекомендуемая литература [2, 3, 5].

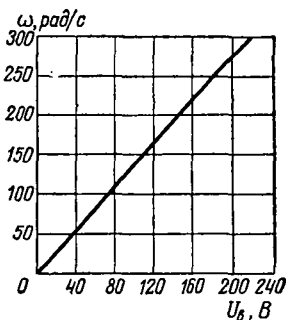


Рис. 104. Статическая характеристика тахогенератора ТГ-30.

Контрольные вопросы

1. Сколько функциональных органов и сколько звеньев содержит АСУ с центробежным маятником и почему?
2. Сколько функциональных органов и структурных звеньев содержит АСУ с электрическим управляющим устройством и почему?
3. Какие принципы управления заложены в исследуемые АСУ?
4. В чем преимущества и недостатки АСУ с центробежным маятником?
5. Каковы преимущества и недостатки АСУ с электрическим управляющим устройством?
6. Что понимается под статической характеристикой: звеньев и АСУ в целом?
7. Что понимается под динамической характеристикой и устойчивостью АСУ?
8. Какими параметрами определяется динамическая характеристика АСУ?
9. Поясните порядок испытания АСУ с центробежным маятником и с электрическим управляющим устройством.

240

Протокол испытания для АСУ, изображенной на рисунке 101

Номер опыта	$I_A,$ A	$U_B,$ B	$U_{T.r},$ B	$\omega,$ рад/с	$U_3,$ B	$U_4,$ B	Примечания

Глава X

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ И АСУ



ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Цикл этих работ выполняют на лабораторном стенде, состоящем из аналоговой машины МН-7, наборного поля типовых элементов и структурных схем автоматических систем управления, электронного индикатора, электронного стабилизированного блока питания и измерителя частотных характеристик.

На аналоговых машинах МН-7 проводят математическое моделирование динамических процессов в системах автоматического регулирования, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, в том числе с большим количеством нелинейных зависимостей.

Аналоговая машина МН-7 объединяет решающий блок, электронно-лучевой индикатор и электронный стабилизированный выпрямитель, от которого получает питание вся установка. Основным узлом машины является решающий блок, содержащий 16 усилителей постоянного тока с большим коэффициентом усиления и глубокой отрицательной обратной связью.

Наборное поле типовых звеньев и структурных схем автоматических систем управления состоит из переключателей, осуществляющих переключения соответствующих резисторов и емкостей, и зажимов для подачи входных сигналов и снятия выходного сигнала. Структура наборного поля типовых звеньев АСУ представлена на рисунке 105. Здесь изображены шесть типовых звеньев АСУ, а на рисунке 106 показаны схемы моделирования этих звеньев: аperiodического 1 порядка (схема I); интегрирующего (схема II); колебательного (схема III при $T_4 < 2T_3$); аperiodического 2 порядка (схема III при $T_4 > 2T_3$); дифференцирующего (схема IV) и звена с запаздыванием по времени (схема VI). Кроме того, на схеме V показано безынерционное звено с нелинейной характеристикой.

Установление соответствующих коэффициентов усиления k и постоянных времени T звеньев осуществляется при помощи тумблеров и переключателей, закрепленных на наборном поле у каждого звена (рис. 105).

Электронный индикатор переходных процессов И-5М используется для наблюдения за изменяющимися величинами электрического напряжения по экрану электронно-лучевой трубки Л с длительным (до 30 с) послесвечением (рис. 107).

Выход типового звена с наборного поля подключается к вертикальному усилителю («входы y »), коэффициент усиления которого регулируют ручкой «вертикальный усилитель». Отклонение луча по горизонтали осуществляется горизонтальным усилителем, коэффициент усиления которого регулируют ручкой «горизонтальный усилитель». Коэффициенты усиления усилителей изменяются потенциометрами y и x .

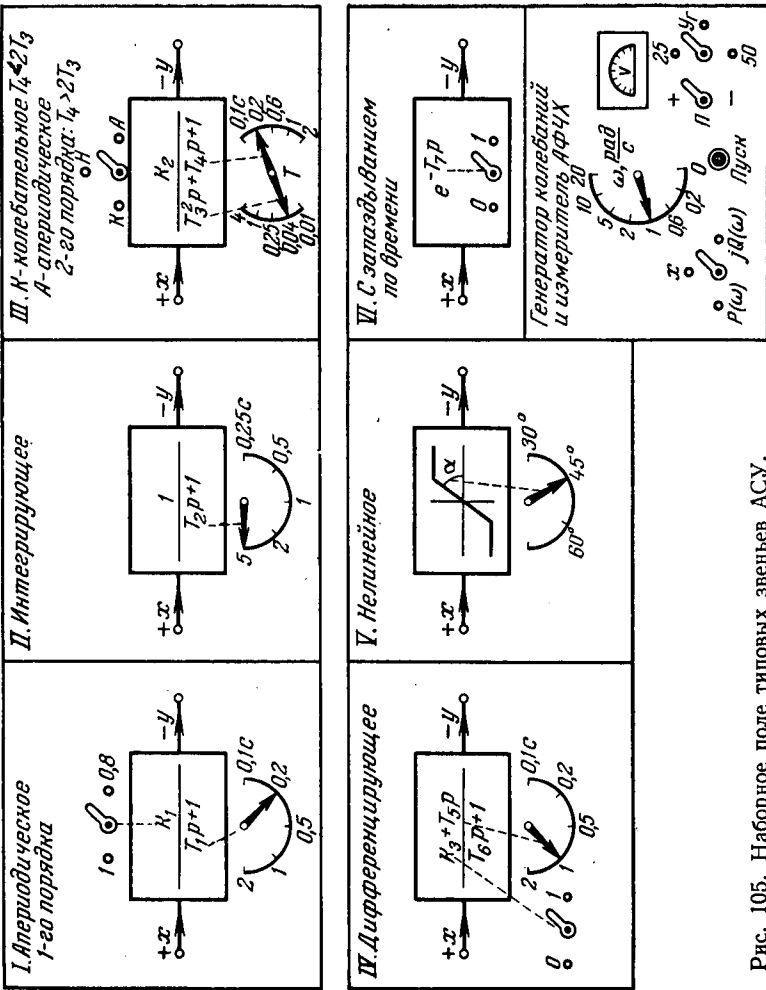


Рис. 105. Наборное поле типовых звеньев АСУ.

Звено	Передачная функция	Схема модели
I	$-\frac{K_1}{T_1 p + 1}$ $K_1 = \frac{R_2}{R_1}$ $T_1 = R_1 C_1$	
II	$-\frac{1}{T_2 p}$ $T_2 = RC$	
III	$\frac{K_2}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}$ $T_3^2 = R_1 C_1$ $T_4 = R_4 C_2$	
IV	$-\frac{T_5 p + K_3}{T_6 p + 1}$ $K_3 = \frac{R_2}{R_1}$ $T_5 = C$	
V	$\alpha = \frac{R_2}{R_1}$	
VI	$e^{-T_7 p}$ $T_7 = C$	

Рис. 106. Схемы моделирования типовых звеньев.

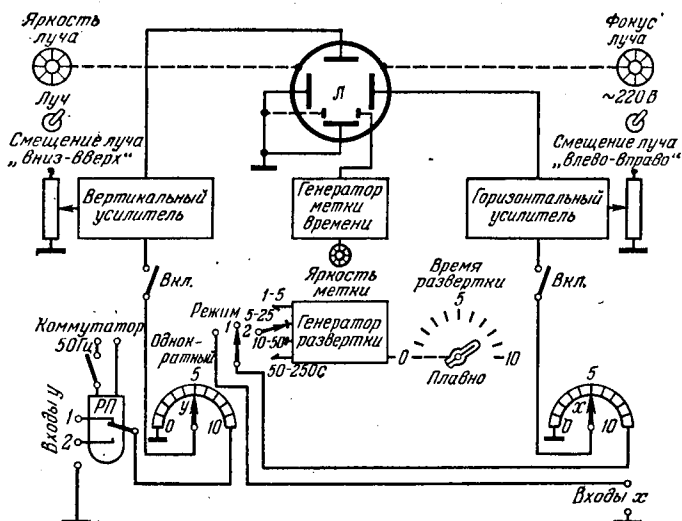


Рис. 107. Блочная схема индикатора И-5М переходных процессов.

Ручки индикатора «вниз — вверх» и «влево — вправо» служат для установки луча в требуемом исходном положении соответственно по вертикали и по горизонтали на экране индикатора.

Чтобы на экране индикатора можно было одновременно наблюдать за двумя величинами, используется переключатель вертикальных входов, выполненный на основе поляризованного реле РП-7. Реле подключается к сети 50 Гц при помощи тумблера «коммутатор», и, следовательно, с частотой сети переключает вертикальные входы 1 и 2. При отключенном реле к вертикальному усилителю постоянно подключен вход 1.

Когда тумблер «усилитель развертки» (на рисунке не показан) переводят в положение «развертка», происходит развертка луча по горизонтали во времени. Для снятия статических характеристик $y = f(x)$ тумблер ставят в положение «однократный». Положение тумблера «Режим 1» соответствует независимой развертке, а положение «Режим 2» — согласованной работе индикатора с исследуемым объектом при определенной длительности развертки (1—5, 5—25, 10—50, 50—250 с). Обратный ход луча чертит нулевую линию.

«Генератор метки времени» работает при прямом ходе луча, когда тумблер занимает положение «Внутренние отметки времени» (на рисунке не показан). При помощи генератора на экране индикатора создаются необходимые отметки времени в виде увеличения яркости свечения луча, по которым определяют длительность переходного процесса.

Кроме того, на лицевой панели индикатора расположены ручки «яркость луча» и «фокус луча», необходимые регулировки соответственно яркости луча и его фокусировки.

Измеритель частотных характеристик объединяет генератор и измеритель параметров сигнала. Чтобы снять частотные характеристики с отдельных звеньев и их соединений, пользуются генератором синусо-

идальных колебаний и специальной схемой включения вольтметра (или миллиамперметра) для измерения мнимой и вещественной частей выходного сигнала. Принципиальная схема измерителя частотных характеристик и генератора показана на рисунке 108.

Генератор синусоидальных колебаний состоит из трех последовательно соединенных решающих усилителей моделирующей установки МН-7. Первый и третий усилители, выполненные соответственно на 15 и 16 блоках МН-7, представляют собой интегрирующие звенья, охваченные обратной связью. Второй усилитель (блок 12) служит для инвертирования сигнала.

При таком соединении усилителей в них возникают гармонические колебания определенной частоты. Для регулирования частоты колебаний служит спаренный тумблер $T(\omega)$, при помощи которого можно изменять постоянную времени интегратора и тем самым частоту колебаний.

Амплитуду гармонических колебаний ограничивают диодно-потенциальные ячейки D_1 и D_2 . Синусоидальные колебания подаются на вход x_3 исследуемого звена и в обмотку поляризованного реле РП, которое переключает свои контакты в каждый полупериод колебания $A \sin \omega t$ и, следовательно, осуществляет синхронное выпрямление выходного напряжения y_3 исследуемого звена. Другими словами, это реле выделяет из амплитудно-фазовой частотной характеристики исследуемого звена вещественную или мнимую части в зависимости от положения переключателя П. Это происходит следующим образом. Реле РП своими контак-

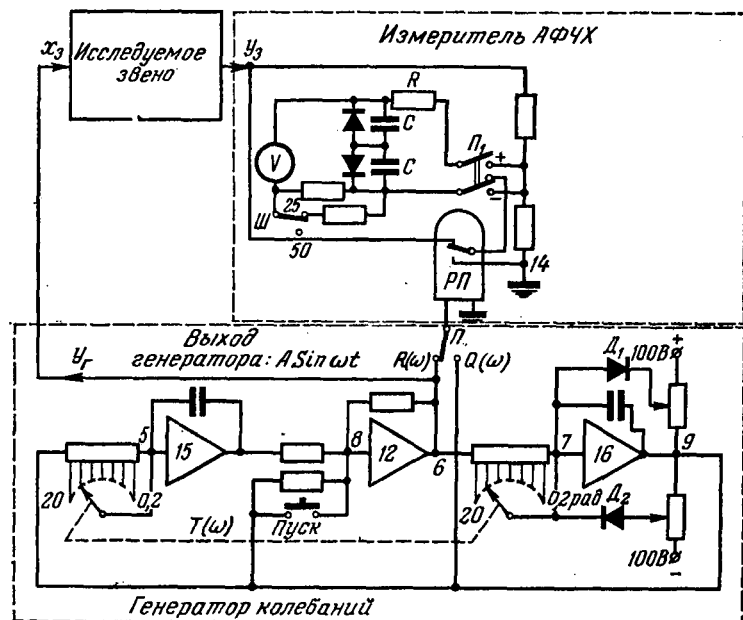


Рис. 108. Блочно-электрическая схема для снятия частотных характеристик.

тами подключает вольтметр V к выходному напряжению U_3 и переключает его в соответствии с изменением напряжения на его обмотке по закону $A \sin \omega t$, а при переводе переключателя Π в другое положение, реле $P\Pi$ подключает вольтметр V и переключает его в соответствии с изменением входного напряжения по закону $A \cos \omega t$. В первом случае вольтметр V измеряет среднее значение напряжения $Q(\omega) = B \sin \varphi$, а во втором — среднее значение величины $P(\omega) = B \cos \varphi$, где B — амплитуда напряжения выходных синусоидальных колебаний, а φ — угол сдвига между входными и выходными колебаниями.

Первая величина определяет мнимую часть

$$jI(\omega) = \frac{B}{A} \sin \varphi,$$

а вторая — вещественную часть

$$R(\omega) = \frac{B}{A} \cos \varphi$$

амплитудно-частотной характеристики.

Для измерения средних величин вольтметр подключен через $R-C$ цепочки с постоянными времени порядка 5—25 с. О знаке мнимой $jI(\omega)$ и вещественной $R(\omega)$ частей судят по положению переключателя Π_1 .

Амплитуду $B(\omega)$ и фазу $\varphi(\omega)$ выходного сигнала U_3 (напряжения) определяют по формулам

$$B(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$$

и

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}.$$

Зная величину A входного сигнала (напряжения) по вышеприведенным формулам вычисляют вещественную и мнимую части амплитудно-фаза-частотной характеристики звена, строят годограф:

$$W(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega)$$

и затем фазо-частотную характеристику звена $\varphi(\omega)$.

РАБОТА 10

ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЯХ АСУ

Целью работы является изучение типовых звеньев и переходных процессов в них при скачкообразном изменении входного сигнала.

Указания и порядок выполнения работы. Выполнение работы заключается в поочередном снятии кривой переходного процесса шести типовых линейных и одного нелинейного звена. Схемы модели (рис. 107) и решающие блоки машины МН-7 собраны, а необходимые их цепи выведены на наборное поле типовых звеньев лабораторной установки. Студенты поочередно подключают входы и выходы типовых звеньев к машине МН-7, настраивают индикатор И-5М на нужный режим работы и фиксируют в протоколе результаты наблюдения.

1. **Переходные процессы** регистрируют при помощи индикатора И-5М в такой последовательности. Выход делителя напряжения D , который находится в машине МН-7, подключают соединительным проводом к входу исследуемого звена, а выход исследуемого звена соединяют проводом (с оконцевателем со знаком $У$) к вертикальному усилителю индикатора И-5М (к «входу y , 1 или 2»). Входной сигнал подают на звенья I , II , III , IV или VI в форме единичного скачка, который возникает при переключении потенциометра делителя напряжения с 0 на 20 В (переключатель потенциометра находится на лицевой панели машины МН-7). На наборном поле (рис. 105) со звена III получают три типовых звена: колебательное устойчивое (переключатель в положении K); колебательное неустойчивое (переключатель в положении H) и аperiodическое 2 порядка (переключатель в положении A).

При исследовании нелинейного звена V на его вход подают гармонические колебания. Для этого выход генератора соединяют с «входом x » индикатора И-5М и с выходом звена V , а выход звена V — с «входом y » индикатора. Гармонические колебания возникают при нажатии кнопки «Пуск» генератора, установленной на наборном поле стенда. В этом случае на экране индикатора должны наблюдаться усеченные синусоиды, что соответствует статической характеристике нелинейного звена V (рис. 106).

2. Каждый студент для заданного преподавателем варианта должен перенести на кальку с экрана индикатора кривую переходного процесса. Вариант задания устанавливают тумблерами звеньев на наборном поле стенда. Тумблер на панели управления машины МН-7 переключают в положение «работа», тумблеры индикатора И-5М и машины ставят в положение «однократный». Кривые переходного процесса звеньев, кроме интегрирующего, снимают после нажатия кнопки «Пуск» машины МН-7.

Для снятия кривых переходного процесса в интегрирующем звене II переключатель «Режим» индикатора И-5М ставят в положение 2, а машину МН-7 переводят тумблером в режим «повторный».

Перед копированием кривой переходного процесса необходимо ручками управления (рис. 107) настроить индикатор так, чтобы вся кривая умещалась на экране и была удобной для переноса на кальку.

Содержание отчета. Отчет должен содержать схемы модели типовых звеньев, их передаточные характеристики и кривые переходных процессов в типовых звеньях.

Литература [3, 5, 8, 16].

Контрольные вопросы

1. Что понимается под типовым звеном АСУ?
2. Как реально АСУ разделяют на типовые звенья?
3. Перечислите типовые звенья АСУ.
4. Приведите примеры типовых звеньев.
5. Чем отличается колебательное звено от аperiodического 2-го порядка?
6. Пользуясь таблицей 3 главы VII расскажите о принципе работы решающих блоков машины МН-7.
7. Какие преимущества дает способ исследования звеньев и АСУ на аналоговых машинах?

РАБОТА 11

ИЗУЧЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ АСУ

Целью работы является изучение амплитудно-фазо-частотных характеристик (АФЧХ) типовых звеньев и ознакомление со способами их снятия и расчета.

Указания и порядок выполнения работы. Характеристики снимают при помощи измерителя амплитудно-фазо-частотных характеристик в такой последовательности.

1. Выход генератора синусоидальных колебаний (рис. 108) соединяются с входом x_3 исследуемого звена (рис. 105) и с обмоткой поляризованного реле $РП$ измерителя, а к выходу звена подключают «вход y_3 » измерителя АФЧХ. С нажатием кнопки «Пуск» машины МН-7 возникают гармонические колебания, которые поступают на вход исследуемого звена и вход измерителя АФЧХ (на обмотку реле $РП$). На измеритель АФЧХ направляется также сигнал с исследуемого звена.

2. Устанавливая тумблером $T(\omega)$ поочередно соответствующие частоты ω колебания генератора, поочередно замеряют вещественную и мнимую части частотной функции $P(\omega)$ и $Q(\omega)$, а затем рассчитывают амплитудно-фазо-частотную $W(j\omega)$ и фазо-частотную $\varphi(\omega)$ характеристики звеньев I , III , IV и VI . Результаты вносят в протокол испытаний.

При снятии частотных характеристик звена необходимо после нажатия кнопки «Пуск» ждать 10—15 с, в течение которых стрелка измерительной головки станет неподвижной.

Установленные на панели измерителя АФЧХ переключатели служат (рис. 108): $Ш$ — для изменения пределов шкалы измерителя с 25 на 50 делений, $П$ — для переключения обмотки реле $РП$ при измерении вещественных $P(\omega)$ и мнимых $Q(\omega)$ частей характеристики; $П_1$ — для изменения полярности сигнала, подводимого к измерительной головке.

3. На миллиметровой бумаге строят АФЧХ и ФЧ характеристики типовых звеньев. Рекомендуется одному студенту бригады строить характеристику для звена I , другому студенту — для звена II и т. д.

Содержание отчета. Отчет должен содержать схему измерителя частотных характеристик, экспериментальные данные для расчета частотных характеристик, годографы АФЧХ типовых звеньев.

Литература [3, 5, 8, 16].

Протокол испытаний и расчета частотных характеристик звеньев

Звено	Частота ω	Экспериментальные и расчетные данные					
		$P(\omega)$	$Q(\omega)$	$A(\omega)$	$B(\omega)$	$R(\omega)$	$\varphi(\omega)$

Контрольные вопросы

1. Что понимают под частотными характеристиками?
2. Какая характеристика изображается на плоскости в виде годографа?
3. Чем отличаются частотные характеристики от кривых переходных процессов?
4. Какое преимущество при исследовании АСУ дают частотные методы?
5. Для каких целей используются частотные характеристики АСУ?
6. Что понимается под логарифмическими частотными характеристиками?
7. Объясните, пользуясь рисунком 108, принцип работы измерителя частотных характеристик.

РАБОТА 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЗВЕНЬЕВ АСУ

Целью работы является изучение динамических свойств АСУ при параллельном соединении элементарных звеньев.

Указания и порядок выполнения работы. Структурную схему параллельно соединенных звеньев, показанную на рисунке 109, составляют на наборном поле лабораторного стенда из типовых звеньев I, II и IV. Для образования положительной обратной связи используют звено запаздывания, которое при $T_z = 0$ инвертирует сигнал $-y$ на x_1 . Если выход схемы соединяют непосредственно с ее входом, то получают структурную схему параллельного соединения звеньев с отрицательной обратной связью, так как сигнал $-y$ на выходе противоположен по знаку сигналам входного воздействия $x_{вх}$. Входной сигнал подают с делителя напряжения машины МН-7, переключая тумблер с 0 на 10 В постоянного напряжения.

1. * По заданным в таблице вариантов параметрам рассчитать и построить для своего варианта амплитудно-фазо-частотную характеристику схемы параллельного соединения звеньев (рис. 109) без обратной связи. С этой целью вначале определяют передаточную функцию схемы по формуле

$$W(p) = \sum_{i=1}^3 W_i(p) = W_I(p) + W_{II}(p) + W_{IV}(p),$$

а затем, подставив в последнее уравнение $p = j\omega$, находят вещественную $R(\omega)$ и мнимую $jI(\omega)$ части АФЧХ, по которым для значений ω от 0 до ∞ строят на комплексной плоскости годограф $W(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega)$.

2. Собрать на наборном поле (рис. 105) исследуемую структурную схему (рис. 109) и снять на кальку с экрана индикатора И-5М в своем варианте характеристику переходного процесса для трех случаев: а) при

* Пункт 1 студенты выполняют до прихода в лабораторию. Один студент бригады берет первый вариант, другой студент — второй вариант и т. д.

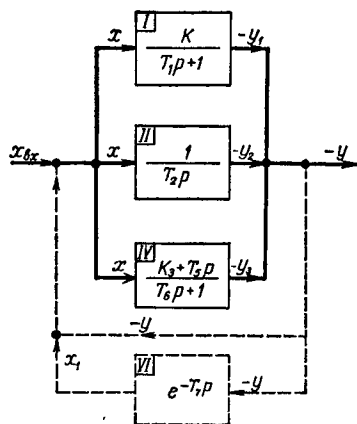


Рис. 109. Структурная схема АСУ при параллельном соединении звеньев и наличии обратной связи.

чета АФЧХ указан в описании лабораторной установки и в работе 11.

Содержание отчета. Отчет должен содержать структурную схему исследуемой системы, кривые переходных процессов и экспериментальные частотные характеристики для трех указанных случаев, расчетные и экспериментальные графики амплитудно-фазо-частотной характеристики для разомкнутой системы.

Литература [3, 5, 8, 16].

Таблица вариантов задания

Варианты	Параметры				
	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$T_3, \text{с}$	k_1	k_3
1	0,1	2	0,5	1	0
2	0,2	1	1	0,8	1
3	0,5	0,5	2	0,8	1
4	1	0,2	1	1	0
5	2	0,1	0,5	1	1

Контрольные вопросы

1. Какую структурную схему называют схемой с параллельным соединением звеньев?

2. Как рассчитывают передаточную функцию и АФЧХ системы, состоящей из параллельно включенных звеньев с известными для звеньев передаточными функциями и АФЧХ?

Протокол снятия и расчета частотных характеристик

Структурная схема	Час- тота ω	Экспериментальные и расчетные данные						
		$P(\omega)$	$Q(\omega)$	$A(\omega)$	$B(\omega)$	$R(\omega)$	$jI(\omega)$	$\varphi(\omega)$
Разомкнутая система	ω_1 ⋮							
Система с отрицательной обратной связью	ω_1 ⋮							
Система с положительной обратной связью	ω_1 ⋮							

3. Объясните причины, по которым экспериментальная АФЧХ не совпадает полностью с расчетной.

4. Какую роль играет звено с запаздыванием в качестве звена обратной связи?

5. В чем назначение обратной связи в АСУ?

6. Как изменятся характеристики переходных процессов, если в звене обратной связи принять $T_7 > 0$?

7. Как по результирующей передаточной функции найти операторное уравнение для системы с параллельным соединением звеньев?

РАБОТА 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЗВЕНЬЕВ И НАЛИЧИИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

Целью работы является изучение динамических свойств АСУ при последовательном соединении типовых звеньев и систем с обратными связями.

Указания и порядок выполнения работы. Структурная схема последовательно соединенных звеньев АСУ показана на рисунке 110. Она состоит из трех типовых звеньев I, II и IV, включаемых последовательно на наборном поле (рис. 105). На вход системы подают скачкообразное воздействие с делителя напряжения машины МН-7 в форме постоянного напряжения, равного 10 В.

1.* По заданным параметрам (таблица вариантов) рассчитать и построить амплитудно-фазо-частотную характеристику разомкнутой сис-

*Аналогично пункту 1 работы 12.

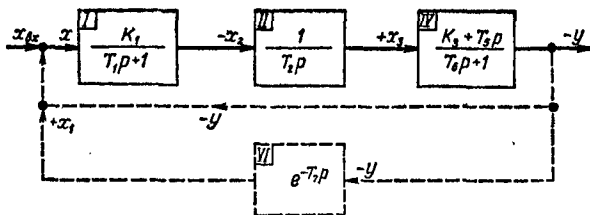


Рис. 110. Структурная схема АСУ при последовательном соединении звеньев и наличии обратной связи.

темы. Для этого определяют передаточную функцию структурной схемы (рис. 110) без учета обратной связи:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) = W_I(p) \cdot W_{II}(p) \cdot W_{IV}(p).$$

Затем вместо оператора подставляют $p = j\omega$ и после разделения $W(j\omega)$ на вещественную $R(\omega)$ и мнимую $jI(\omega)$ части, задавая ω значения от 0 до ∞ , строят на комплексной плоскости годограф АФЧХ: $W(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega)$.

2. Собрать исследуемую схему (рис. 110) на наборном поле (рис. 105) и снять на кальку с экрана индикатора в своем варианте переходную характеристику системы для трех случаев: а) при отсутствии обратной связи; б) при положительной обратной связи — включено звено запаздывания с $T_3 = 0$; в) при отрицательной обратной связи — выходной сигнал подать непосредственно на вход звена I.

3. Подать на вход исследуемой системы гармонические колебания от генератора колебаний и при помощи измерителя АФЧХ снять в своем варианте частотные характеристики схемы для трех случаев, аналогичных пункту 2. Данные опытов внести в протокол.

4. По результатам измерений рассчитать и построить три амплитудно-фазо-частотные характеристики и сравнить экспериментальную АФЧХ разомкнутой системы с расчетной характеристикой в диапазоне изменения частот генератора колебаний. Порядок измерений и расчета АФЧХ указан в описании лабораторной установки и в работах 11 и 12.

Форма протокола, содержание отчета и рекомендуемая литература по данной работе аналогичны указанным в предыдущей работе.

Контрольные вопросы

1. Какую структурную схему называют схемой с последовательным соединением звеньев?
2. По какому выражению определяют передаточную функцию системы с последовательным соединением звеньев?
3. Расскажите о методе расчета передаточной функции системы с наличием положительной или отрицательной обратной связи?
4. Назовите область использования отрицательной и положительной обратных связей?
5. По какой формуле определяют передаточную функцию системы с наличием обратной связи?
6. Чему равен коэффициент усиления при последовательном соединении звеньев?

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В. И., Вавилов А. А., Фатеев А. В. Сборник примеров и задач по линейной теории автоматического регулирования. М., Госэнергоиздат, 1959.
2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М., «Наука», 1972.
3. Бородин И. Ф. Основы автоматики. М., «Колос», 1970.
4. Василенко П. М., Василенко И. И. Автоматизация процессов сельскохозяйственного производства. М., «Колос», 1972.
5. Васильев Д. В., Чуич В. Г. Системы автоматического управления (примеры расчета). М., «Высшая школа», 1967.
6. Власов Н. С. Методика экономической оценки сельскохозяйственной техники. М., «Колос», 1968.
7. Грейнер Г. Р. и др. Проектирование бесконтактных логических схем автоматического управления. М., «Энергия», 1969.
8. Егоров К. В. Основы теории автоматического регулирования. М., «Энергия», 1967.
9. Задачник по теории автоматического управления. Под ред. Шаталова А. С. М., «Энергия», 1971.
10. Иванов В. А., Чемоданов Б. К., Медведев В. С. Математические основы теории автоматического регулирования. М., «Высшая школа», 1971.
11. Краусп В. Р. Автоматика на зернопунктах колхозов и совхозов. М., Россельхозиздат, 1967.
12. Крутов В. И. Сборник задач по теории автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания. М., «Машиностроение», 1972.
13. Методика определения экономической эффективности механизации животноводства. М., ОВИ ВИАЭСХ, 1969.
14. Методика определения экономической эффективности новых сельскохозяйственных машин. М., ОНТИ ВИСХОМ, 1969.
15. Расчет измерительных и усилительных элементов автоматических систем (справочное пособие). Под ред. Чумакова Н. М. К., «Техника», 1971.
16. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления. Под ред. Бесекерского В. А., М., «Наука», 1969.
17. Славин Р. М. Автоматизация производственных процессов животноводческих ферм. М., «Машиностроение», 1965.
18. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М., «Высшая школа», 1970.
19. Удалов Н. П. Полупроводниковые датчики. М., «Энергия», 1965.
20. Хлыпало Е. И. Нелинейные системы автоматического регулирования. Расчет и проектирование. М., «Энергия», 1967.
21. Шеповалов В. Д. Автоматизация уборочных процессов. М., «Колос», 1969.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Выбор и расчет средств автоматики	3
§ 1. Краткие сведения по выбору средств автоматики	3
§ 2. Примеры расчета статических характеристик и параметров датчиков	4
§ 3. Примеры анализа и синтеза релейно-контактных схем	21
§ 4. Примеры перевода релейно-контактных схем на бесконтактные схемы с логическими элементами	27
Глава II. Принципиальные, функциональные и структурные схемы автоматических систем управления	33
§ 1. Основные сведения по составлению схем автоматики	33
§ 2. Функциональные и структурные схемы автоматики	35
§ 3. Примеры составления функциональных схем сельскохозяйственной автоматики	37
Глава III. Составление уравнений и определение передаточных функций и частотных характеристик звеньев и автоматических систем управления	51
§ 1. Методика составления операторных уравнений и определение передаточных функций и частотных характеристик	51
§ 2. Примеры составления структурных схем сельскохозяйственной автоматики и определения их передаточных функций в общем виде	54
§ 3. Примеры определения дифференциальных уравнений и передаточных функций звеньев АСУ	59
§ 4. Примеры определения и построения амплитудных, фазовых частотных, логарифмических и амплитудно-фазо-частотных характеристик и их годографов	82
Глава IV. Исследование устойчивости линейных автоматических систем управления	86
§ 1. Краткие сведения об исследовании устойчивости автоматических систем управления	86
§ 2. Исследование АСУ по алгебраическим критериям устойчивости	91
§ 3. Исследование АСУ по частотным критериям устойчивости . .	95
Глава V. Исследование качества работы линейных АСУ	102
§ 1. Показатели качества работы АСУ и основные способы построения переходных процессов	102
§ 2. Примеры расчета показателей качества работы АСУ	108
Глава VI. Расчет нелинейных автоматических систем управления	121

§ 1. Особенности нелинейных систем и методы их расчета . . .	121
§ 2. Примеры расчета нелинейных АСУ	128
Глава VII. Моделирование автоматических систем управления	143
§ 1. Общие сведения о математическом моделировании на аналоговых машинах	143
§ 2. Примеры моделирования линейных АСУ	147
§ 3. Примеры моделирования нелинейных АСУ	157
Глава VIII. Расчет надежности и технико-экономической эффективности автоматизации производственных процессов сельскохозяйственного производства	161
§ 1. Основные понятия и методика определения надежности автоматических систем управления	161
§ 2. Примеры расчета показателей надежности автоматических систем	166
§ 3. Основные показатели технико-экономической эффективности автоматизации сельского хозяйства	172
§ 4. Примеры определения экономической эффективности автоматизации сельскохозяйственного производства	176
Глава IX. Лабораторные работы по средствам и системам автоматики	184
<i>Работа 1. Датчики давлений и усилий</i>	<i>184</i>
<i>Работа 2. Оптические воспринимающие органы в датчиках автоматики</i>	<i>190</i>
<i>Работа 3. Изучение датчиков температуры — полупроводниковых терморезисторов</i>	<i>198</i>
<i>Работа 4. Магнитные усилители</i>	<i>203</i>
<i>Работа 5. Электромагнитные реле и шаговые искатели</i>	<i>210</i>
<i>Работа 6. Программные устройства</i>	<i>214</i>
<i>Работа 7. Транзисторные логические элементы автоматики</i>	<i>221</i>
<i>Работа 8. Исследование автоматической системы управления напряжением генератора при помощи угольного регулятора</i>	<i>228</i>
<i>Работа 9. Автоматическая система управления частотой вращения двигателя</i>	<i>232</i>
Глава X. Лабораторные работы по изучению динамических характеристик типовых звеньев и АСУ	241
Описание лабораторной установки	241
<i>Работа 10. Изучение переходных процессов в типовых звеньях АСУ</i>	<i>246</i>
<i>Работа 11. Изучение частотных характеристик типовых звеньев АСУ</i>	<i>248</i>
<i>Работа 12. Исследование переходных и частотных характеристик при параллельном соединении звеньев АСУ</i>	<i>249</i>
<i>Работа 13. Исследование переходных и частотных характеристик при последовательном соединении звеньев и наличии обратных связей.</i>	<i>251</i>
<i>Указатель литературы</i>	<i>253</i>

**Иван Федорович Бородин,
Николай Иванович Кирилин**

**«ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ АВТОМАТИКИ
И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ»**

**Редактор И. С. Сороко
Художественный редактор М. Я. Волкова
Технический редактор А. Л. Янчова
Корректор А. В. Пригарина**

Сдано в набор 3/VIII 1973 г. Подписано к печати
28/XI 1973 г. Формат 84×108^{1/32}. Бумага тип.
№ 3. Усл.-печ. л. 13,44. Уч.-изд. л. 14,23. Изд.
№ 326. Тираж 13 000 экз. Заказ № 585.
Цена 64 коп.

**Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Колос», 103716, ГСП,
Москва, К-31, ул. Дзержинского, д. 1/19**

**Набрано в ордена Трудового Красного Знамени
Первой Образцовой типографии имени А. А. Жданова
Союзполиграфпрома при Государственном
комитете Совета Министров СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28**

**Отпечатано с матриц на Белоцерковской книжной
фабрике республиканского производственного объ-
единения «Поліграфкнига» Госкомиздата УССР,
ул. К. Маркса, 4. Зак. 738.**