

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

О.С.Колосов, Е.Л.Львов, С.А.Хризолитова,
Н.А.Прокофьев

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по курсу

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Методическое пособие
для студентов по направлению «Автоматизация и управление»

УДК
621.398
К 125
УДК: 681.52(076.5)

Утверждено учебным управлением МЭИ

Подготовлено на кафедре управления и информатики

Колосов О.С., Львов Е.Л., Хризолитова С.А., Прокофьев Н.А.

Курсовой проект по курсу “Электромеханические системы”. Методическое пособие.- М.:Изд-во МЭИ, 2000.-34с.

Содержит сведения, необходимые для проектирования электромеханических следящих систем. Позволяет провести выбор основных элементов следящей системы и исследование динамических характеристик системы в целом.

Предназначено для студентов специальностей “Управление и информатика в технических системах”, “Автоматизированный электропривод”, “Электрические машины”.

Учебное издание

Олег Сергеевич Колосов, Евгений Львович Львов, Светлана Александровна Хризолитова,
Николай Александрович Прокофьев,

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ по курсу ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Редактор М.Б. Коломейцева
Редактор издательства Н.Л. Черныш
ЛР №020528 от 05.06.97

Темплан издания МЭИ 2000г. (1), метод. Подписано к печати . . 2008
Формат бумаги 60×84/16 Печ. л.2,0 Тираж 50 Изд. Заказ

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная, д.14.
Отпечатано в типографии ЦНИИ «Электроника» 117415, Москва, просп. Вернадского, д.
39

© Московский энергетический институт, 2008

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

ТЕМА КУРСОВОГО ПРОЕКТА: СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА (СС)

Исходные данные

$\omega_{\text{нм}}$ - наибольшая скорость вращения исполнительного вала при равномерной заводке и амплитуда скорости при синусной заводке;

$\varepsilon_{\text{нм}}$ - амплитуда ускорения исполнительного вала при синусной заводке;

$M_{\text{нс}}$ - статический момент сухого трения на исполнительном валу;

$J_{\text{н}}$ - момент инерции нагрузки исполнительного вала;

$\theta_{\text{ск}}$ - сумма статической и кинетической погрешностей при равномерной заводке со скоростью $\omega_{\text{нм}}$;

$\theta_{\text{д}}$ - динамическая погрешность при синусной заводке при амплитудных значениях скорости $\omega_{\text{нм}}$ и ускорения $\varepsilon_{\text{нм}}$;

η_{ip} - КПД i - ступени редуктора;

$\alpha = I_{\text{max}} / I_N$ (для двигателей постоянного тока) - допустимый коэффициент перегрузки по току при пуске двигателя;

$\varphi_{\text{з}} > \pi/4$ - запас по фазе разомкнутой системы;

$t_{\text{р}}$ - максимально допустимое время регулирования;

$\sigma\%$ - максимальная величина перерегулирования $< 15\%$.

Рекомендуются: тип и серия двигателя, тип усилителя мощности, тип измерительного устройства и способ динамической коррекции.

Содержание курсовой работы

1. Выбор типоразмера двигателя и расчет редуктора.
2. Расчет усилителя мощности
3. Расчет коэффициента усиления разомкнутой системы, электромеханической постоянной времени двигателя и запаса по фазе нестабилизированной системы.
4. Составление передаточной функции разомкнутой стабилизированной системы, определение ее параметров, построение ЛАЧХ и вычисление запаса по фазе и показателей качества переходного процесса.
5. Определение параметров предварительного усилителя.
6. Оформление пояснительной записки с принципиальной схемой, частотными характеристиками и результатами оценок переходного процесса и ошибок системы при моделировании режимов подачи на вход ступенчатого значения угла, равномерной и синусоидальной заводки.

ВАРИАНТЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЭЛЕМЕНТОВ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

Таблица вариантов СС с двигателем постоянного тока

N	$\omega_{\text{нм}},$ р/с	$\varepsilon_{\text{нм}},$ р/с ²	$M_{\text{нс}},$ Н·м	$J_{\text{н}},$ кг·м ²	$t_P,$ с	$\theta_{\text{ск}},$ град	$\theta_{\text{д}},$ град
П1	0,73	2,19	24,7	12,2	0,4	1	1
П2	1,09	4,36	16,5	5,49	0,4	1	1
П3	1,46	5,84	12,3	3,07	0,4	1	1
П4	0,69	2,07	52,1	15,2	0,4	1	1
П5	1,03	3,09	40,0	6,85	0,4	1	1
П6	1,38	4,14	26,1	3,81	0,4	1	1
П7	0,702	1,40	70,05	32,6	0,4	1	1
П8	1,05	2,10	47,1	14,6	0,4	1	1
П9	1,40	2,80	35,4	8,23	0,4	1	1
П10	1,11	1,48	20	12,1	0,4	1	1
П11	1,01	2,22	25,1	5,3	0,4	1	1
П12	1,48	2,96	20,2	9,0	0,4	1	1
П13	0,689	1,38	39,2	12,9	0,4	1	1
П14	1,03	2,06	26,2	5,74	0,4	1	1
П15	1,38	2,75	19,6	3,23	0,4	1	1
П16	0,671	1,34	60,4	15,6	0,4	1	1
П17	1,01	2,02	40,1	6,93	0,4	1	1
П18	1,34	2,68	30,2	3,91	0,4	1	1
П19	0,678	1,36	43,1	17,2	0,4	1	1
П20	1,02	2,03	57,4	15,3	0,4	1	1
П21	1,36	2,71	43,0	8,60	0,4	1	1
П22	1,03	2,32	24,9	5,1	0,4	1	1
П23	1,02	1,53	44,4	18,3	0,4	1	1
П24	1,36	2,04	50	10,3	0,4	1	1
П25	1.3	2.6	12.0	2.0	0.4	1	1
П26	1.2	2.4	14.0	4.0	0.4	1	1
П27	1.1	2.2	20.0	5.0	0.4	1	1
П28	1.0	2.0	24.0	6.0	0.4	1	1
П29	0.9	1.8	28.0	8.0	0.4	1	1
П30	0.8	1.6	32.0	10.0	0.4	1	1
П31	0.7	1.4	60.0	40.0	0.4	1	1
П32	0.6	1.2	80.0	50.0	0.4	1	1

Для всех вариантов:

θ_d - без учета статической погрешности.

КПД одной пары зацепления редуктора $\eta_{ip} = 0,97$.

Для предварительной оценки передаточного числа редуктора КПД редуктора берется $\eta_p = 0,8$.

Допустимый коэффициент перегрузки по току якоря $\alpha = 4$.

Серия двигателей - СЛ.

УМ - мостовой усилитель с транзисторами в ключевом режиме. Частота мультивибратора $f = 400$ Гц.

ИУ - бесконтактные сельсины БД-160А и БС-155А в трансформаторном режиме. $f = 400$ Гц, $K_{и} = 40$ В/рад.

Тахогенератор СЛ-М, $K_{тг} = 3,35 \cdot 10^{-2}$ В·с/рад, $J_{тг} = 2,35 \cdot 10^{-7}$ кг·м².

Тип коррекции: гибкая обратная связь.

Таблица вариантов СС с асинхронным двигателем

N	$\omega_{\text{нм}},$ р/с	$\varepsilon_{\text{нм}},$ р/с ²	$M_{\text{нс}},$ Н·м	$J_{\text{н}} \cdot 10^{-3},$ (кг·м ²)	$t_{\text{р}},$ с	$\theta_{\text{ск}},$ град	$\theta_{\text{д}},$ град
A1	2,58	48,4	0,267	3,43	0,1	1,5	2
A2	5,05	96,6	0,183	0,856	0,1	1,5	2
A3	1,35	12,4	0,638	8,68	0,1	1,5	2
A4	2,20	44,9	0,319	2,17	0,1	1,5	2
A5	2,66	7,6	0,597	15,5	0,1	1,5	2
A6	5,31	60,7	0,299	3,88	0,1	1,5	2
A7	1,37	13,0	1,50	43,4	0,1	1,5	2
A8	2,74	26,1	0,748	10,8	0,1	1,5	2
A9	2,60	27,8	1,01	39,8	0,1	1,5	2
A10	5,19	47,4	0,507	9,94	0,1	1,5	2
A11	1,36	10,5	2,49	108	0,1	1,5	2
A12	2,71	13,2	1,25	26,9	0,1	1,0	2
A13	3,15	20,2	1,63	66,5	0,1	1,5	2
A14	6,29	25	0,815	16,6	0,1	1,5	2
A15	1,52	7,52	4,46	222	0,1	1,5	2
A16	3,03	15,0	2,23	55,5	0,1	1,5	2°
A17	3,08	19,0	3,08	65	0,1	1,5	2
A18	3,17	25,6	1,54	29,3	0,1	2,0	2
A19	1,49	8,39	6,38	83,5	0,1	1,5	2
A20	2,99	7,0	4,19	95,4	0,1	1,5	2
A21	3,50	6,2	4,40	74	0,1	1,5	2
A22	3,1	10,2	1,9	18,6	0,1	1,5	2
A23	1,62	4,19	4,9	220	0,1	1,0	2
A24	1,1	3,28	13,4	138	0,1	1,0	2
A25	4.5	5.0	0.05	0.02	0.1	1.0	2
A26	4.0	4.0	0.04	0.025	0.1	1.0	2
A27	3.5	5.0	0.2	0.03	0.1	1.0	2
A28	3.0	4.0	0.3	0.04	0.1	1.0	2
A29	2.5	4.0	0.7	0.08	0.1	1.0	2
A30	2.0	3.0	2.0	0.15	0.1	1.0	2
A31	1.5	2.0	5.0	0.6	0.1	1.0	2
A32	1.0	2.0	10.0	1.3	0.1	1.0	2

Для всех вариантов:

$\theta_{\text{д}}$ - без учета статической погрешности.

КПД одной пары зацепления редуктора $\eta_{\text{ip}} = 0,97$.

Для предварительной оценки передаточного числа редуктора КПД редуктора берется $\eta_p = 0.8$.

Серия двигателей ЭМ-М. $f = 400$ Гц.

УМ - двухтактный транзисторный усилитель в классе В.

ИУ - бесконтактные сельсины БД-160А и БС-155А в трансформаторном режиме. $f = 400$ Гц, $K_n = 40$ В/рад.

Тахогенератор: ТГ-5А. $f = 400$ Гц. $K_{тг} = 1,17 \cdot 10^{-2}$ В·с/рад, $J_{тг} = 10^{-7}$ кг·м².

Тип коррекции: жесткая обратная связь.

Технические данные двигателей постоянного тока серии СЛ

Тип	P_n , Вт	U_n , В	ω_n , р/с	$I_{я}$, А	$r_{я}$, Ом	$J_{я} \cdot 10^{-6}$, кг·м ²	d , мм
СЛ-321	38	110	314	0,6	27	59	8
СЛ-361	50	110	314	0,8	25	69	8
СЛ-521	77	110	314	1,1	8,5	127	10
СЛ-569	175	110	377	2,0	3,6	265	10

Технические данные двухфазных асинхронных двигателей серии ЭМ-М. $f = 400$ Гц

Тип	U_n , В	P_n , Вт	$M_n \cdot 10^{-3}$, Нм	ω_n , р/с	$J_{я} \cdot 10^{-8}$, кг·м ²	R_y , Ом	x_y , Ом	D , мм
ЭМ-1М	60	1,03	6,87	503	27,7	196	227	3
ЭМ-2М	60	2,47	11,8	628	151,0	173	166	3
ЭМ-4М	60	4,07	21,6	586	128	124	157	3
ЭМ-8М	80	8,22	31,4	670	206	58,1	81,4	4
ЭМ-15М	80	15,2	58,9	670	345	55,2	70,0	4
ЭМ-25М	80	25,0	88,3	681	518	20,8	34,2	6

Технические данные кремниевых р-п-р транзисторов

Тип	$U_{кэ}$, В	I_k , А	β	$P_{кэ}$, Вт
Т 505 Б	250	1,0	25	5/1*
КТ 814 В	60	1,5	40	10/1*
КТ 816 В	60	3,0	25	25/1*
КТ 855 В	150	5,0	25	40/1,2*
КТ 865 А	200	10	40	100/1,5*
Т 860 В	40	2,0	80	10/1*

* - Числитель: $P_{кэ}$ с теплоотводом

Знаменатель: $P_{кэ}$ без теплоотвода

Технические данные кремниевых диодов

Тип	U , В	I , А
КД202Д	200	3
Д243В	200	5
Д243	200	10

Технические данные опорных диодов (стабилитронов)

Тип	Напряжение стабилизации, В	Ток стабилизации, мА	Максимальный прямой ток, мА	Предельная мощность, мВт	Прямое падение напряжения, В при токе 50 мА
Д814А	7-8,5	40	100	340	1
Д814Б	8-9,5	36	100	340	1
Д814В	9-10,5	32	100	340	1
Д814Г	10-12	29	100	340	1
Д814Д	11,5-14	24	100	340	1

Шкала номинальных значений резисторов ($\pm 5\%$)

1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6
10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36
100	110	120	130	150	160	180	200	220	240	270	300	330	360

3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1
39	43	47	51	56	62	68	75	82	91
390	430	470	510	560	620	680	750	820	910

Шкала номинальных значений конденсаторов ($\pm 10\%$)

1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2
10	12	15	18	22	27	33	39	47	56	68	82
100	120	150	180	220	270	330	390	470	560	680	820

Технические данные микросхем для преобразователей

Тип	$U_{э\bar{э}} \text{ max, В}$	$U_{б\bar{э}} \text{ max, В}$	$U_{к\bar{б}} \text{ max, В}$	$I_{к \text{ min, мА}}$	$I_{э \text{ min, мА}}$
1КТ01А	6,3	6,5	3,5	10	10
1КТ01Б	6,3	6,5	3,5	10	10
1КТ01В	3,0	3,5	3,5	10	10
1КТ01Г	3,0	3,5	3,5	10	10

Классы точности сельсинов

	I класс	II класс	III класс
Сельсин датчик	$\pm 0,25^\circ$	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 1,0^\circ$
Сельсин приёмник	$\pm 0,25^\circ$	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,75^\circ$

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРА ДВИГАТЕЛЯ И ПЕРЕДАТОЧНОГО ЧИСЛА РЕДУКТОРА i_p

Требуемая мощность на валу двигателя оценивается по одному из следующих соотношений:

$$P_{\text{треб}} = 2M_{\text{н}} \omega_{\text{нм}};$$

$$P_{\text{треб}} = (2J_{\text{н}} \varepsilon_{\text{нм}} + M_{\text{н}}) \omega_{\text{нм}};$$

$$P_{\text{треб}} = 2(J_{\text{н}} \varepsilon_{\text{нм}} + M_{\text{н}}) \omega_{\text{нм}}.$$

Выбор необходимого соотношения определяется данными технического задания. Выбирается ближайший типоразмер двигателя с номинальной мощностью $P_N > P_{\text{треб}}$.

1.1. Предварительная оценка передаточного числа редуктора

1.1.1. СС с двигателем постоянного тока

Из справочной таблицы для выбранного двигателя выписываются номинальные значения напряжения, тока и скорости якоря U_N , I_N , ω_N , а также момент инерции якоря двигателя $J_{\text{дв}}$ и сопротивление обмотки якоря $r_{\text{я}}$.

Номинальный момент двигателя $M_N = \frac{P_N}{\omega_N}$.

Коэффициент противоЭДС обмотки якоря $c = \frac{U_N - I_N r_{\text{я}}}{\omega_N}$.

Момент потерь на валу двигателя $M_{\sigma} = \frac{I_N(U_N - I_N r_{\text{я}}) - P_N}{\omega_N}$.

Максимальное напряжение усилителя мощности $U_{\text{ум макс}}$, и добавочный резистор $R_{\text{доб}}$, ограничивающий ток якоря при пуске, определяются путём совместного решения уравнений якорной цепи для пускового и

номинального режимов :

$$U_{\text{ум макс}} = \alpha I_N (R_{\text{доб}} + r_{\text{я}});$$

$$U_{\text{ум макс}} = I_N R_{\text{доб}} + U_N.$$

Диапазон возможных значений передаточного числа редуктора i_p определяется корнями уравнения i_{p1} , i_{p2}

$$\frac{c}{r_{\text{я}} + R_{\text{доп}}} (U_{\text{ум max}} - c \omega_{\text{нм}} i_{\text{р}}) = (J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_{\text{р}}^2 \eta}) \varepsilon_{\text{нм}} i_{\text{р}} + \frac{M_{\text{н}}}{i_{\text{р}} \eta} + M_{\sigma}.$$

Допустимое передаточное число редуктора может быть выбрано из условия: $i_{\text{р1}} < i_{\text{р}} < i_{\text{р2}}$.

Обычно выбирают значение $i_{\text{р}}$ ближе к большему корню $i_{\text{р2}}$.

Допустимое передаточное число редуктора должно удовлетворять трём условиям, обеспечивающим нормальную работу двигателя:

- условие по скорости $i_{\text{р}} \cdot \omega_{\text{нм}} \leq (1,1 \dots 1,2) \cdot \omega_{\text{дв.ном}}$;
- условие по моменту $M'_{\text{н}} \leq (3 \dots 4) M_{\text{дв.ном}}$;
- условие по перегреву
-

$$\sqrt{(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_{\text{р}}^2 \eta})^2 \varepsilon_{\text{нм}}^2 i_{\text{р}}^2 0,5 + M_{\text{н}}^2 / i_{\text{р}}^2 \eta^2} \leq M_{\text{дв.ном}},$$

где $M'_{\text{н}} = (J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_{\text{р}}^2 \eta}) \varepsilon_{\text{нм}} i_{\text{р}} + \frac{M_{\text{н}}}{i_{\text{р}} \eta} + M_{\sigma}.$

1.1.2. СС с двигателем переменного тока

Из справочной таблицы для выбранного двигателя выписываются номинальные значения напряжения обмотки управления $U_{\text{уN}}$ и мощности на валу P_{N} , пусковой момент $M_{\text{п}}$ и скорость холостого хода $\omega_{\text{х}}$, момент инерции ротора $J_{\text{дв}}$, активной $R_{\text{у}}$ и реактивной $X_{\text{у}}$ составляющих сопротивления обмотки управления при заторможенном роторе.

Номинальные значения момента M_{N} и скорости ω_{N} приближённо определяются из соотношений:

$$M_{\text{N}} = \gamma M_{\text{п}} ; \omega_{\text{N}} = \gamma \omega_{\text{х}}, \text{ где } \gamma = \sqrt{\frac{P_{\text{N}}}{M_{\text{п}} \omega_{\text{х}}}}.$$

Линеаризованная механическая характеристика двигателя для скоростей $0 \leq \omega_{\text{дв}} < \omega_{\text{N}} :: M_{\text{дв}} = M_{\text{п}} - a \omega_{\text{дв}};$

$$M_{\text{п}} = b U_{\text{у}},$$

$$\text{где } b = \frac{M_{\text{п}}}{U_{\text{уN}}}; a = \frac{M_{\text{п}} - M_{\text{N}}}{\omega_{\text{N}}}.$$

Диапазон допустимых значений передаточных чисел редуктора определяется корнями квадратного уравнения i_{p1} и i_{p2} :

$$M_{\Pi} - a \omega_{\text{нм}} i_p = \left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_p^2 \eta} \right) \varepsilon_{\text{нм}} i_p + \frac{M_{\text{н}}}{i_p \eta}.$$

Передаточное число редуктора выбирается из условия: $i_{p1} < i_p < i_{p2}$.

Кроме этого передаточное число редуктора должно удовлетворять трём условиям, обеспечивающим нормальную работу двигателя:

- условие по скорости $i_p \omega_{\text{нм}} \leq (1,1 \dots 1,2) \omega_{\text{дв.ном}}$;
- условие по моменту $M'_n \leq (1,1 \dots 1,3) M_N$;
- условие по перегреву

$$\sqrt{\left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_p^2 \eta} \right)^2 \varepsilon_{\text{нм}}^2 i_p^2 0,5 + M_{\text{н}}^2 / i_p^2 \eta^2} \leq M_{\text{дв.ном}},$$

где $M'_n = \left(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_p^2 \eta} \right) \varepsilon_{\text{нм}} i_p + \frac{M_{\text{н}}}{i_p \eta}.$

1.2. Расчет редуктора с цилиндрическими колесами

Редуктор с тремя парами зацеплений схематично изображён на рис. 1. Передаточное число каждой пары зацепления $i_{n-1,n}$ определяется как отношение числа зубьев ведомой шестерни (i_n) к числу зубьев ведущей (i_{n-1}) или отношение соответствующих диаметров или радиусов шестерен:

$$i_{1,2} = \frac{e_2}{e_1}; i_{n-1,n} = \frac{e_n}{e_{n-1}},$$

где e_i – обобщенный показатель, характеризующий шестерню (диаметр, радиус или число зубьев).

Передаточное число редуктора определяется как произведение передаточных чисел всех пар зацеплений:

$$i_p = i_{1,2} \cdot i_{3,4} \cdot \dots \cdot i_{n-1,n}.$$

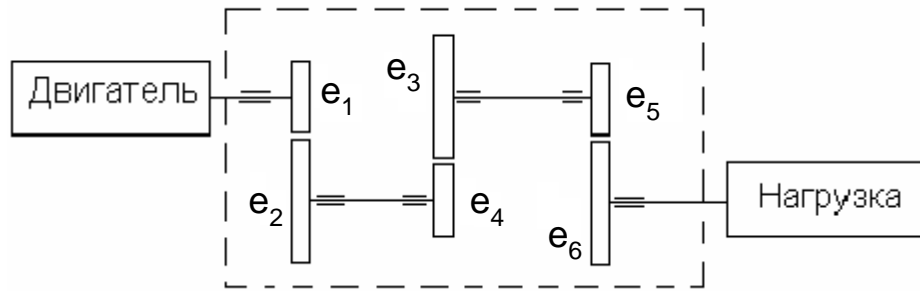


Рис. 1

Для минимизации приведённого к валу двигателя момента инерции редуктора следует рассчитывать передаточные числа ступеней пар зацеплений с использованием соотношения:

$$i_{n,n-1} = \sqrt{\frac{i_{n-2,n-3}^4 - 1}{2}}.$$

При этом передаточное число последней ступени i_n можно задать из условия:

$$10 < i_n < 15.$$

И далее последовательно считать передаточные числа ступеней, пока не получим передаточное число первой ступени $i_{1,2}$, не превышающее 2. Обычно число ступеней редуктора не превышает 5...6.

При этом должно выполняться условие:

$$i_{1,2} < i_{3,4} < \dots < i_{n-1,n}$$

Приведённый момент к валу двигателя редуктора:

$$J_{\text{ред}} = J_1 + \frac{J_2 + J_3}{i_1^2} + \frac{J_4 + J_5}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + \frac{J_{n-2} + J_{n-1}}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \dots \cdot i_{n-1}^2} + \frac{J_n}{i_p^2}$$

Момент инерции сплошного цилиндрического колеса:

$$J_i = \frac{\pi \cdot \rho \cdot b}{32} \cdot D_i^4,$$

где ρ - плотность материала, из которого изготавливаются колеса.

Для стали $\rho = 7.7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

b - толщина колеса

D_i - диаметр i -го колеса.

Расчет диаметров колёс ведётся из условия, что диаметры всех ведущих шестерён зацеплений одинаковы:

$$D_1 = D_3 = D_5 = \dots = D_{n-1} \geq 2d,$$

где d - диаметр вала двигателя.

Количество зубьев на ведущих шестернях должно быть:

$$Z_1 = Z_3 = \dots = Z_{n-1} \geq 15 \quad (Z_i - \text{число целое})$$

Диаметр шестерни и количество зубьев связаны соотношением:

$$D_i = m \cdot Z_i, \text{ где } m - \text{модуль зуба.}$$

Модуль зуба выбирается равным одному из стандартных значений из шкалы модулей

Стандартная шкала модулей [мм]

m [мм]	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0

Оценку величины модуля следует проводить из условия обеспечения прочности зубьев, используя известное соотношение из механики для расчёта удельного давления на зуб:

$$\sigma_H = \frac{K_d \cdot M_H}{K_\varepsilon b m y \pi R_H}, \quad (1)$$

где M_H - момент на валу нагрузки;

R_H - радиус последней шестерни редуктора;

K_d - динамический коэффициент;

K_ε - коэффициент перекрытия;

y - коэффициент формы зуба;

b - ширина шестерни;

m - модуль.

Для цилиндрических, прямозубых шестерён с эвольвентным профилем значения коэффициентов принимают равными:

$$K_d = 1,7; K_\varepsilon = 1,25; y = 0,12; b = (5..10) \cdot m = \Psi \cdot m.$$

Для стальных колёс должно соблюдаться условие:

$$\sigma_H \leq 1400 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2} = 1,372 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 137,2 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}. \quad (2)$$

С учётом (1) и (2) величина модуля оценивается как:

$$m [\text{мм}] \geq \sqrt{0,02635 \frac{M_H [\text{Н} \cdot \text{м}]}{R [\text{м}] \cdot \Psi}}.$$

После оценки и выбора стандартной величины модуля уточняются размеры колёс редуктора. При этом, обязательным является целое

количество зубьев на колесе. Уточняются передаточные числа пар и всего редуктора, рассчитывается приведённый момент инерции редуктора J_p' .

Если на каком-либо этапе расчета редуктора не выполняются какие-либо ограничения (на количество зубьев ведущей шестерни, завышена величина J_p' , число ступеней редуктора очень велико, завышены значения модуля и т.д.), следует изменить исходные данные: число зубьев ведущей шестерни и ее диаметр, величину ψ .

1.3. Проверка пригодности двигателя с рассчитанным редуктором

На этом этапе проводятся все три проверки с уточненным значением i_p и полученной оценкой J_p' :

- по моменту

$$M_{дв} = M_{п} - a\omega_{нм}i_p > \left(J_{дв} + J_p' + J_{тг} + \frac{J_n}{i_p^2\eta} \right) \varepsilon_m i_p + \frac{M_n}{i_p\eta} + M_{\sigma}$$

(величина потерь M_{σ} учитывается только для двигателя постоянного тока);

- по скорости

$$\omega_{нм}i_p \leq (1,1...1,2)\omega_{дв.ном};$$

- по перегреву

$$M_{дв.ном} \geq \sqrt{\left((J_{дв} + J_p' + J_{тг} + \frac{J_n}{i_p^2\eta_h})^2 \varepsilon_m^2 i_p^2 + \frac{M_n^2}{i_p^2\eta_h^2} \right)}.$$

Если все неравенства выполняются, то выбранный двигатель с рассчитанным редуктором подходит для использования его в проектируемой системе. В противном случае выбирается другой двигатель и далее производится расчет нового редуктора.

2. РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ (УМ)

2.1 Следящая система с двигателем постоянного тока

УМ состоит из моста с транзисторными ключами (рис. 2) и блока управления (рис.3). Выходным сигналом УМ является постоянная составляющая напряжения диагонали моста $U_{ум}$, а входным — напряжение предварительного усилителя $U_{пу}$.

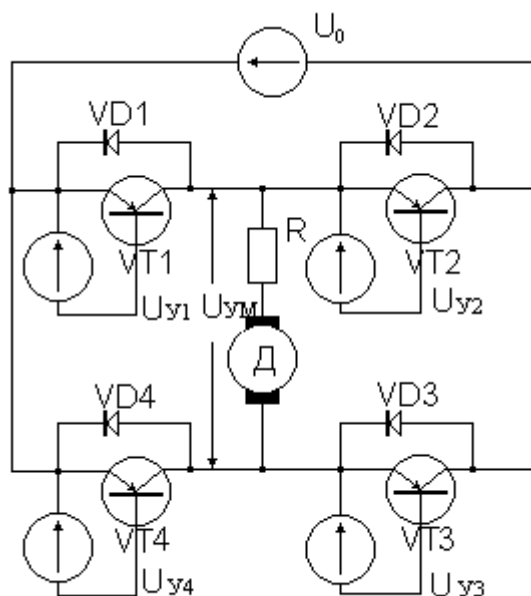


Рис. 2. Мост с транзисторными ключами

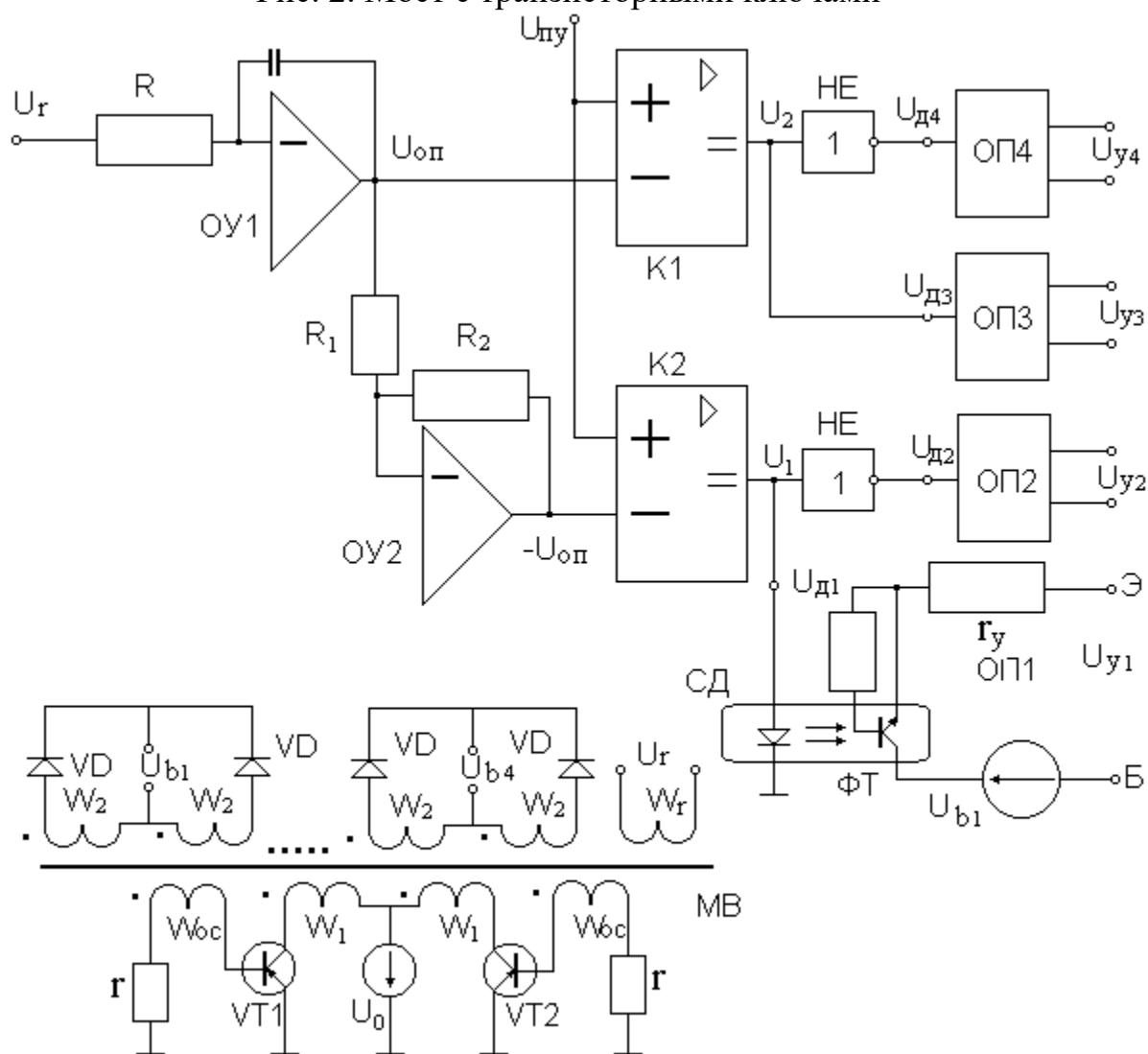


Рис.3 Блок управления

Принимают наибольшую относительную замкнутость ключей моста $\tau_m=0,9$ и наибольшее значение напряжения предварительного усилителя $U_{пу\text{ макс}}=10\text{В}$.

Напряжение питания моста U_0 и максимальный ток коллекторов транзисторных ключей в режиме пуска $I_{k\text{ макс}}$.

$$U_o = \frac{U_{\text{ум}}}{\tau_m}; I_{k\text{ макс}} = \alpha I_{\text{дв. ном.}}$$

Транзисторы моста выбираются из условий:

$$U_{k\text{э доп.}} > U_0; I_{k\text{ доп.}} > I_{k\text{ макс}}; I_{\delta\text{ м}} = I_{k\text{ макс}}/\beta < I_{\text{фт. доп.}},$$

где $I_{\text{фт. доп.}}=0,2\text{А}$ – допустимый ток фототранзистора рекомендуемой оптопары типа АОТ11ОГ.

Напряжение выпрямителей цепей фототранзисторов равно $U_b=10\text{В}$, а добавочные сопротивления выбираются из условия:

$$r_y = U_b/I_{\text{фт. доп.}} < r_y < U_b/I_{\delta\text{ макс.}}$$

Блок управления работает по вертикальному принципу. Мультивибратор МВ, настроенный на частоту $f_0=400\text{Гц}$, вырабатывает на вторичных обмотках напряжение в форме меандра.

Напряжение U_r поступает на вход интегратора, выполненного на операционном усилителе ОУ1. Опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ на выходе интегратора, имеющего пилообразную форму, сравнивается компаратором К1 с напряжением предварительного усилителя.

Широтно-модулированные импульсы подаются на светодиоды оптопары. Для обеспечения требуемого закона модуляции управляющих напряжений ключей моста применяется инвертирование. Опорное напряжение инвертируется инвертором на операционном усилителе ОУ2, а выходные сигналы компараторов логическими элементами «НЕ».

Графики сигналов представлены на рис.4.

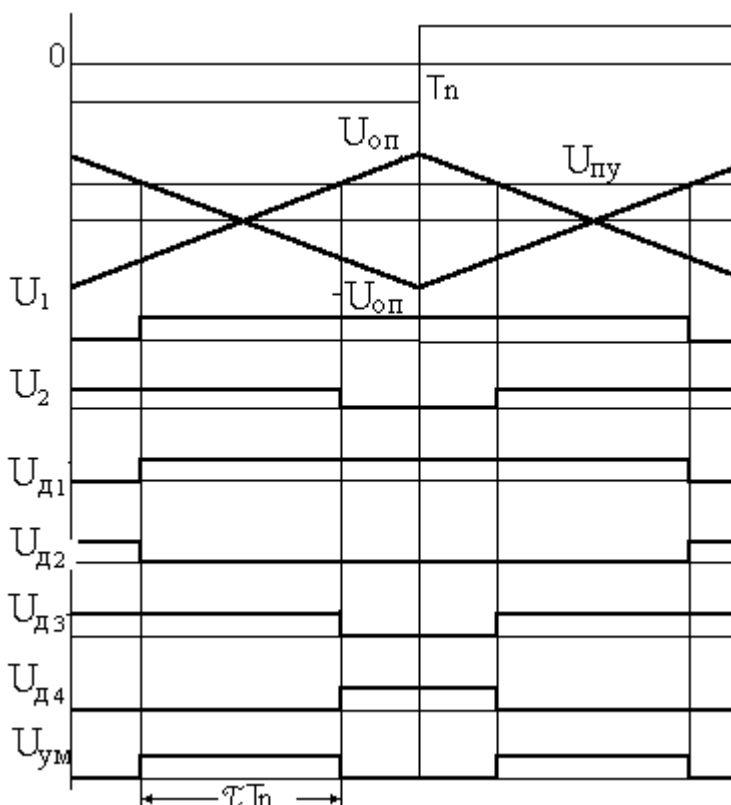


Рис. 4. Графики входных и выходных сигналов

Период чередования импульсов напряжения на нагрузке равен полупериоду меандра $T_m = 1/(2f_0) = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Выходные напряжения компараторов и логических элементов подаются на светодиоды оптопар ОП1-ОП4. Напряжения управления $U_{y1}-U_{y4}$, подводимые к транзисторам моста, повторяют в определенном масштабе форму импульсов на светодиодах $U_{д1}-U_{д4}$ и соответствуют состояниям проводимости транзисторных ключей моста.

Выбирают $U_r = 10 \text{ В}$ и ёмкость интегратора $C = 0,1 \text{ мкф} = 10^{-7} \text{ ф}$.

Амплитуда опорного напряжения равна U_r . Постоянная времени интегратора $T_n = 1/K_n = R \cdot C$ определяется из условия:

$$2 \cdot U_r = \int_0^{T_n} K_n U_r dt.$$

Коэффициент усиления УМ:

$$K_y = U_{ум} / U_{пу \max}.$$

2.2 Следящая система с асинхронным двигателем.

Схема двухтактного транзисторного УМ, работающего в классе В, представлена на рис.5. УМ нагружен на обмотку управления двигателя. Нагрузка замещается последовательно включёнными активным R_y и реактивным X_y сопротивлениями. Входной сигнал на переменном токе поступает от предварительного усилителя, в качестве которого рекомендуется операционный усилитель К140УД7. Напряжение насыщения и допустимое минимальное сопротивление нагрузки операционного усилителя составляют $U_s=11,5В$ и $R_{к\min}=2k\Omega$.

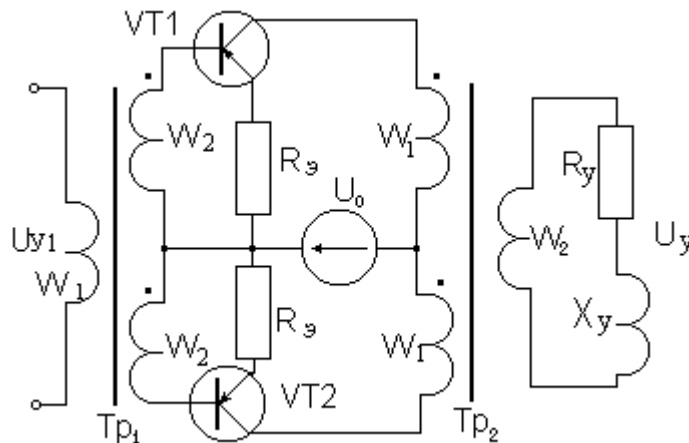


Рис. 5. Схема двухтактного транзисторного УМ

При номинальном напряжении на обмотке управления $U_{y\text{ ном}}$ амплитуда входного сигнала должна быть меньше U_s . Рекомендуется принять наибольшее действующее значение $U_{пу\text{ max}} = 5В$.

Комплексный коэффициент усиления УМ на несущей частоте $\omega_0=2\cdot\pi\cdot f_0$ ($f_0=400$ Гц):

$$W_{\text{ум}}(j\omega) = \frac{\dot{U}_y(j\omega)}{\dot{U}_{\text{пу}}(j\omega)} = K_{\text{ум}} \cdot e^{j\Psi_1(\omega)},$$

где

$$K_{\text{ум}} = \frac{U_{y\text{ ном}}}{U_{\text{пу max}}}; \quad \Psi_1 = \arctg \frac{X_y}{R_y}.$$

Фазовый сдвиг Ψ_1 между входным и выходным сигналами УМ компенсируется фильтром предварительного усилителя. Таким образом, УМ и ПУ можно рассматривать по отношению к огибающей сигналов как безинерционные звенья с коэффициентами усиления $K_{\text{ум}}$ и $K_{\text{пу}}$.

Задаются КПД трансформаторов Tr_1 и Tr_2 :

$$\eta_1 = \frac{R_y \cdot \beta}{R_y \beta + (r_2 + r_1 n_1^2)_{\text{Тр1}}}; \eta_2 = \frac{R_y}{R_y + (r_2 + r_1 n_2^2)_{\text{Тр2}}},$$

где: r_1 и r_2 – сопротивления первичной и вторичной обмоток соответствующих трансформаторов,

$n_1=(w_2/w_1)_{\text{Тр1}}$; $n_2=(w_2/w_1)_{\text{Тр2}}$ – коэффициенты трансформации,

β - коэффициент усиления по току транзистора в схеме с общим эмиттером.

Принимают $R_y' = R_y n_2^2 = 0,1 R_y$ и находят КПД коллекторной цепи.

$$\eta_K = \frac{R_y}{R_y + R_y' + (r_2 + r_1 n_2^2)_{\text{Тр2}}} = \frac{1}{\frac{R_y'}{R_y} + \frac{1}{\eta_2}} = 0,83.$$

Общая мощность нагрузки коллекторной цепи

$$P_y = \frac{U_{yN}^2}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2}} \cos \Psi_1, \quad P_K = \frac{P_y}{\eta_K}.$$

Наибольшая мощность, выделяемая на переходе К-Э транзистора

$$P = \frac{[(U_{yN} - \frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_{yN} \sin \varphi d\varphi) \sqrt{2}]^2}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2} \cdot \eta_K} \cos \Psi_1 =$$

$$= 0,26 \cdot \frac{U_{yN}^2}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2} \cdot \eta_K} \cos \Psi_1 = 0,31 P_K.$$

Транзисторы выбираются из условия $P_{кэдон} \geq P$.

Напряжение питания $U_0 < 0,5 U_{KЭ, доп}$.

$$\text{Коэффициент трансформации Тр2: } n_2 = \frac{\sqrt{2} U_{yN}}{U_0 \eta_K}.$$

Амплитуда токов коллектора и базы:

$$I_{K \max} = \frac{\sqrt{2} n_2 U_{yN}}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2}}; I_{б \max} = \frac{I_{K \max}}{\beta} = \frac{\sqrt{2} n_2 U_{yN}}{\sqrt{R_y^2 + X_y^2} \cdot \beta}.$$

Амплитуда входного напряжения транзистора:

$$U_{\text{вх.транз}} = U_{\text{бэ}} + I_{\text{к макс}} R_{\text{э}} \approx I_{\text{к макс}} R_{\text{э}} = \frac{n_2 \sqrt{2} U_{\text{ум}} R_{\text{э}}}{Z_{\text{у}}}.$$

Коэффициент трансформации Tr_1 :

$$n_1 = \frac{U_{\text{вх.транз}}}{U_{\text{пу макс}} \eta_{\text{л}}} = \frac{n_2 U_{\text{уН}} R_{\text{э}}}{Z_{\text{у}} U_{\text{пу макс}} \eta_{\text{л}}}.$$

Амплитуда тока $I_{1\text{м}}$ первичной обмотки трансформатора Tr_1 :

$$\frac{I_{1\text{макс}}}{n_1} = I_{\text{б макс}} = \frac{I_{\text{к макс}}}{\beta} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{уН}} n_2}{Z_{\text{у}} \beta}; \quad I_{10} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{уН}} n_2 n_1}{Z_{\text{у}} \beta}.$$

Входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{пу макс}}}{I_{1\text{макс}}}$ должно быть более 2кОм.

Если $R_{\text{вх}}$ меньше этого значения, то для развязки используют эмиттерный повторитель (рис.16).

3. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ НЕСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

3.1. Функциональная схема разомкнутой нестабилизированной системы

Для системы с двигателем постоянного тока эта схема представлена на рис.6. В нее входят измерительное устройство ИУ, демодулятор ДМ, предварительный усилитель ПУ, усилитель мощности УМ, двигатель ДВ, редуктор Р и нагрузка Н.

Для системы с асинхронным двигателем первоначально рассматриваемая функциональная схема не содержит демодулятора ДМ.

В расчетах принимаем ИУ, ДМ, ПУ, УМ и Р безинерционными элементами с соответствующими коэффициентами передачи: $K_{\text{иу}}$, $K_{\text{дм}}$, $K_{\text{пу}}$, $K_{\text{ум}}$, $K_{\text{р}} = 1/i_{\text{р}}$.

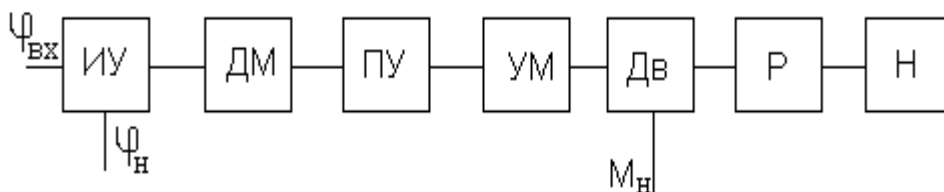


Рис. 6

3.2. Структурная схема и передаточная функция двигателя с учётом редуктора и нагрузки

3.2.1. Двигатель постоянного тока

Уравнения динамики двигателя при якорном управлении имеют вид:

$$\begin{aligned} U_{\text{у}} &= (R_{\text{доб}} + r_{\text{я}})i + C_e \omega_{\text{дв}}; \\ M_{\text{эм}} &= C_e i; \\ M_{\text{эм}} &= M_{\sigma} + (J_{\text{дв}} + J_{\text{р}}' + J_{\text{тг}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_{\text{р}}^2 \cdot \eta}) \frac{d\omega_{\text{н}}}{dt} i_{\text{р}} + \frac{M_{\text{н}}}{i_{\text{р}} \eta}. \end{aligned} \quad (3)$$

На основе (3) получаем дифференциальное уравнение, описывающее динамику двигателя:

$$T_{\text{дв}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_{\text{дв}} U_{\text{ус}} - k_{\text{м}} (M_{\sigma} + \frac{1}{i_{\text{р}} \eta} M_{\text{н}}),$$

где $T_{\text{дв}} = \frac{(R_{\text{доб}} + r_{\text{я}})}{C_e^2} (J_{\text{дв}} + J_{\text{р}}' + J_{\text{тг}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_{\text{р}}^2 \eta})$ - постоянная времени двигателя;

$$\begin{aligned} k_{\text{дв}} &= \frac{1}{C_e} - \text{коэффициент передачи двигателя по напряжению}; \\ k_{\text{м}} &= \frac{(R_{\text{доб}} + r_{\text{я}})}{C_e^2} - \text{коэффициент передачи двигателя по моменту}. \end{aligned}$$

Переход к преобразованию Лапласа приводит к уравнению двигателя с учетом редуктора и нагрузки, связывающее угол поворота нагрузки, напряжения управления и момента нагрузки:

$$\omega_{\text{н}}(p) = \frac{k_{\text{дв}} U_{\text{ум}}(p) - k_{\text{м}} (M_{\sigma} + \frac{1}{i_{\text{р}} \eta} M_{\text{н}}(p))}{p(T_{\text{дв}} p + 1) i_{\text{р}}}.$$

Структурная схема двигателя постоянного тока с учётом редуктора и нагрузки показана на рис. 7:

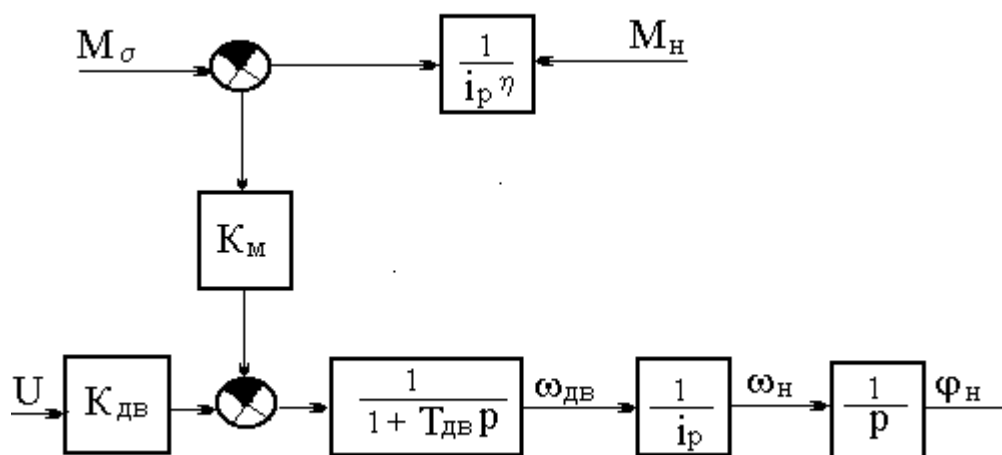


Рис. 7

3.2.2. Асинхронный двигатель

Динамика асинхронных двигателей в пределах скоростей

$$0 < \omega_{\text{дв}} < (1,1 \dots 1,3) \omega_{\text{н}}$$

аппроксимируется системой уравнений

$$M_{\text{дв}} = bU_y - a\omega_{\text{дв}};$$

$$M_{\text{дв}} = \left(J_{\text{дв}} + J_{\text{р}}' + J_{\text{тг}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_{\text{р}}^2 \eta} \right) \varepsilon_{\text{нм}} i_{\text{р}} + \frac{M_{\text{н}}}{i_{\text{р}} \eta}, \quad (4)$$

где $b = M_{\text{пуск}} / U_{\text{ус.ном}}$; $a = \frac{M_{\text{пуск}} - M_{\text{ном}}}{\omega_{\text{дв.ном}}}$; $M_{\text{ном}} = \gamma M_{\text{пуск}}$;

$$\omega_{\text{ном}} = \gamma \omega_{\text{хх}} ; \quad \gamma^2 M_{\text{пуск}} = P_{\text{ном}}.$$

На основании (4) получается дифференциальное уравнение, описывающее динамику асинхронного двигателя:

$$T_{\text{дв}} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} + \omega_{\text{дв}} = k_{\text{дв}} U_{\text{у}} - k_{\text{м}} \frac{M_{\text{н}}}{i_{\text{р}} \eta},$$

где $T_{\text{дв}} = \frac{J_{\text{дв}} + J_{\text{р}}' + J_{\text{тг}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_{\text{р}}^2 \eta}}{a}$ - постоянная времени двигателя;

$K_{\text{дв}} = b/a$ - коэффициент передачи двигателя по напряжению;

$K_{\text{м}} = 1/a$ - коэффициент передачи двигателя по моменту.

Решение системы (4) и переход к преобразованию Лапласа приводит к аналогичным связям и передаточным функциям, что и для двигателя постоянного тока:

$$\varphi_{\text{н}}(p) = \frac{K_{\text{дв}} U_{\text{ум}}(p) - K_{\text{м}} \frac{1}{i_{\text{р}} p} M_{\text{н}}(p)}{p(T_{\text{дв}} p + 1) i_{\text{р}}}.$$

На рис. 8 показана структурная схема асинхронного двигателя с учётом редуктора и нагрузки:

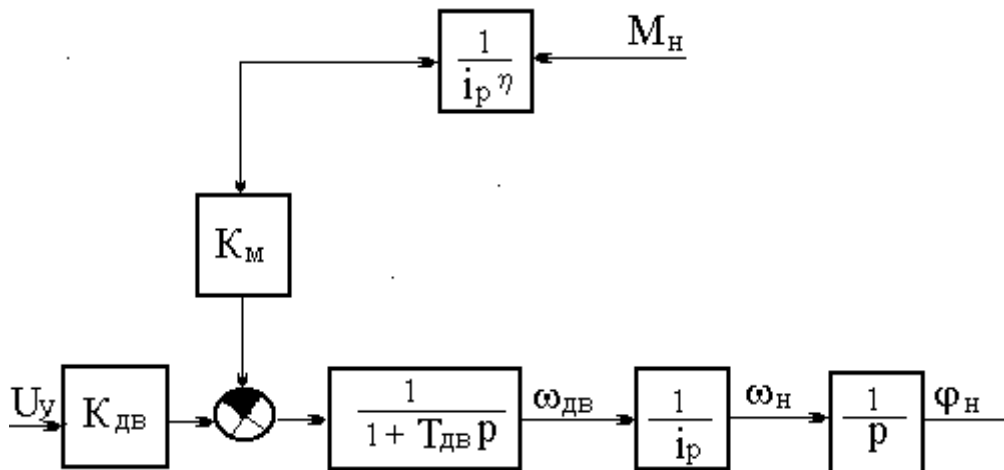


Рис.8

3.3. Оценка общего коэффициента передачи разомкнутой системы

Передающая функция разомкнутой системы с двигателем постоянного тока имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{p(T_m p + 1)}, \quad \text{где } K_p = K_{иу} K_{дм} K_{пу} K_{ум} K_{дв} 1/i_p.$$

Для системы с асинхронным двигателем в составе K_p отсутствует $K_{дм}$. Величина общего коэффициента передачи системы K_p определяет точность системы при отработке типовых входных воздействий системы. Задать тот или иной коэффициент можно изменением коэффициента передачи предварительного усилителя $K_{пу}$.

В режиме равномерной заводки ошибка системы $\delta_{сист}$ складывается из трех составляющих: ошибки измерителя рассогласования $\delta_{иу}$, статической ошибки $\delta_{ст}$ и кинетической ошибки $\delta_{кин}$.

Люфтом редуктора в расчетах пренебрегаем.

$$\delta_{сист} = \delta_{иу} + \delta_{ст} + \delta_{кин},$$

где $\delta_{иу} = \sqrt{\delta_{сд}^2 + \delta_{сп}^2}$, $\delta_{сд}$ – ошибка сельсина-датчика,
 $\delta_{сп}$ – ошибка сельсина-приемника.

В установившемся режиме

$$\delta_{ст} = M_{\sigma} \frac{k_m}{i_p K_p} + M_n \frac{k_m}{i_p^2 \eta K_p};$$

$$; \delta_{кин} = \frac{\omega_{нм}}{K_p};$$

$$K_p > \frac{M_n k_m + i_p^2 \eta \omega_{нм} + M_{\sigma} i_p \eta K_m}{i_p^2 \eta (\delta_{сист} - \delta_{иу})}. \quad (5)$$

В случае использования асинхронного двигателя в приведённых соотношениях (5), отсутствуют слагаемые с M_{σ} .

Полученное соотношение, в зависимости от класса точности сельсинов измерителя рассогласования, даёт возможность оценить три возможных значения K_p .

Динамическая ошибка $\delta_{дин}(t)$ системы определяется при отработке синусоидального воздействия с параметрами эквивалентной синусоиды $\varphi(t) = A \sin \Omega t$, которые находятся из системы уравнений:

$$\varepsilon_{\text{нм}} = A\Omega^2; \quad \omega_{\text{нм}} = A\Omega.$$

Динамическая ошибка меняется во времени по гармоническому закону с амплитудой $\delta_{\text{дин}}$, Поэтому в расчете амплитудное значение этой ошибки связано с параметрами эквивалентной синусоиды в виде:

$$\delta_{\text{дин}} \cong \frac{A}{|W_p(j\Omega)|}.$$

Это соотношение определяет положение модуля частотной характеристики на частоте Ω :

$$|W_p(j\Omega)| \geq \frac{A}{\delta_{\text{дин}}}. \quad (6)$$

Полученные соотношения (5-6) задают на логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) разомкнутой системы четыре контрольных точки. Причём на частоте $\Omega = 1$ [1/с] откладываются 3 точки, определяемые (5) и одна точка на частоте $\omega = \Omega$, определяемая (6). ЛАЧХ разомкнутой нескорректированной системы должна проходить выше контрольных точек. На рис. 9 показана ЛАЧХ системы, в которой измерительное устройство выполнено на сельсинах 2-го класса (точка 2)

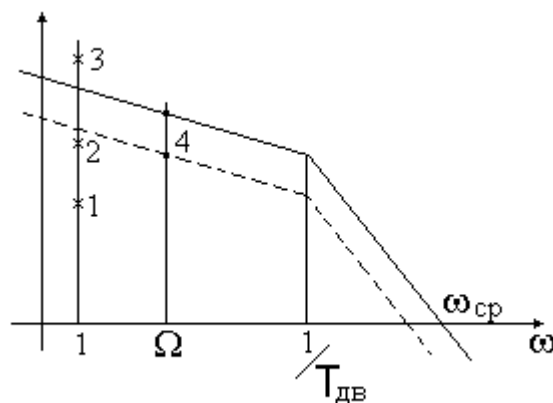


Рис. 9

Измеритель рассогласования третьего класса требует слишком большого K_p (точка 3). Если выбрать измеритель на сельсинах первого класса, то K_p нельзя снизить, так как ЛАЧХ должна проходить не ниже точки 4, как показано пунктирной линией.

После оценки требуемого значения K_p определяется частота среза $\omega_{ср}$ путем решения уравнения:

$$\left| \frac{K_p}{j\omega_{ср} (T_{дв} j\omega_{ср} + 1)} \right| = 1.$$

и далее оценивается запас по фазе на частоте среза разомкнутой системы

Если $\varphi_3 \leq \frac{\pi}{4}$, то необходимо решить вопрос о синтезе корректирующей обратной связи.

4. КОРРЕКЦИЯ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

/

4.1. Исходная ЛАЧХ

Исходная ЛАЧХ разомкнутой системы, проходящая выше контрольных точек, характеризуется требуемым минимально допустимым коэффициентом передачи K_p и частотой среза $\omega_{ср}$, которая определяет полосу пропускания системы и её быстродействие. Время переходного процесса системы оценивается по формуле

$$t_p \leq \frac{(2 - 4)\pi}{\omega_{ср}}.$$

Если быстродействие системы оценивается как недостаточное, то следует увеличить K_p , что приведёт к увеличению $\omega_{ср}$ и быстродействия.

4.2. Коррекция с помощью гибкой обратной связью (для системы с двигателем постоянного тока)

На рис. 10 показана структурная схема скорректированной системы, параметры которой определяются зависимостями:

$$K_1 = K_{\text{иу}} K_{\text{дм}}; \quad W_{\text{ос}}(p) = \frac{p K_{\text{п}} K_{\text{ос}}}{T_{\text{ос}} p + 1};$$

$$W_2(p) = \frac{K_{\text{пу}} K_{\text{ум}} K_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}} p + 1}.$$

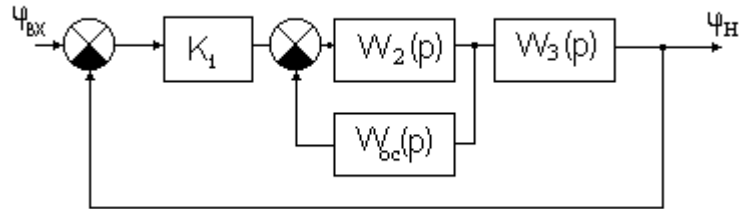


Рис. 10

На рис. 11 показана ЛАЧХ исходной (L_p) и скорректированной (желаемой) ($L_{\text{ж}}$) системы и даны характеристики охватываемой части структуры L_1 и обратной связи $L_{\text{ос}}$.

ЛАЧХ скорректированной системы совпадает с ЛАЧХ исходной системы на частотах:

$$\omega < \omega_1 \text{ и } \omega > \omega_3.$$

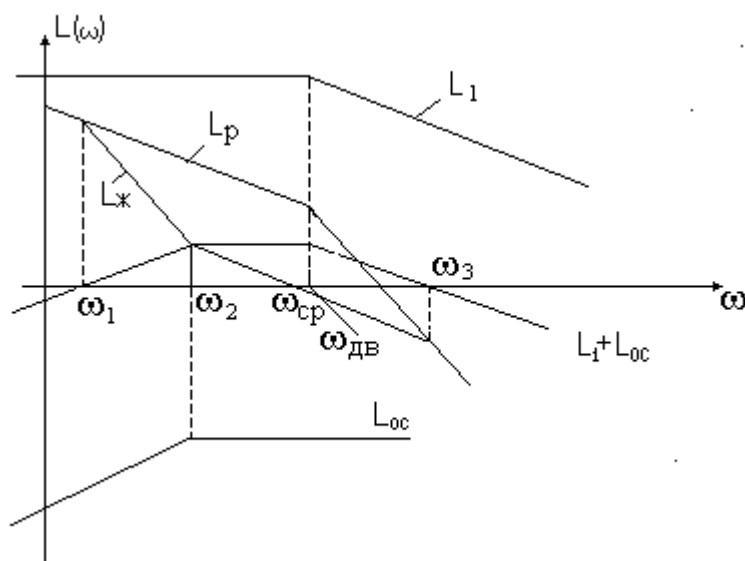


Рис. 11

Передаточная функция скорректированной системы:

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{K_p(T_2 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)},$$

где $T_1 = \frac{1}{\omega_1}; T_2 = \frac{1}{\omega_2}; T_3 = \frac{1}{\omega_3}.$

Для обеспечения требуемого запаса на частоте среза скорректированной системы следует точки излома $L_{\text{ж}}$ выбирать из условий:

$$\frac{1}{T_2} \leq 0,3\omega_{\text{ср}}; \quad \omega_{\text{ср}} \leq 0,3 \frac{1}{T_3}.$$

Следует обратить внимание на то, что частота среза скорректированной системы всегда меньше частоты среза исходной системы. Кроме этого, четвертая контрольная точка, определяющая точность системы, при синусоидальном входном сигнале должна обязательно располагаться ниже $L_{\text{ж}}$.

Из рис. 11 следует, что на частоте ω_1

$$T_{\text{oc}} = T_2[\text{с}]; \quad K_{\text{oc}} \cong \frac{1}{K_{\text{т}} K_{\text{пу}} K_{\text{ум}} K_{\text{дв}} \omega_{11}}.$$

4.3 Коррекция с помощью жёсткой обратной связи (для системы с асинхронным двигателем)

Структура исходной системы совпадает со схемой для системы с коррекцией гибкой обратной связью с одной лишь разницей, что в системе отсутствует демодулятор, а вместо него вводится дополнительный предварительный усилитель $K_{\text{пу1}}$. В состав $W_2(p)$ входит предварительный усилитель $K_{\text{пу2}}$.

$$W_3(p) = \frac{1}{i_p p}; \quad W_2(p) = \frac{K_{\text{пу2}} K_{\text{ум}} K_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}} p + 1};$$

$$K_1 = K_{\text{иу}} K_{\text{пу1}}; \quad W_{\text{oc}}(p) = K_{\text{т}} K_{\text{oc}}.$$

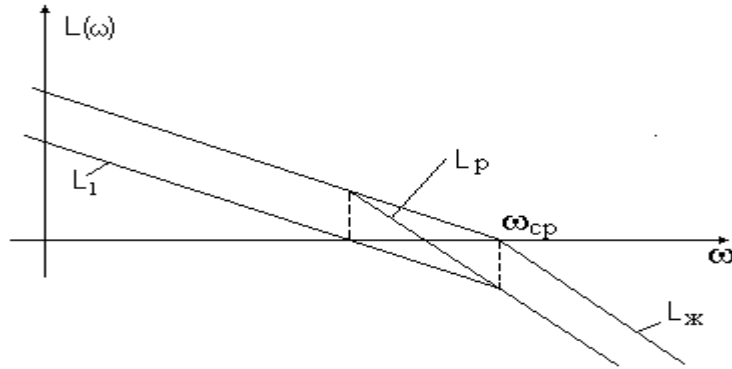


Рис.12

На рис.12 показаны ЛАЧХ исходной системы (L_p), ЛАЧХ скорректированной (желаемой) ($L_{ж}$) системы и ЛАЧХ системы после введения жёсткой обратной связи, но без дополнительного предварительного усилителя ($K_{пу} = 1$).

Для L_p известно значение K_p .

В скорректированной системе для обеспечения требуемого запаса по фазе на частоте среза реализуют

$$\omega_{cp} = K_p [1/c]$$

Введение жёсткой обратной связи уменьшает постоянную времени исходной системы:

$$\frac{1}{K_p} = T_{ж} = \frac{1}{\omega_{cp}} = \frac{T_{дв}}{1 + K_{пу2} K_{ум} K_{дв} K_{тп} K_{ос}},$$

где $K_{пу2} = K_{пу}$ исходной системы.

Во столько же раз уменьшается и общий коэффициент усиления разомкнутой системы:

$$K_1 = \frac{K_p}{1 + K_{пу2} K_{ум} K_{дв} K_{тп} K_{ос}}.$$

Отсюда находится

$$K_{пу1} = 1 + K_{пу2} K_{ум} K_{дв} K_{тп} K_{ос}.$$

Следует обратить внимание, что полоса пропускания системы, скорректированной с помощью жёсткой обратной связи, расширяется и, следовательно, растет быстродействие системы.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ

5.1. Предварительный усилитель для СС с двигателем постоянного тока

Параметры цепи обратной связи находятся после уточнения всех коэффициентов прямой цепи канала передачи сигнала ошибки от измерительного устройства до входа усилителя мощности. Сигнал с сельсина приёмника (СП) проходит через ограничитель, показанный на рис. 13. Он состоит из балластного резистора R_6 и двух встречно включенных стабилитронов VD1 и VD2.

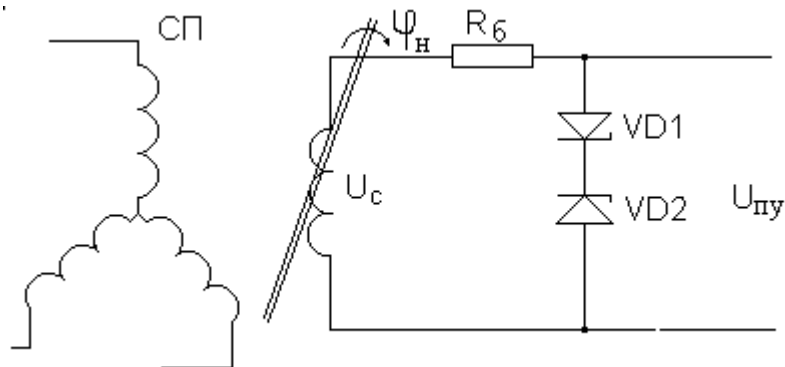


Рис.13

Оценка величины R_6 делается из условия ограничения тока через стабилитрон при максимальном напряжении, снимаемом с выхода СП:

$$R_6 \geq \frac{U_{\text{СП max}} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст max}}},$$

где $U_{\text{ст}}$ - напряжение стабилизации; $I_{\text{ст}}$ - ток стабилизации; $U_{\text{ст max}} = 36$ В

Выбор R_6 и типа стабилитрона должен обеспечивать ограничение $U_{\text{пу}}$ по модулю до 10 В. Ограничитель в линейной зоне не влияет на величину коэффициента передачи измерителя рассогласования.

В качестве демодулятора может быть использована любая схема как на диодах, так и на транзисторах. На рис. 14 в качестве примера представлена схема однополупериодного демодулятора на микросхеме типа 1КТ01А(Б).

Коэффициент передачи такого демодулятора при условии, что коэффициент передачи $K_{\text{ТР1}}$ равен 1, составляет

$$K_{\text{дм}} = \frac{1}{\pi} = 0,318.$$

На выходе демодулятора стоит сглаживающий фильтр на резисторе $R_{\text{ф}}$ и конденсаторе $C_{\text{ф}}$.

Выбор элементов фильтра должен обеспечивать ослабление амплитуды первой гармоники на выходе фильтра не менее, чем в 10 раз:

$$\frac{1}{10 \cdot \omega_{\text{ср}}} \geq T_{\phi} = R_{\phi} C_{\phi} \geq \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{сети}}}.$$

Предварительный усилитель строится на базе операционного усилителя типа К140УД7. Схема его показана на рис. 15. Этот усилитель имеет два входа. По первому входу реализуется коэффициент

передачи: $K_{\text{пу}} = \frac{R}{R_1}.$

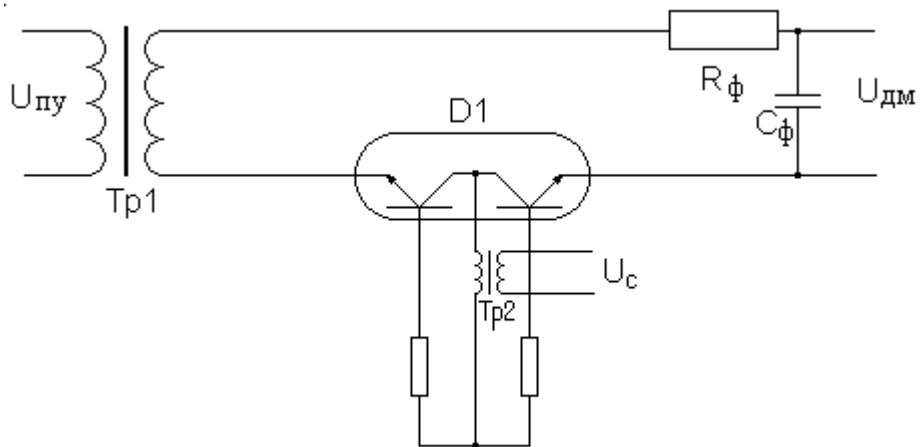


Рис.14

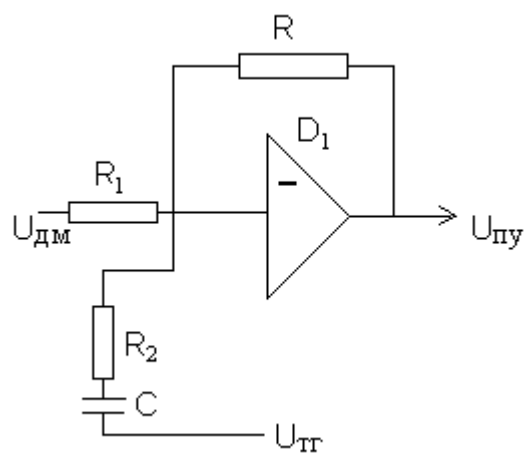


Рис. 15

По второму входу реализуется передаточная функция цепи обратной связи

$$W_{oc}(p) = \frac{K_{oc}p}{T_{oc}p + 1} = \frac{CRp}{CR_2p + 1}.$$

При расчете параметров усилителя имеет смысл задаться сначала величиной R в пределах 10 кОм. Номиналы остальных элементов определяются однозначно и далее уточняются в соответствии со шкалой номиналов.

5.2. Предварительный усилитель для СС с асинхронным двигателем

В составе следящей системы с асинхронным двигателем отсутствует демодулятор. Поэтому напряжение с выхода измерительного устройства через амплитудный ограничитель (см. рис. 13.) подается на вход предварительного усилителя, показанного на рис. 16. Элементы ограничителя и его параметры определяются так же как и для СС с двигателем постоянного тока.

Предварительный усилитель удобно строить на двух операционных усилителях типа К140УД7. На первом усилителе ($D1$) имеется два входа. На первый вход поступает сигнал с измерительного устройства. При этом реализуется коэффициент передачи $K_{пу1} = \frac{R_o}{R_1}$.

По второму входу реализуется коэффициент передачи по тракту обратной связи:

$$K_{oc} = \frac{R_o}{R_2}.$$

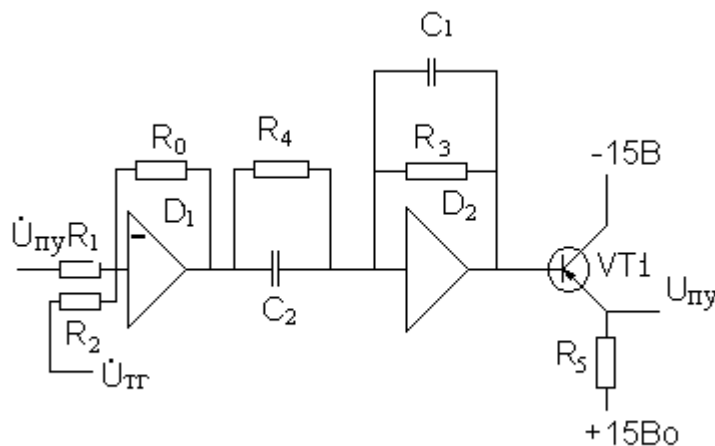


Рис. 16

Целесообразно задаться величиной $R_0 = 10 \text{ кОм}$. Значения сопротивлений входных резисторов определяются по известным значениям $K_{пу1}$ и $K_{ос}$ и уточняются в соответствии со шкалой номиналов резисторов.

На втором операционном усилителе (D2) реализуется передаточная функция устройства, компенсирующего фазовый сдвиг несущей частоты на обмотке управления асинхронного двигателя:

$$W_2(p) = \frac{R_3}{R_4} \frac{C_2 R_4 p + 1}{C_1 R_3 p + 1}$$

$$C_2 R_4 = \frac{X_y}{R_y 2\pi f_{\text{сети}}}; \quad K_{пу2} = \frac{R_3}{R_4}; \quad C_1 R_3 \leq 0,1 \frac{X_y}{R_y 2\pi f_{\text{сети}}}.$$

Постоянная времени $C_1 \cdot R_3$ вводится для ограничения усиления высокочастотных помех усилителя.

Если входное сопротивление усилителя мощности менее 2 кОм, то на выходе предварительного усилителя ставится эмиттерный повторитель на транзисторе VT1.

Входное сопротивление эмиттерного повторителя оценивается как:

$$R_{\text{эп}} = \frac{R_3 R_{\text{вх}}}{R_3 + R_{\text{вх}}} \beta.$$

Если максимальная амплитуда выходного сигнала операционного усилителя составляет $U = 10 \text{ В}$, то на выходе эмиттерного повторителя она должна быть не менее 5 В. Это позволяет выбрать величину R_3 :

$$U \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_3} \geq 5.$$

Имеет смысл выбрать $R_3 \approx R_{\text{вх}}/2$ и уточнить в соответствии со шкалой номиналов. Все расчёты могут проводиться в размерности [кОм].

Транзистор выбирают из условий:

$$P_{\text{кэ макс}} \geq \frac{2U^2}{R_{\text{вх}}}; \quad \beta \geq \frac{R_3 + R_{\text{вх}}}{R_3 R_{\text{вх}}} 2.$$

6. ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Пояснительная записка должна содержать развёрнутый текст с расчётами, частотные характеристики, структурную и принципиальную схему системы, схему модели и результаты моделирования по оценке параметров переходного процесса скорректированной системы и ошибок в типовых режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Основы** проектирования следящих систем/ Под ред. Н.А.Лакоты. М.: Машиностроение, 1978
2. **Сабинин** Ю.А. Электромашинные устройства автоматики. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Теория автоматического управления./под ред. А.В.Нетушила. М.: Высш. школа, 1978. Ч1.; 1983. ч.2.

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ	3
Варианты заданий и технические данные элементов следящей системы	4
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	
1 Выбор типоразмера двигателя и передаточного числа редуктора i_p	8
1.1 Предварительная оценка передаточного числа редуктора	8
1.1.1 Следящая система с двигателем постоянного тока	8
1.1.2 Следящая система с двигателем переменного тока	9
1.2 Расчет редуктора с цилиндрическими колёсами	10
1.3 Проверка пригодности двигателя с учетом редуктора	13
2 Расчёт усилителя мощности (УМ)	14
2.1 Следящая система с двигателем постоянного тока	14
2.2 Следящая система с асинхронным двигателем	17
3 Передаточная функция разомкнутой нестабилизированной системы	19
3.1 Функциональная схема разомкнутой нестабилизированной системы	19
3.2 Структурная схема и передаточная функция двигателя с учетом редуктора и нагрузки	20
3.2.1 Двигатель постоянного тока	20
3.2.2 Асинхронный двигатель	21
3.3 Оценка общего коэффициента передачи разомкнутой системы	22
4 Коррекция следящей системы с использованием локальных обратных связей	25
4.1 Исходная ЛАЧХ	25
4.2 Коррекция с помощью ГОС	25
4.3 Коррекция с помощью ЖОС	27
5 Определение параметров предварительного усилителя	29
5.1 Предварительный усилитель для СС с двигателем постоянного тока	29
5.2 Предварительный усилитель для СС с асинхронным двигателем	31
6 Оформление	33
Литература	33