



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Гидропневмоавтоматика»

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовой работе по курсу
«Теория автоматического управления»
для студентов специальности 1-36 01 07
«Гидропневмосистемы мобильных
и технологических машин»**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 681.58(075.8)
ББК 39.965.2я73
С38

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 26.09.2005 г.)*

Авторы-составители: *В. И. Луковников, А. В. Михневич*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Технология машиностроения»
ГГТУ им. П. О. Сухого *М. П. Кульгейко*

Синтез регуляторов электрогидравлических усилителей : метод. указания к курсовой
С38 работе по курсу «Теория автоматического управления» для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» / авт.-сост.: В. И. Луковников, А. В. Михневич. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 33 с.– Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-557-1.

Включены задания, краткие теоретические и справочные сведения, необходимые для выполнения расчетов, используемых при написании курсовой работы, а также пример синтеза регулятора электрогидравлического усилителя типовой системы автоматического управления.

Для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин».

**УДК 681.58(075.8)
ББК 39.965.2я73**

ISBN 978-985-420-557-1

© Луковников В. И., Михневич А. В.,
составление, 2007

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2007

ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» направлена на углубление и закрепление теоретического материала на примере синтеза регулятора двухкаскадного электрогидравлического усилителя типа «золотник-золотник», представляющего собой автоматическую следящую систему [1]–[4].

Она выполняется в виде расчетно-пояснительной записки объемом 15–20 страниц текста, включая рисунки, схемы, графики и таблицы.

Расчеты и пояснения в записке пишутся на листах белой нелинованной бумаги стандартного размера А4, а графический материал выполняется карандашом на миллиметровке того же размера.

Допускается оформление расчетно-пояснительной записки в компьютерном тексте и графике.

Вычисления производятся в абсолютных единицах системы СИ, условные графические и буквенные обозначения должны соответствовать ГОСТам и ЕСКД [3], [5].

Оформляют записку, начиная с титульного листа-обложки (Прил. 1), затем располагают бланк с заданием на курсовую работу, подписанный студентом, преподавателем и заведующим кафедрой, после чего следуют разделы:

1. Введение.
2. Техническое описание проектируемого электрогидравлического усилителя.
3. Вывод передаточных функций и структурная схема ЭГУ.
4. Анализ технического задания.
5. Синтез электрической схемы регулятора методом желаемых логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЖЛАЧХ).
6. Расчет переходного процесса в синтезированном электрогидравлическом усилителе и анализ полученных результатов.
7. Принципиальная схема синтезированного электрогидравлического усилителя и описание ее принцип действия.
8. Заключение.
9. Литература.
10. Содержание.

1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ ПО ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В результате выполнения курсовой работы студентом должны быть синтезированы не только логарифмические частотные характеристики, но и соответствующая им электрическая схема регулятора двухканального электрогидравлического усилителя типа «золотник-золотник» в соответствии с техническим заданием на проект.

Задание на проект заимствовано и расширено по реальным данным серийного электрогидравлического усилителя ПЭГ-350, выпускаемого ОАО «Сейсмотехника» (г. Гомель).

В соответствии с четырехзначным номером варианта, выданным студенту преподавателем, из таблиц 1.1–1.4 выбираются исходные данные для курсового проекта.

Таблица 1.1

Номинальные технические данные распределительного каскада гидроусилителя с датчиком положения

Номер варианта	Диаметр золотника $d_p \cdot 10^3, \text{ м}$	Перемещение золотника $Y_N \cdot 10^3, \text{ м}$	Плотность рабочей жидкости $\rho, \text{ кг/м}^3$	Коэффициент передачи ДП вместе с ФЧВУ $K_{дп}, \text{ В/м}$	Постоянная времени ДП вместе с ФЧВУ, $T_{дп} \cdot 10^3, \text{ с}$
1	40	1,5	820	1000	1,0
2	38	1,2	950	900	0,8
3	36	1,0	850	800	0,6
4	34	0,8	750	700	0,4
5	32	0,6	650	600	0,2
6	30	0,7	600	500	0,1
7	27	0,9	700	400	0,3
8	25	1,1	800	550	0,5
9	22	1,3	900	650	0,7
0	20	1,4	1000	750	0,9

Таблица 1.2

**Номинальные технические данные
управляющего каскада гидроусилителя**

Номер варианта	Диаметр золотника $d_y \cdot 10^3, \text{ м}$	Давление гидропитания $P_N \cdot 10^{-6}, \text{ Н/м}^2$	Коэффициент рабочей щели $\Psi_y, \text{ о. е.}$	Коэффициент расхода $\mu_y, \text{ о. е.}$	Коэффициент вязкого трения $f, \text{ Нс/м}$	Приведенная масса якоря, тяги и золотника $m_{3y}, \text{ кг}$
1	10,0	40	0,665	0,57	8,0	0,025
2	9,0	30	0,660	0,55	7,8	0,030
3	8,0	20	0,655	0,52	7,6	0,035
4	8,5	10	0,670	0,50	7,4	0,040
5	9,5	15	0,675	0,62	7,2	0,045
6	10,5	25	0,650	0,65	7,0	0,050
7	11,0	35	0,652	0,67	8,2	0,027
8	11,5	45	0,662	0,59	8,4	0,032
9	7,5	22	0,672	0,56	8,6	0,037
0	6,0	27	0,667	0,6	8,8	0,042

Таблица 1.3

Номинальные технические данные электромеханического преобразователя с усилителем мощности

Номер варианта	Магнитный поток постоянного магнита $\Phi_{\text{п}} \cdot 10^4, \text{ Вб}$	Площадь полюса магнитопровода $S_{\text{п}} \cdot 10^4, \text{ м}^2$	Величина воздушного зазора $\delta_0 \cdot 10^3, \text{ м}$	Число витков обмотки управления $W_y, \text{ о. е.}$	Активное сопротивление обмотки управления $R_y, \text{ Ом}$	Жесткость торсиона $S_{\text{тор}} \cdot 10^{-5}, \text{ Н/м}$	Коэффициент передачи по напряжению УМ $K_{\text{ум}}, \text{ о. е.}$
1	4,5	4,0	0,9	200	15	7,0	0,5
2	4,0	4,5	0,95	175	12	6,5	0,6
3	5,5	5,0	1,0	150	10	6,0	0,7
4	5,0	5,5	1,05	125	8,0	5,5	0,8
5	4,5	6,5	1,10	100	9,0	5,0	0,9
6	4,0	6,0	1,15	250	16	4,5	1,0
7	3,0	5,2	1,08	220	14	4,0	0,95
8	3,5	4,2	0,98	180	13	3,5	0,85
9	2,2	3,0	1,12	160	11	5,0	0,75
0	2,0	3,5	1,17	140	17	6,0	0,65

Таблица 1.4

**Требуемые показатели качества регулирования
проектируемого электрогидравлического
следающего усилителя типа «ЗОЛОТНИК-ЗОЛОТНИК»**

Номер варианта	Номинальное напряжение задания $U_{ВХ.Н, В}$	Допустимая ошибка $\delta, \%$	Показатель колебательности $M, \text{о. е.}$	Быстродействие $t_{РЕГ} \cdot 10^3, \text{с}$	Частота вибрационного режима $f_{КОЛ}, \text{Гц}$
1	10,0	0,2	1,6	30	20
2	9,5	0,3	1,55	25	19
3	9,0	0,4	1,5	20	18
4	8,5	0,5	1,45	15	17
5	8,0	0,6	1,4	10	16
6	7,5	0,7	1,35	5,0	15
7	7,0	0,8	1,3	7,5	14
8	6,5	0,9	1,25	12,5	13
9	6,0	1,0	1,2	17,5	12
0	5,5	0,75	1,15	22,5	10

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТИПОВОМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ УСИЛИТЕЛЕ ТИПА «ЗОЛОТНИК-ЗОЛОТНИК»

2.1. Принцип действия электрогидравлического усилителя

Электрогидравлический усилитель представляет собой автоматическую следящую систему, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.1, а блок-схема на рис. 2.2. Нагрузкой его является гидродвигатель (ГД), шток которого приводит в движение рабочий орган машины.

Система построена по принципу регулирования по отклонению (принцип Ползунова-Уатта).

Он реализуется за счет того, что в устройстве сравнения (УС), выполненном на операционном усилителе А1 с резисторами $R1, R2, R3$, осуществляется вычитание (сравнение) из входного электрического сигнала $U_{ВХ}$, задающего требуемую величину перемещения Y золотника распределительного каскада (РК), электрического сигнала обратной связи $U_{ОС}$, соответствующего реальному перемещению золотника, измеренному датчиком положения (ДП) и преобразованному фазочувствительным выпрямителем-усилителем (ФЧВУ).

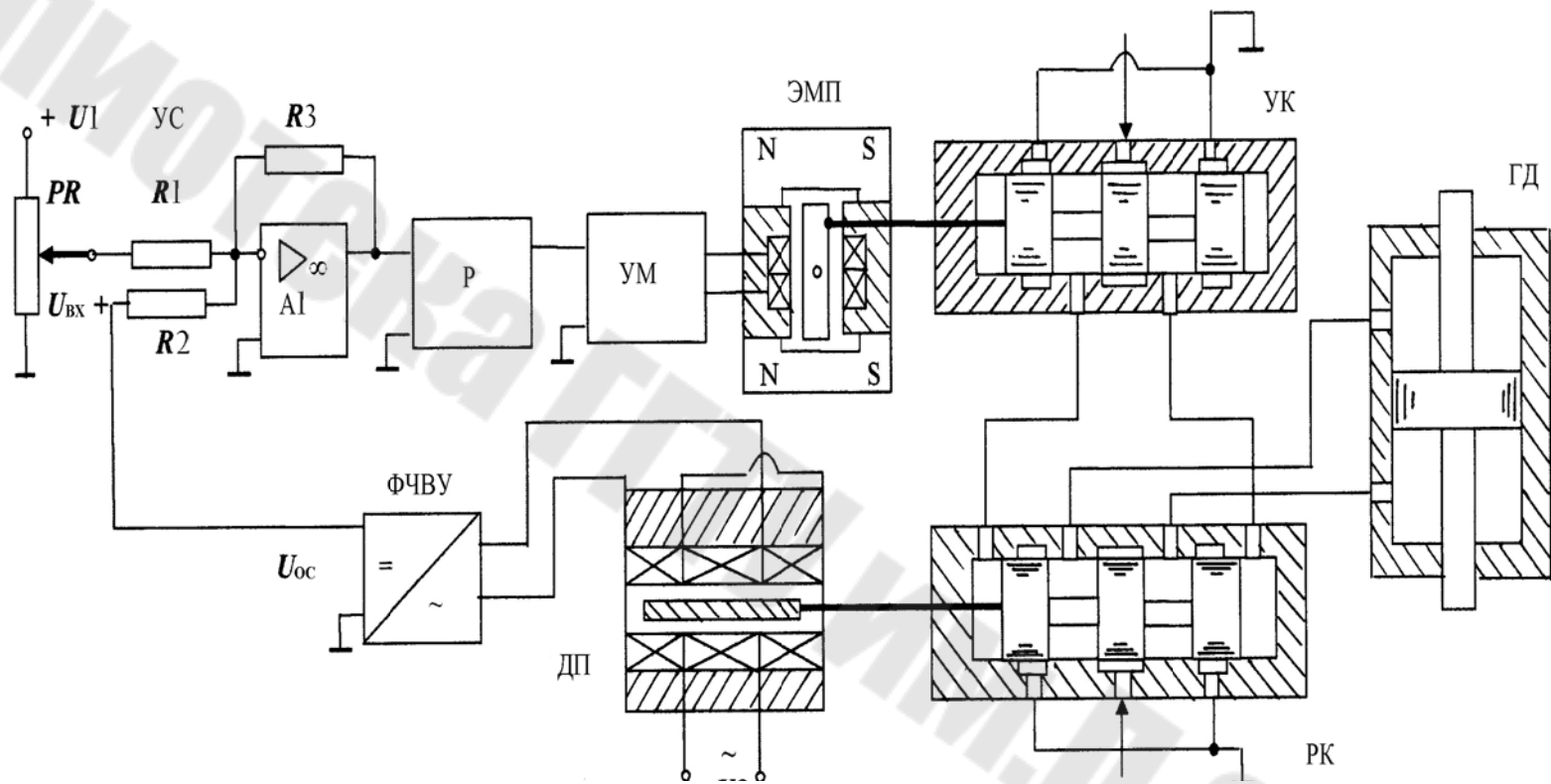


Рис. 2.1. Принципиальная схема электрогидравлического усилителя:
 УС – устройство сравнения, Р – регулятор, УМ – усилитель мощности;
 ЭМП – электромеханический преобразователь, УК – управляющий каскад;
 РК – распределительный каскад, ГД – гидродвигатель, ДП – датчик положения;
 ФЧВУ – фазочувствительный выпрямитель-усилитель

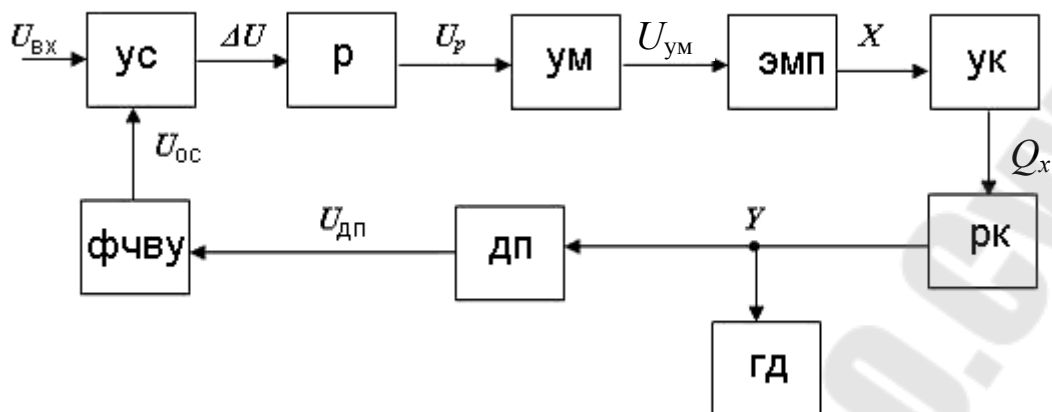


Рис. 2.2. Блок-схема электрогидравлического усилителя

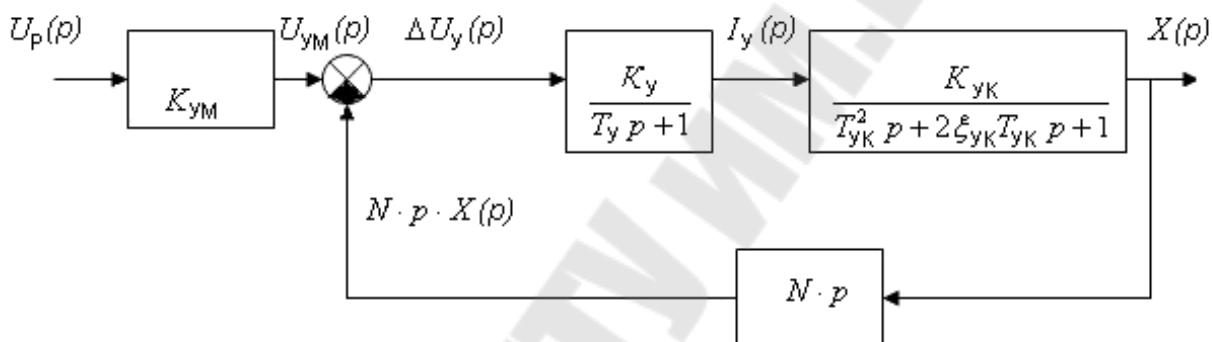


Рис. 2.3. Структурная схема управляющего каскада гидроусилителя вместе с электромеханическим преобразователем и его усилителем мощности

При наличии рассогласования (отклонения) $\Delta U = U_{ВХ} - U_{ОС} \neq 0$ электрический сигнал ΔU через регулятор (Р) и усилитель мощности (УМ) воздействует на якорь электромеханического преобразователя (ЭМП), заставляя его поворачиваться и перемещать золотник управляющего каскада (УК) на величину X , а значит и золотник РК на величину Y до тех пор, пока отклонение ΔU не станет нулевым.

В этом положении следящая система переходит в установившийся режим работы, стабилизируя положение золотника РК при возникновении возмущающих воздействий.

Более детально конструкции и технические характеристики ЭМП, УК, РК и ДП описаны в работах [2]–[4].

Далее будем рассматривать узлы электрогидравлического усилителя как элементы системы автоматического управления, с целью получения их передаточных функций и расчетных соотношений для параметров этих функций.

2.2. Распределительный гидравлический каскад с трансформаторным датчиком положения

Выходной величиной РК является перемещение его золотника Y , определяющее расход рабочей жидкости Q_Y в гидродвигателе ГД, а значит и скорость перемещения его поршня.

Входной величиной РК является перемещение X золотника управляющего каскада УК, определяющее расход рабочей жидкости Q_X в распределительном каскаде РК, а значит и скорость перемещения его золотника.

Значит, РК представляет собой интегрирующее звено и имеет передаточную функцию

$$W_{\text{РК}}(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{T_{\text{РК}} \cdot p}, \quad (2.1)$$

где p – оператор Лапласа.

Постоянная времени может быть рассчитана по соотношению

$$T_{\text{РК}} = \frac{d_{\text{Р}}^2}{4\mu_{\text{У}}\psi_{\text{У}}d_{\text{У}}} \sqrt{\frac{\rho}{P_{\text{Н}}}}, \quad (2.2)$$

где $d_{\text{Р}}, d_{\text{У}}$ – диаметры золотников РК и УК, м²; $\mu_{\text{У}}, \psi_{\text{У}}$ – коэффициенты расхода и рабочей щели УК, о. е.; ρ – плотность рабочей жидкости, кг · м⁻³; $P_{\text{Н}}$ – номинальное давление гидропитания, Н · м⁻².

Датчик обратной связи по положению, контролирующий перемещение Y золотника РУ, имеет в качестве входного сигнала перемещение Y ферромагнитного якоря, жестко связанного с золотником РК.

Это датчик трансформаторного типа, поэтому его выходное электрическое напряжение будет переменным.

Так как устройство сравнения УС, выполненное на операционном усилителе, работает на постоянном токе, то выходное переменное напряжение ДП преобразуется в постоянное напряжение обратной связи $U_{\text{ОС}}$ с помощью фазочувствительного выпрямителя-усилителя ФЧВУ.

В целом ДП с ФЧВУ представляет собой апериодическое звено первого порядка и имеет передаточную функцию

$$W_{\text{ДП}}(p) = \frac{U_{\text{ОС}}(p)}{Y(p)} = \frac{K_{\text{ДП}}}{T_{\text{ДП}}p + 1}, \quad (2.3)$$

где общие коэффициент передачи $K_{\text{ДП}}$ и постоянную времени $T_{\text{ДП}}$ сообщают в задании на проект.

2.3. Управляющий гидравлический каскад с электромеханическим преобразователем и его усилителем мощности

В соответствии с рис. 2.1 и 2.2 в этой части электрогидравлического усилителя под воздействием напряжения U_p с выхода регулятора Р, усиленного в электрическом усилителе мощности УМ, появляется движение X золотника УК.

Их аналитическую связь можно установить по законам Ома и Ньютона, составив уравнения электрического и механического равновесия,

$$\begin{cases} K_{\text{УМ}} \cdot U_p = i_y R_y + L_y \frac{di_y}{dt} + N \frac{dx}{dt}, \\ m_{3y} \frac{d^2 x}{dt^2} = A \cdot i_y + B \cdot x - f \cdot \frac{dx}{dt} - (C_{\text{ТОР}} - C_{\text{ГД}}) \cdot x, \end{cases} \quad (2.4)$$

где R_y, L_y, i_y – активное сопротивление, индуктивность и электрический ток обмотки управления ЭМП; N – коэффициент скоростной ЭДС; m_{3y} – приведенная к оси золотника масса якоря, тяги и золотника УК; A – коэффициент электромеханической связи; B – магнитная жесткость; f – коэффициент вязкого трения; $C_{\text{ТОР}}$ – жесткость торсионов ЭМП; $C_{\text{ГД}}$ – гидродинамическая жесткость; $K_{\text{УМ}}$ – коэффициент передачи УМ по напряжению.

С целью получения структурной схемы и передаточных функций УК с ЭМП и УМ запишем систему уравнений (2.4) в операторном виде:

$$\begin{cases} K_{\text{УМ}} \cdot U_p(p) = R_y \cdot I_y(p) + L_y \cdot p \cdot I_y(p) + N \cdot p \cdot X(p); \\ m_{3y} \cdot p^2 \cdot X(p) = A \cdot I_y(p) + B \cdot X(p) - f \cdot p \cdot X(p) - (C_{\text{ТОР}} - C_{\text{ГД}}) \cdot X(p). \end{cases}$$

Приведем эту систему операторных уравнений к виду, удобному для построения структурной схемы:

$$\begin{cases} I_y(p) = \frac{1}{R_y + L_y \cdot p} [K_{\text{УМ}} \cdot U_p(p) - N \cdot p \cdot X(p)]; \\ X(p) = \frac{A}{m_{3y} \cdot p^2 + f \cdot p + (C_{\text{ТОР}} + C_{\text{ГД}} - B)} \cdot I_y(p). \end{cases} \quad (2.5)$$

Структурная схема представлена на рис. 2.3, где обозначено:
 $K_y = 1/R_y$ – коэффициент передачи обмотки управления ЭМП, Ом⁻¹;
 R_y – активное сопротивление обмотки управления, Ом;
 $T_y = L_y / R_y$ – постоянная времени обмотки управления ЭМП, с;

$L_y = \mu_0 \cdot S_{\Pi} \cdot \frac{W_y^2}{\delta_0}$ – индуктивность обмотки управления, Гн;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость воздуха, Гн · м⁻¹;

S_{Π} – площадь полюса магнитопровода, м²;

δ_0 – величина воздушного зазора, м;

W_y – число витков обмотки управления, о. е.;

$K_{УК} = \frac{A}{C_{ТОР} + C_{ГД} - B}$ – коэффициент передачи по току управляющего каскада гидроусилителя, м · А⁻¹;

ляющего каскада гидроусилителя, м · А⁻¹;

$T_{УК} = \sqrt{\frac{m_{3У}}{C_{ТОР} + C_{ГД} - B}}$ – постоянная времени УК, с;

$\xi = \frac{f}{2\sqrt{m_{3У}(C_{ТОР} + C_{ГД} - B)}}$ – коэффициент затухания УК, о. е.;

$A = \Phi_{\Pi} \cdot \frac{W_y}{\delta_0}$ – коэффициент электромеханической связи, Вб · м⁻¹;

Φ_{Π} – магнитный поток постоянного магнита, Вб;

$m_{3У}$ – приведенная к оси золотника УК суммарная масса якоря ЭМП, тяги и золотника, кг;

$C_{ТОР}$ – жесткость торсиона, Н · м⁻¹;

$C_{ГД} = 0,543 \cdot d_y \cdot P_N$ – гидродинамическая жесткость, Н · м⁻¹;

$B = \frac{\Phi_{\Pi}^2}{\mu_0 \cdot S_{\Pi} \cdot \delta_0}$ – магнитная жесткость, Н · м⁻¹.

По правилам структурных преобразований (Прил. 2) схемы на рис. 2.3 получим передаточную функцию УК с ЭМП и УМ в виде:

$$W_{\text{ЭМП.УК}}(p) = \frac{X(p)}{U_P(p)} = \frac{K_y \cdot K_{УК} \cdot K_{УМ}}{(T_y p + 1)(T_{УК}^2 p^2 + 2\xi_{УК} T_{УК} p + 1) + N \cdot K_y \cdot K_{УК} \cdot p} = \frac{K_y \cdot K_{УК} \cdot K_{УМ}}{T_y T_{УК}^2 p^3 + (T_{УК}^2 + 2\xi_{УК} T_{УК} T_y) p^2 + (T_y + 2\xi_{УК} T_{УК} + N \cdot K_{УК} \cdot K_y) p + 1}. \quad (2.6)$$

Используя разложение знаменателя на простые множители, представим полученную передаточную функцию как

$$W_{\text{ЭМП.УК}}(p) = \frac{K_{\text{ЭМП.УК}}}{(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)}, \quad (2.7)$$

где $K_{\text{ЭМП.УК}} = K_{\text{У}} \cdot K_{\text{УК}} \cdot K_{\text{УМ}}$ общий коэффициент передачи УК с ЭМП, $\text{м} \cdot \text{В}^{-1}$; T_1, T_2, ξ_2 – постоянные времени и коэффициент затухания, полученные в результате преобразования знаменателя выражения (2.6).

Если $\xi < 1$, то звено 2-го порядка в (2.7) является колебательным, и в дальнейшем его логарифмические амплитудные и фазочастотные характеристики следует строить по справочным данным [1].

Если же $\xi > 1$, то звено является апериодическим 2-го порядка, и его надо представить в виде двух апериодических звеньев первого порядка

$$\frac{1}{T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1} = \frac{1}{T_3 p + 1} \cdot \frac{1}{T_4 p + 1}, \quad (2.8)$$

где постоянные времени

$$T_{3,4} = T_2 \left(\xi_2 \pm \sqrt{\xi_2^2 - 1} \right).$$

2.4. Устройство сравнения и регулятор

Регулятор Р преобразует сигнал отклонения ΔU во входное напряжение U_p усилителя мощности УМ таким образом, чтобы выполнялись показатели качества регулирования, требуемые по техническому заданию на проект.

Его передаточная функция и соответствующая электрическая схема на операционных усилителях должны быть определены в процессе выполнения проекта.

Принцип регулирования по отклонению реализуется устройством сравнения электрического входного сигнала (задание) $U_{\text{ВХ}}$ электрогидравлического усилителя с электрическим сигналом обратной связи $U_{\text{ОС}}$, контролирующим реальное перемещение (выполнение задания) Y золотника РК.

Сравнение осуществляется путем вычитания указанных сигналов, с целью получения сигнала отклонения (рассогласования).

На рис. 2.1 схема УС выполнена на операционном усилителе А1 с резисторами $R1, R2, R3$.

Она описывается операторным уравнением

$$\Delta U(p) = K_{УС.У} \cdot U_{ВХ}(p) - K_{УС.ОС} \cdot U_{ОС}(p). \quad (2.9)$$

Коэффициенты передачи устройства сравнения найдем из условия равенства нулю сигнала рассогласования ΔU в установившемся номинальном режиме.

Тогда, согласно (2.9):

$$K_{УС.У} \cdot U_{ВХ.N} - K_{УС.ОС} \cdot K_{ДП} \cdot Y_N = 0.$$

Отсюда получим:

$$K_{УС.ОС} = \frac{U_{ВХ.N}}{K_{ДП} \cdot Y_N} \cdot K_{УС.У}. \quad (2.10)$$

3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Обобщая изложенное в разделе 2, можно в соответствии с блок-схемой ЭГУ (рис. 2.2) построить его структурную схему в виде, изображенном на рис. 3.1.

Для синтеза регулятора методом желаемых логарифмических амплитудно-частотных характеристик потребуется передаточная функция нескорректированного электрогидравлического усилителя (без учета регулятора) с разомкнутой обратной связью.

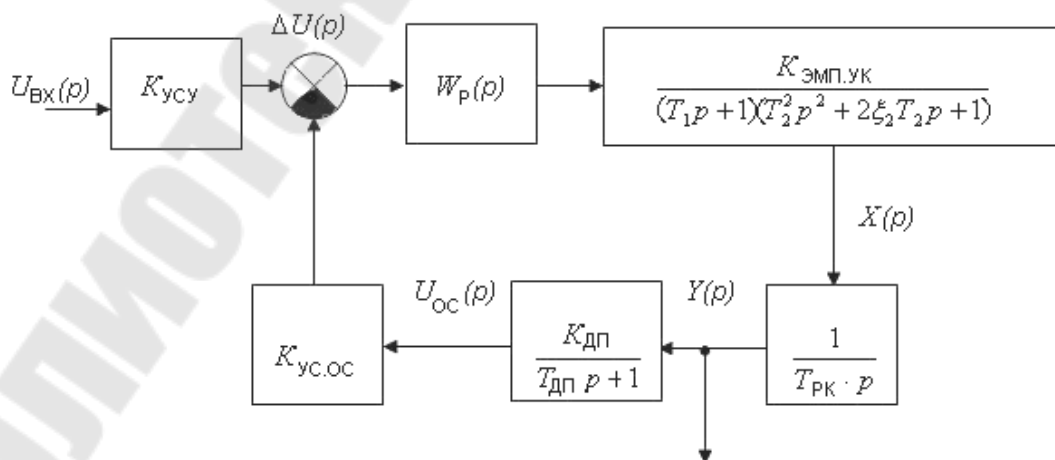


Рис. 3.1. Структурная схема электрогидравлического усилителя

С помощью правил структурных преобразований (Прил. 1) такая передаточная функция может быть получена по схеме на рис. 3.1 в следующем виде:

$$W_{\text{НЕСК}}(p) = \frac{K}{T_{\text{РК}} p (T_{\text{ДП}} p + 1) (T_1 p + 1) (T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)}, \quad (3.1)$$

где $K = K_{\text{УС.У}} \cdot K_{\text{УС.ОС}} \cdot K_{\text{ЭМП.УК}} \cdot K_{\text{ДП}}$ – коэффициент передачи разомкнутой системы автоматического управления.

Для расчета переходных процессов, с целью проверки правильности синтеза регулятора, потребуется передаточная функция электрогидравлического усилителя с учетом регулятора и замкнутой обратной связью.

С помощью правил структурных и последующих аналитических преобразований эта передаточная функция может быть найдена по схеме на рис. 3.1 в следующем виде:

$$\Phi_{\text{ЭГУ}}(p) = \frac{Y(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{K_{\text{ОС}}^{-1} (T_{\text{ДП}} p + 1)}{T p (T_{\text{ДП}} p + 1) (T_1 p + 1) \cdot W_{\text{Р}}^{-1}(p) (T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1) + 1}, \quad (3.2)$$

где $T = \frac{T_{\text{РК}}}{K_{\text{УС.ОС}} \cdot K_{\text{ДП}} \cdot K_{\text{ЭМП.УК}}}$ – обобщенная постоянная времени интегрирующего звена; $K_{\text{ОС}} = K_{\text{УС.ОС}} \cdot K_{\text{ДП}}$ – коэффициент передачи обратной связи САУ.

4. ПРИМЕР СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Рассмотрим пример синтеза регулятора по следующему техническому заданию:

1) *распределительный каскад с датчиком положения:*

$$d_{\text{Р}} = 0,03 \text{ м}, \quad y_{\text{Н}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \rho = 850 \text{ кг/м}^3,$$

$$K_{\text{ДП}} = 100 \text{ В/м}, \quad T_{\text{ДП}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

2) *управляющий каскад гидроусилителя:*

$$d_{\text{У}} = 0,01 \text{ м}, \quad p_{\text{Н}} = 20 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2, \quad \psi_{\text{У}} = 0,667 = 0,667 \text{ о. е.},$$

$$\mu_{\text{У}} = 0,6 \text{ о. е.}, \quad f = 8,0 \text{ Нс/м}, \quad m_{\text{ЗУ}} = 0,05 \text{ кг};$$

3) *электромеханический преобразователь с усилителем мощности:*

$$\Phi_{II} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}, S_G = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \delta_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$W_y = 150, R_y = 10 \text{ Ом}, C_{TOP} = 5 \cdot 10^5 \text{ Н/м},$$

$$K_{yM} = 1,0 \text{ о. е.};$$

4) *показатели качества регулирования:*

$$U_{BX.N} = 7,5 \text{ В}, \delta = 1 \%, M = 1,5 \text{ о. е.}, t_{PEГ} = 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}, f_{КОЛ} = 1,0 \text{ Гц}.$$

4.1. Анализ технического задания

Анализ технического задания приводит к двум основным выводам. Регулятор должен быть синтезирован так, чтобы в установившемся режиме (статика) заданию $U_{BX.N} = 7,5 \text{ В}$ соответствовало перемещению золотника распределительного каскада $Y_N = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, с ошибкой не более $\delta = 1 \%$, а в переходном режиме (динамика) показатель колебательности должен быть не более $M = 1,5$, а быстродействие не хуже $t_{PEГ} = 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Это в дальнейшем будет базой для анализа полученных результатов.

Кроме того, выявляется, что через исходные данные сначала требуется найти параметры передаточных функций, чтобы затем перейти к синтезу регулятора.

В соответствии с результатами, полученными в разделе 2, последовательно рассчитаем постоянную времени распределительного каскада по соотношению (2.2):

$$T_{PK} = \frac{d_p^2}{4\mu_y \cdot \psi_y \cdot d_y} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{P_N}} = \frac{0,03^2}{4 \cdot 0,6 \cdot 0,667 \cdot 0,01} \cdot \sqrt{\frac{850}{20 \cdot 10^6}} = 3,67 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

– коэффициент передачи обмотки управления ЭМП

$$K_y = 1/R_y = 1/10 = 0,1 \text{ Ом}^{-1};$$

– постоянную времени обмотки управления ЭМП

$$T_y = \frac{L_y}{R_y} = \frac{0,01}{10} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

где индуктивность

$$L_y = \mu_0 \cdot S_{\Pi} \cdot \frac{W_y^2}{\delta_0} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 150^2}{1 \cdot 10^{-3}} = 0,01 \text{ Гн.}$$

Далее найдем коэффициент передачи по току управляющего каскада

$$K_{\text{ук}} = \frac{A}{C_{\text{ТОР}} + C_{\text{ГД}} - B} = \frac{60}{2,906 \cdot 10^5} = 2,06 \cdot 10^{-4} \text{ м/А,}$$

где коэффициент электромеханической связи

$$A = \Phi_{\Pi} \cdot W_y / \delta_0 = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 150 / 1 \cdot 10^{-3} = 60 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1},$$

а суммарная жесткость

$$\begin{aligned} C &= C_{\text{ТОР}} + C_{\text{ГД}} - B = C_{\text{ТОР}} + 0,543 \cdot d_y \cdot P_N - \frac{\Phi_{\Pi}^2}{\mu_0 \cdot S_{\Pi} \cdot \delta_0} = \\ &= 5 \cdot 10^{-5} + 0,543 \cdot 0,01 \cdot 20 \cdot 10^6 - \frac{(4 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3}} = 2,906 \cdot 10^5 \text{ Н/м.} \end{aligned}$$

Постоянная времени управляющего каскада

$$T_{\text{ук}} = \sqrt{\frac{m_{3y}}{C}} = \sqrt{\frac{0,05}{2,906 \cdot 10^5}} = 0,415 \cdot 10^{-3} \text{ с,}$$

а коэффициент затухания

$$\xi_{\text{ук}} = \frac{f}{2\sqrt{m_{3y} \cdot C}} = \frac{8}{2\sqrt{0,05 \cdot 2,906 \cdot 10^5}} = 0,0332 \text{ о. е.}$$

Коэффициент скоростной ЭДС

$$N = A = 60 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}.$$

Коэффициенты передачи устройства сравнения найдем по (2.10).

Зададим $K_{\text{ус.у}} = 1$, тогда

$$K_{\text{ус.ос}} = \frac{U_{\text{вх.н}} \cdot K_{\text{ус.у}}}{K_{\text{дп}} \cdot y_N} = \frac{7,5 \cdot 1}{100 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ о. е.}$$

4.2. Расчет логарифмических амплитудно-частотных характеристик регулятора

Следуя методу синтеза регулятора с помощью ЖЛАХ, найдем передаточную функцию разомкнутой нескорректированной САУ, для чего сначала получим передаточную функцию УК с ЭМП и УМ по выражению (2.6):

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ЭМП.УК}}(p) &= \frac{K_Y \cdot K_{\text{УК}} \cdot K_{\text{УМ}}}{T_Y \cdot T_{\text{УК}}^2 \cdot p^3 + (T_{\text{УК}}^2 + 2 \cdot \xi_{\text{УК}} \cdot T_{\text{УК}} \cdot T_Y) p^2 +} \dots \rightarrow \\
 &\rightarrow \dots \frac{1}{+(T_Y + 2 \cdot \xi_{\text{УК}} \cdot T_{\text{УК}} + N \cdot K_Y \cdot K_{\text{УК}}) p + 1} = \\
 &= \frac{0,1 \cdot 2,06 \cdot 10^{-4} \cdot 1}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,415^2 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + (0,415^2 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 0,0332 \cdot 0,415 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3}) p^2 +} \dots \rightarrow \\
 &\rightarrow \dots \frac{1}{+(1 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,0332 \cdot 0,415 \cdot 10^{-3} + 2,06 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 60) p + 1} = \\
 &= \frac{2,06 \cdot 10^{-5}}{1,72 \cdot 10^{-10} \cdot p^3 + 1,996 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 + 2,512 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}.
 \end{aligned}$$

Разложим знаменатель на простые сомножители и запишем передаточную функцию в виде:

$$W_{\text{ЭМП.УК}}(p) = \frac{2,06 \cdot 10^{-5}}{(6,18 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1) \left[(5,27 \cdot 10^{-3})^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,237 \cdot (5,27 \cdot 10^{-3}) \cdot p + 1 \right]},$$

где в соответствии с (2.7):

$$K_{\text{ЭМП.УК}} = 2,06 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{В}^{-1}, \quad T_1 = 6,18 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

$$T_2 = 5,27 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \quad \xi_2 = 0,237 \text{ о. е.}$$

Теперь по (3.1) можно записать передаточную функцию:

$$W_{\text{НЕСК}}(p) = \frac{K_{\text{УС.У}} \cdot K_{\text{УС.ОС}} \cdot K_{\text{ЭМП.УК}} \cdot K_{\text{ДП}}}{T_{\text{РК}} \cdot p (T_{\text{ДП}} \cdot p + 1) (T_1 \cdot p + 1) (T_2^2 p^2 + 2 \xi_2 T_2 p + 1)} =$$

$$= \frac{1 \cdot 50 \cdot 2,06 \cdot 10^{-5} \cdot 100}{3,67 \cdot 10^{-4} \cdot p(10^{-4} \cdot p + 1)(6,18 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1)(0,00527^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,237 \cdot 0,00527 \cdot p + 1)} =$$

$$= \frac{280,7}{p(10^{-4} \cdot p + 1)(6,18 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1)(0,00527^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,237 \cdot 0,00527 \cdot p + 1)}$$

4.2.1. Построение ЛАЧХ нескорректированной САУ

Поскольку далее будем строить асимптотические ЛАЧХ, используя метод типовых динамических звеньев, то для ЛАЧХ нескорректированной САУ по полученной передаточной функции $W_{\text{НЕСК}}(p)$ определим логарифмический коэффициент передачи

$$20 \lg K = 20 \lg 280,7 = 49 \text{ дБ}$$

и частоты излома в логарифмическом масштабе

$$\lg \omega_1 = \lg \left(\frac{1}{0,00527} \right) = 2,278 \text{ дек,}$$

$$\lg \omega_2 = \lg \left(\frac{1}{10^{-4}} \right) = 4 \text{ дек,}$$

$$\lg \omega_3 = \lg \left(\frac{1}{6,18 \cdot 10^{-6}} \right) = 5,21 \text{ дек.}$$

Так как первое звено является колебательным с коэффициентом затухания $\xi_2 = 0,237 < 0,35$, то построение его ЛАЧХ в асимптотическом варианте дает большую ошибку.

Поэтому необходимо воспользоваться справочными данными [1], с учетом которых строится ЛАЧХ нескорректированной САУ, обозначаемая $L_{\text{НЕСК}}(\omega)$ (рис. 4.1).

4.2.2. Построение желаемой ЛАЧХ системы и ЛАЧХ регулятора

В соответствии с методом и техническим заданием определим желаемую частоту среза $\omega_{\text{СР}}$.

Для этого воспользуемся формулами связи показателей качества типовых САУ.

$$M = 1 / \sin \psi_0, \quad \delta\% = 40(M - 1),$$

$$\omega_{\text{СР}} t_{\text{РЕГ}} = 5,0 + 0,18\delta\% - 0,002(\delta\%)^2.$$

Для заданного $M = 1,5$ найдем:

$$\omega_{\text{CP}} \cdot t_{\text{РЕГ}} = 7,6.$$

Значит, $\omega_{\text{CP}} = 7,6 / t_{\text{РЕГ}} = 7,6 / 8,0 \cdot 10^{-3} = 950 \text{ с}^{-1}$.

Выберем, с целью удобства проектирования регулятора, $\omega_{\text{CP}} = 1000 \text{ с}^{-1}$, что даст большее быстроедействие.

В логарифмическом масштабе

$$\lg \omega_{\text{CP}} = \lg 1000 = 3 \text{ дек.}$$

Найдем границы среднечастотной части ЖЛАХ, наклон которой должен быть -20 дБ/дек :

$$\omega_2 = \omega_{\text{CP}} \cdot \frac{M-1}{M} = 1000 \cdot \frac{1,5-1}{1,5} = 333,3 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_3 = \omega_{\text{CP}} \cdot \frac{M+1}{M} = 1000 \cdot \frac{1,5+1}{1,5} = 1666,6 \text{ с}^{-1}.$$

В логарифмическом масштабе

$$\lg \omega_2 = \lg 333,3 = 2,52 \text{ дек,}$$

$$\lg \omega_3 = \lg 1666,6 = 3,22 \text{ дек.}$$

Определим ординаты контрольных точек, выше которых должна пройти низкочастотная часть ЖЛАХ, с целью обеспечения заданной точности.

По $W_{\text{НЕСК}}(p)$ и $L_{\text{НЕСК}}(\omega)$ видно, что рассматриваемая САУ имеет астатизм первого порядка ($\nu = 1$). Это обеспечивает нулевую статическую ошибку, то есть САУ будет обрабатывать скачкообразный входной сигнал $u_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot 1(t)$ $u_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ.N}} \cdot 1(t)$ точно.

В вибрационном режиме, когда входной сигнал синусоидальный $u_{\text{ВХ}} = u_{\text{ВХ.N}} \cdot \sin(2\pi f_{\text{КОЛ}} t)$, ординату контрольной точки найдем по известному выражению:

$$L_S = 20 \cdot \lg \left[\frac{U_{\text{ВХ.N}} \%}{\delta \%} \right] = 20 \cdot \lg \left[\frac{100}{1} \right] = 40 \text{ дБ.}$$

Эта контрольная точка строится на заданной частоте колебаний по T_3 :

$$\lg \omega_{\text{КОЛ}} = \lg(2\pi f_{\text{КОЛ}}) = \lg(2\pi \cdot 1) = 0 = 0,8 \text{ дек.}$$

Путем соединения среднечастотной части с низкочастотной и высокочастотной частями ломаными линиями так, чтобы они как можно меньше отличались по наклонам и частотам излома от $L_{\text{НЕСК}}(\omega)$, построим ЖЛАХ, обозначенную $L_{\text{ЖЕЛ}}(\omega)$ (рис. 4.1).

При этом среднечастотная часть с наклоном -20 дБ/дек стала больше ранее вычисленного диапазона $2,52-3,22$ декады, что уменьшит заданный показатель колебательности системы, т. е. улучшит качество динамики САУ.

На рис. 4.1 построим также и логарифмические фазочастотные характеристики $\psi_{\text{НЕСК}}(\omega)$ и $\psi_{\text{ЖЕЛ}}(\omega)$, которые с учетом $L_{\text{НЕСК}}(\omega)$ и $L_{\text{ЖЕЛ}}(\omega)$ показывают, что исходная САУ была неустойчива, а проектируемая (желаемая) устойчива с запасами устойчивости по фазе $\psi_0 = 55^\circ$, а по амплитуде $L_0 = 15$ дБ, что по графикам дает ожидаемые величины $M = 1,45$, $\sigma \% = 23$, $t_{\text{РЕГ}} = 7,45/10^3 = 7,45 \cdot 10^{-3}$ с.

Этот предварительный результат показывает, что проектирование идет успешно.

ЛАЧХ регулятора найдем графическим вычитанием:

$$L_{\text{РЕГ}}(\omega) = L_{\text{ЖЕЛ}}(\omega) - L_{\text{НЕСК}}(\omega).$$

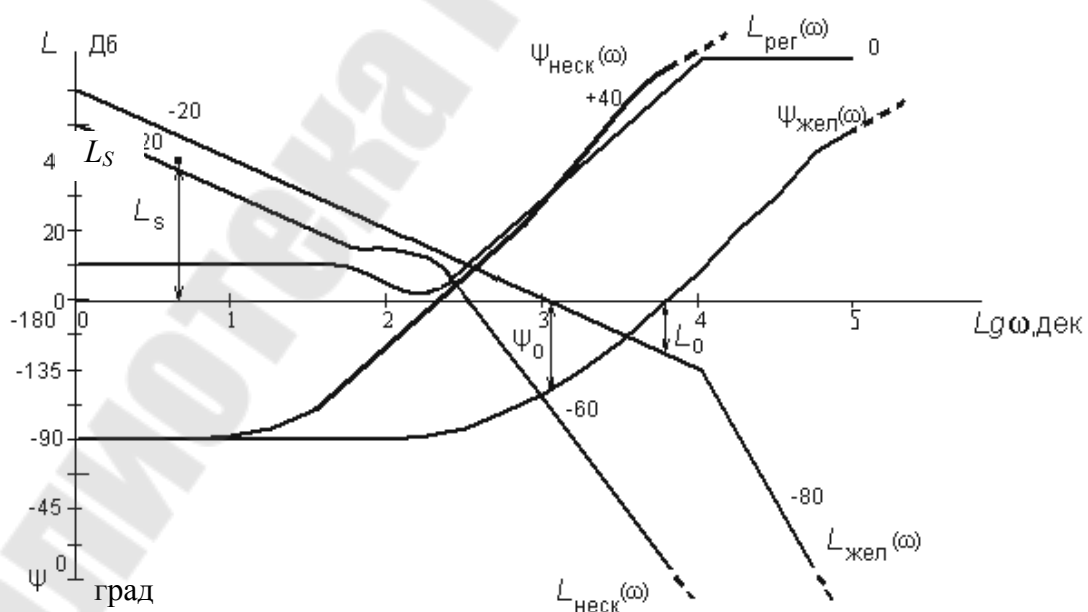


Рис. 4.1. Графический расчет ЛАЧХ регулятора

4.3. Синтез электрической схемы регулятора

По построенной ЛАЧХ регулятора $L_p(\omega)$ можно записать передаточную функцию регулятора

$$W_p(p) = \frac{K_p \cdot (T_{p1}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi_{p1} \cdot T_{p1} \cdot p + 1)}{(T_{p2} \cdot p + 1)^2} \quad (4.1)$$

и получить уравнения для определения ее параметров:

$$20 \lg K_p = 11 \text{ дБ}, K_p = 3,548 \text{ о. е.},$$

$$\lg(T_{p1}^{-1}) = 2,278 \text{ дек}, T_{p1} = 0,00527 \text{ с},$$

$$\lg(T_{p2}^{-1}) = 4,0 \text{ дек}, T_{p2} = 0,0001 \text{ с},$$

$$\xi_{p1} = 0,237 \text{ о. е.}$$

После вычисления параметров передаточную функцию регулятора представим в виде:

$$W_p(p) = \frac{3,548(0,00527^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,237 \cdot 0,00527 \cdot p + 1)}{(10^{-4} \cdot p + 1)^2}.$$

При синтезе электрической схемы по полученной передаточной функции $W_p(p)$ форсирующее звено второго порядка реализуем за счет параллельного соединения типовых Д-регулятора второго порядка (A2, A3, C1, C2, R4, R5), Д-регулятора первого порядка (A6, C3, R7) и П-регулятора (A7, R8, R9). Суммирование будем производить на входе первого типового апериодического регулятора (A4, R6, R10, R11, R12, C4), соединенного последовательно со вторым апериодическим регулятором.

Электрические схемы типовых регуляторов представлены в [1].

Общая электрическая схема синтезированного регулятора вместе с устройством сравнения изображена на рис. 4.2.

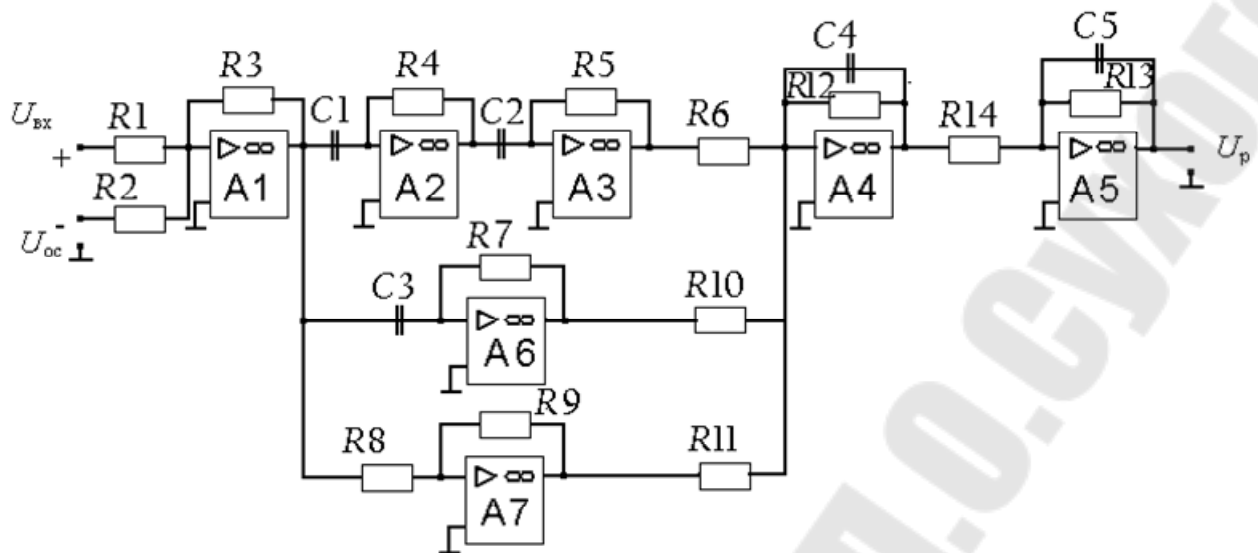


Рис. 4.2. Электрическая схема устройства сравнения (A1, R1, ..., R3) с регулятором (A2, ..., A7, C1, ..., C5, R14, ..., R13)

Значения активных сопротивлений резисторов $R1, \dots, R13$ и емкостей конденсаторов ($C1, \dots, C5$) найдем по уравнениям соответствия параметров схем и их передаточных функций (Прил. 3).

Для устройства сравнения

$$K_{у.с.у} = R3/R1 = 1,0,$$

$$K_{у.с.ос} = R3/R2 = 50,0.$$

Задавая $R1 = R3 = 10^6 \text{ Ом} = 1,0 \text{ МОм}$,
определим $R2 = R3/50 = 10^6/50 = 20 \cdot 10^4 \text{ Ом} = 20 \text{ кОм}$.

Для регулятора

$$C1 \cdot R4 = C2 \cdot R5 = T_{p1} = 0,00527 \text{ с},$$

$$C3 \cdot R7 = 2\xi_{p1} \cdot T_{p1} = 2 \cdot 0,237 \cdot 0,00527 = 0,0025 \text{ с},$$

$$R9/R8 = 1 \text{ о. е.},$$

$$C4 \cdot R12 = C5 \cdot R13 = T_{p2} = 0,0001 \text{ с},$$

$$R12/R6 = R12/R10 = R12/R11 = K_p = 3,548 \text{ о. е.},$$

$$R13/R11 = 1 \text{ о. е.}$$

Зададим

$$R4 = R5 = R7 = R8 = R9 = R12 = R13 = R14 = 10^5 \text{ Ом} = 100 \text{ кОм},$$

тогда

$$C1 = C2 = T_{p1}/R4 = 0,00527/10^5 = 5,27 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} = 0,0527 \text{ мкФ},$$

$$C3 = 2\xi_{p1}T_{p1}/R_7 = 0,0025/10^5 = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} = 0,025 \text{ мкФ},$$

$$C4 = C5 = T_{p2}/R12 = 0,0001/10^5 = 0,1 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} = 0,001 \text{ мкФ},$$

$$R6 = R10 = R11 = R12/K_p = 10^5/3,548 = 28185 \text{ Ом} = 28,2 \text{ кОм}.$$

По шкалам резисторов и конденсаторов выберем номинальные значения для

$$C1 = C2 = 0,05 \text{ мкФ},$$

а для $R6 = R10 = R11 = 27 \text{ кОм}$.

Это дает погрешность по сравнению с расчетом не более 5 %, что лежит в диапазоне технологической погрешности изготовления резисторов и конденсаторов.

Поэтому не будем уточнять расчет, считая его законченным.

4.4. Анализ полученных результатов

Этот раздел подводит итог проделанной работе, поскольку он позволяет оценить, насколько правильно синтезирован регулятор согласно технического задания на проект.

Наиболее удобно проанализировать полученные результаты путем расчета переходного процесса в спроектированном электрогидравлическом усилителе с помощью любой доступной компьютерной программы решения системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений.

Систему дифференциальных уравнений можно получить по передаточной функции замкнутой САУ.

Для спроектированного электрогидравлического усилителя такую передаточную функцию найдем по соотношению (3.2), имея в виду, что $T_{p1} = T_2$, $\xi_{p2} = \xi_2$, $T_{p2} = T_{дп}$:

$$\Phi_{ЭГУ}(p) = \frac{y(p)}{U_{ВХ}(p)} = \frac{(T_{дп} \cdot p + 1) / K_{OC}}{T_0 \cdot p (T_{дп} \cdot p + 1)^3 (T_1 \cdot p + 1) + 1},$$

где через $T_0 = T / K_p$ обозначена обобщенная постоянная времени.

После перемножения и приведения подобных членов запишем числитель в виде

$$b_2 p + b_1,$$

где $b_2 = T_{\text{ДП}} / K_{\text{ОС}}$, $b_1 = 1 / K_{\text{ОС}}$,

а знаменатель в виде

$$a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + 1,$$

где $a_0 = T_0 T_1 T_{\text{ДП}}^3$, $a_1 = T_0 T_{\text{ДП}}^2 (3T_1 + T_{\text{ДП}})$, $a_2 = 3T_0 T_{\text{ДП}} (T_1 + T_{\text{ДП}})$,

$a_3 = T_0 (3T_{\text{ДП}} + T_1)$, $a_4 = T_0$.

Если ввести относительные величины

$$y^0(p) = \frac{y(p)}{y_N}, \quad u^0(p) = \frac{U_{\text{ВХ}}(p)}{U_{\text{ВХ.N}}},$$

то от передаточной функции $\Phi_{\text{ЭГУ}}(p)$ можно перейти к уравнению в операторной форме:

$$(a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + 1) \cdot y^0(p) = (b_0 p + 1) \cdot u^0(p).$$

Здесь использовался результат

$$\frac{U_{\text{ВХ.N}}}{K_{\text{ОС}} \cdot y_N} = \frac{U_{\text{ВХ.N}}}{K_{\text{ДП}} \cdot K_{\text{УС.ОС}} \cdot y_N} = 1,$$

что следует из (2.10) при принятом в расчете $K_{\text{УС.У}} = 1$.

Поэтому

$$b_0 = b_2 \cdot \frac{U_{\text{ВХ.N}}}{y_N} = \frac{T_{\text{ДП}} \cdot U_{\text{ВХ.N}}}{K_{\text{ОС}} \cdot y_N} = T_{\text{ДП}},$$

$$b_1 \cdot \frac{U_{\text{ВХ.N}}}{y_N} = \frac{U_{\text{ВХ.N}}}{K_{\text{ОС}} \cdot y_N} = 1.$$

Заменой $p = d / dt$ перейдем от операторного уравнения к дифференциальному:

$$a_0 \cdot \frac{d^5 y^0}{dt^5} + a_1 \cdot \frac{d^4 y^0}{dt^4} + a_2 \cdot \frac{d^3 y^0}{dt^3} + a_3 \cdot \frac{d^2 y^0}{dt^2} + a_4 \cdot \frac{dy^0}{dt} + y^0 = b_0 \cdot \frac{du^0}{dt} + u^0.$$

Коэффициенты полученного уравнения чрезвычайно малы, например,

$$a_0 = T_0 T_1 T_{\text{ДП}}^3 = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 6,18 \cdot 10^{-6} (1 \cdot 10^{-4})^3 = 6,18 \cdot 10^{-22} \text{ с}^5.$$

Это создает серьезные трудности при его решении.

С целью выравнивания коэффициентов и их увеличения, введем относительное время $\tau = t / a_0^{1/5}$, тогда получим уравнение в виде:

$$\frac{d^5 y^0}{d\tau^5} + c_1 \cdot \frac{d^4 y^0}{d\tau^4} + c_2 \cdot \frac{d^3 y^0}{d\tau^3} + c_3 \cdot \frac{d^2 y^0}{d\tau^2} + c_4 \cdot \frac{dy^0}{d\tau} + y^0 = d_0 \cdot \frac{du^0}{d\tau} + u^0,$$

где $c_1 = a_1 / a_0^{4/5}$; $c_2 = a_2 / a_0^{3/5}$; $c_3 = a_3 / a_0^{2/5}$; $c_4 = a_4 / a_0^{1/5}$; $d_0 = b_0 / a_0^{1/5}$.

Большинство компьютерных программ приспособлено к решению систем дифференциальных уравнений, представленных в форме Коши.

Поэтому, вводя новые промежуточные переменные, заменим полученное дифференциальное уравнение 5-го порядка системой из пяти дифференциальных уравнений первого порядка.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy^0}{d\tau} = y_1^0, \\ \frac{dy_1^0}{d\tau} = y_2^0, \\ \frac{dy_2^0}{d\tau} = y_3^0, \\ \frac{dy_3^0}{d\tau} = y_4^0, \\ \frac{dy_4^0}{d\tau} = -c_1 \cdot y_4^0 - c_2 \cdot y_3^0 - c_3 \cdot y_2^0 - c_4 \cdot y_1^0 - y^0 + u^0 + d_0 \frac{du^0}{d\tau}. \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Используя результаты расчета проектируемого электрогидравлического усилителя, вычислим коэффициенты системы уравнений.

Сначала определим обобщенные постоянные времени:

$$T = \frac{T_{PK}}{K_{OC} \cdot K_{ЭМП.УК}} = \frac{3,67 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^3 \cdot 2,06 \cdot 10^{-5}} = 3,56 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

$$T_0 = \frac{T}{K_p} = \frac{3,56 \cdot 10^{-3}}{3,548} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Затем найдем первичные коэффициенты:

$$a_0 = T_0 T_1 T_{ДП}^3 = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 6,18 \cdot 10^{-6} \cdot (1 \cdot 10^{-4})^3 = 6,18 \cdot 10^{-21} \text{ с}^5;$$

$$a_1 = T_0 T_{ДП}^2 (3T_1 + T_{ДП}) = 1 \cdot 10^{-3} (1 \cdot 10^{-4})^2 (3 \cdot 6,18 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-4}) = 1,19 \cdot 10^{-15} \text{ с}^4;$$

$$a_2 = 3T_0 T_{ДП} (T_1 + T_{ДП}) = 3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4} (6,18 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-4}) = 3,19 \cdot 10^{-11} \text{ с}^3;$$

$$a_3 = T_0 (3T_{ДП} + T_1); \quad a_4 = 1 \cdot 10^{-3} (3 \cdot 1 \cdot 10^{-4} + 6,18 \cdot 10^{-6}) = 3,062 \cdot 10^{-7} \text{ с}^2;$$

$$a_4 = T_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$b_0 = T_{ДП} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

После чего вычислим коэффициенты системы уравнений (4.2):

$$c_1 = a_1 / a_0^{4/5} = 17,5;$$

$$c_2 = a_2 / a_0^{3/5} = 42,6;$$

$$c_3 = a_3 / a_0^{2/5} = 37,2; \quad (4.3)$$

$$c_4 = a_4 / a_0^{1/5} = 11,0;$$

$$d_0 = b_0 / a_0^{1/5} = 1,1.$$

После подстановки коэффициентов (4.3) в систему уравнений (4.2) она была решена с помощью программы MERSO2 методом Рунге-Кутты-Мерсона для единичного скачка входного сигнала

$$u^0(\tau) = 1(\tau),$$

при нулевых начальных условиях

$$y^0(+0) = y_1^0(+0) = y_2^0(+0) = y_3^0(+0) = y_4^0(+0) = 0,$$

с шагом расчета $\Delta\tau = 0,1$ в диапазоне $0 < \tau < 100$.

Графическая зависимость полученного переходного процесса представлена на рис. 4.3, из которой получено:

- статическая ошибка $\sigma \% = 0$;
- перерегулирование $\sigma \% = 0$;
- показатель колебательности $M = 1$;
- длительность переходного процесса

$$t_{\text{РЕГ}} = \tau_{\text{РЕГ}} \cdot a_0^{1/5} = 50(6,18 \cdot 10^{-21})^{1/5} = 4,54 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

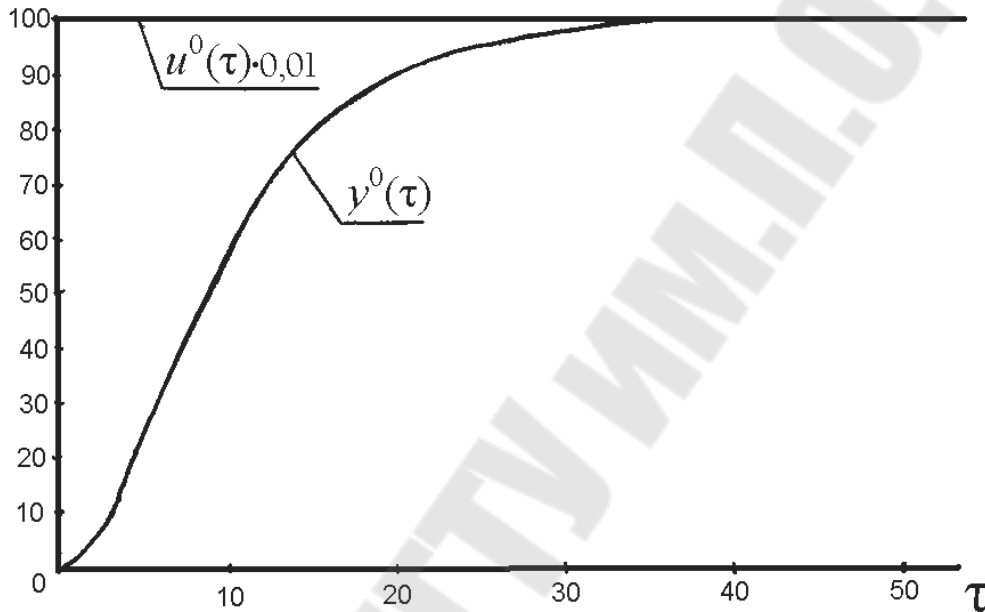


Рис. 4.3. Переходной процесс в спроектированном электрогидравлическом усилителе при единичном скачке входного сигнала

Синтез регулятора произведен хорошо, поскольку все показатели лучше заданных.

По специальному заданию преподавателя может быть рассчитан переходной процесс пуска в вибрационный режим, когда $u^0(\tau) = \sin \tau$.

Для установившегося вибрационного режима основной рабочей характеристикой является амплитудно-частотная характеристика электрогидравлического усилителя.

Её можно получить по относительной передаточной функции, которая согласно может быть записана в виде:

$$\Phi_{\text{ЭГУ}}^0(p_0) = \frac{y^0(p_0)}{U^0(p_0)} = \frac{d_0 \cdot p_0 + 1}{p_0^5 + c_1 \cdot p_0^4 + c_2 \cdot p_0^3 + c_3 \cdot p_0^2 + c_4 \cdot p_0 + 1},$$

где $p_0 = \frac{d}{d\tau}$ – относительный оператор Лапласа.

Подстановкой $p_0 = j\omega_0$ сначала найдём амплитудно-фазочастотную характеристику $\Phi_{\text{ЭГУ}}^0(j\omega_0)$, а затем амплитудно-частотную характеристику $A(\omega_0) = \text{mod}[\Phi_{\text{ЭГУ}}^0(j\omega_0)]$.

После подстановки численных значений коэффициентов получим:

$$A(\omega_0) = \sqrt{\frac{1 + 1,21 \cdot \omega_0^2}{(17,5 \cdot \omega_0^4 - 37,2 \cdot \omega_0^2 + 1)^2 + (\omega_0^5 - 42,6 \cdot \omega_0^3 + 11 \cdot \omega_0)^2}}$$

Относительная частота $\omega_0 = \omega / \omega^0$, где частота нормы Вышнеградского $\omega^0 = 1 / a_0^{1/5} = (6,18 \cdot 10^{-21})^{-0,2} = 1,1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

В заключении курсовой работы следует построить принципиальную схему ЭГУ.

Приложение 1

Образец титульного листа

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Машиностроительный факультет

Кафедра «Гидропневмоавтоматика»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовой работе по курсу
«Теория автоматического управления» на тему:
«СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ»

Исполнитель: студент гр. ГА-41
И. И. Иванов

Руководитель: преподаватель
П. П. Петров

Дата проверки _____

Дата допуска к защите _____

Дата защиты _____

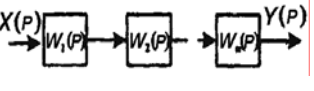

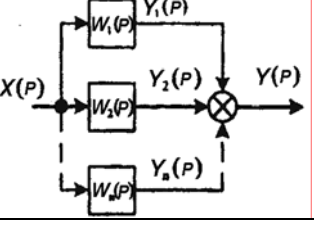

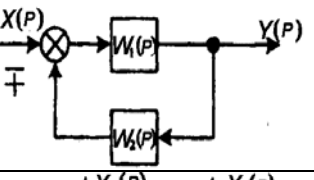

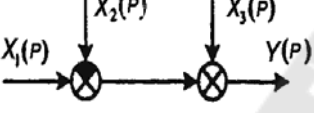
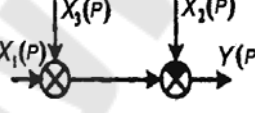

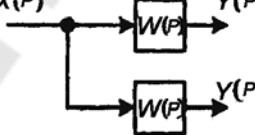
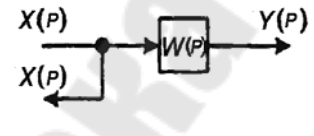
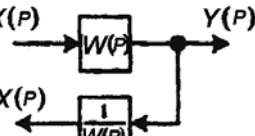
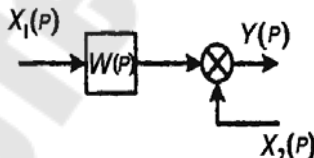
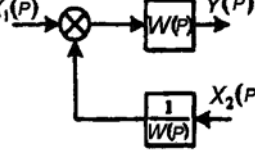
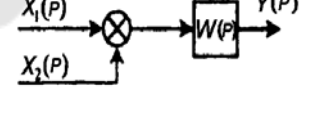
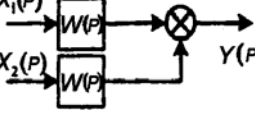
Оценка работы _____

Подпись руководителя _____

Гомель 2007

Приложение 2

Правила преобразования структурных схем

Наименование операции	Исходная схема	Преобразованная схема	Уравнение
Объединение последовательно соединенных звеньев			$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p)$
Объединение параллельно соединенных звеньев			$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p)$
Объединение замкнутого контура			$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p) \cdot W_2(p)}$
Перестановка сумматоров			$Y(p) = X_1(p) - X_2(p) + X_3(p)$
Перенос точки съема через звено на его вход			$Y(p) = X(p) \cdot W(p)$
Перенос точки съема через звено на его выход			$X(p) = \frac{1}{W(p)} \cdot Y(p)$
Перенос сумматора через звено на его вход			$Y(p) = X_1(p) \cdot W(p) + X_2(p)$
Перенос сумматора через звено на его выход			$Y(p) = [X_1(p) + X_2(p)] \cdot W(p)$

Приложение 3

Шкалы номинальных значений сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов

Таблица П.3.1

Шкала резисторов, кОм

1,0	3,0	6,2	18	39	82	240	510
1,2	3,3	6,8	20	43	91	270	560
1,5	3,6	7,5	22	47	100	300	620
1,8	3,9	8,2	24	51	120	330	680
2,0	4,3	9,1	27	56	150	360	750
2,2	4,7	10	30	62	180	390	820
2,4	5,1	12	33	68	200	430	910
2,7	5,6	15	36	75	220	470	1000

Таблица П.3.2

Шкала конденсаторов, мкФ

0,01	–	0,1	–	1,0	3,3	10	–
0,012	0,04	0,12	0,4	1,22	4,0	12	40
0,015	0,047	0,47	0,47	1,5	4,7	15	–
0,018	0,05	0,18	0,5	1,8	5,0	18	50
–	0,06	–	0,6	2,0	6,0	20	60
0,022	0,068	0,22	0,68	2,2	6,8	22	–
0,025	0,07	0,25	0,7	2,5	7,0	25	–
0,03	0,08	0,3	0,8	3,0	8,0	30	–

Литература

1. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин: Теория систем автоматического управления / В. П. Автушко [и др.]. – Минск : ПИОН, 2001. – 396 с.
2. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин : Средства гидроавтоматики / Андреев А. Ф. [и др.]. – Минск : ВУЗ – ЮНИТИ БГПА – ИСН, 1998. – 224 с.
3. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам // под ред. Б. Б. Некрасова. – Минск : Выш. шк., 1985. – 485 с.
4. Шагинян, А. С. Электрогидравлические усилители / А. С. Шагинян, В. В. Болотский. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2001. – 104 с.
5. Выполнение электрических схем по ЕСКД / С. Т. Усатенко [и др.]. – Москва : Изд-во стандартов, 1992. – 316 с.
6. Яшугин, Е. А. Теория линейных непрерывных систем автоматического управления в вопросах и ответах : справ. пособие / Е. А. Яшугин. – Минск : Выш. шк., 1986. – 223 с.

Содержание

Введение	3
1. Задание на курсовую работу по теории автоматического управления	4
2. Краткие сведения о типовом электрогидравлическом усилителе типа «золотник-золотник»	6
2.1. Принцип действия электрогидравлического усилителя	6
2.2. Распределительный гидравлический каскад с трансформаторным датчиком положения	9
2.3. Управляющий гидравлический каскад с электромеханическим преобразователем и его усилителем мощности	10
2.4. Устройство сравнения и регулятор	12
3. Структурная схема и передаточные функции электрогидравлического усилителя	13
4. Пример синтеза регулятора электрогидравлического усилителя	14
4.1. Анализ технического задания	15
4.2. Расчет логарифмических амплитудно-частотных характеристик регулятора	17
4.2.1. Построение ЛАЧХ нескорректированной САУ	18
4.2.2. Построение желаемой ЛАЧХ системы и ЛАЧХ регулятора	18
4.3. Синтез электрической схемы регулятора	21
4.4. Анализ полученных результатов	23
Приложение 1	29
Приложение 2	30
Приложение 3	31
Литература	32

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

**Методические указания
к курсовой работе по курсу
«Теория автоматического управления»
для студентов специальности 1-36 01 07
«Гидропневмосистемы мобильных
и технологических машин»**

Авторы-составители: **Луковников** Вадим Иванович
Михневич Анатолий Васильевич

Редактор *Н. В. Гладкова*

Компьютерная верстка *Н. В. Широглазова*

Подписано в печать 07.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 2,09. Уч. - изд. л. 1,84.

Изд. № 204.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:

Издательский центр

учреждения образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

