



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Приборостроение»

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к курсовой работе по дисциплине

# **«Основы автоматического управления»**

Авторы  
Цыбрий И.К.  
Сыроватка В.Н.

Ростов-на-Дону, 2014



## Аннотация

Методические указания предназначены для студентов направления 200100.62 очной, заочной форм обучения.

## Автор

к.т.н., доцент  
Цыбрий И.К.

доцент  
Сыроватка В.Н.





## Оглавление

<b>1. Общие положения.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Методические указания к заданию 1. ....</b>	<b>5</b>
<b>3. Методические указания к заданию 2. ....</b>	<b>12</b>
<b>4. Методические указания к заданию 3. ....</b>	<b>17</b>
<b>Список использованных источников .....</b>	<b>32</b>



## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

Курсовая работа предназначена для:

- проверки усвоения студентами теоретического материала;
- получения навыков построения и преобразования структурных схем сложных многоконтурных замкнутых систем автоматического управления;
- получения навыков построения и анализа динамических характеристик корректирующих цепей, а также для определения устойчивости систем автоматического управления;
- получения навыков грамотного описания полученных результатов.

Курсовая работа состоит из трех заданий, тематика которых охватывает все разделы курса «Основы автоматического управления».

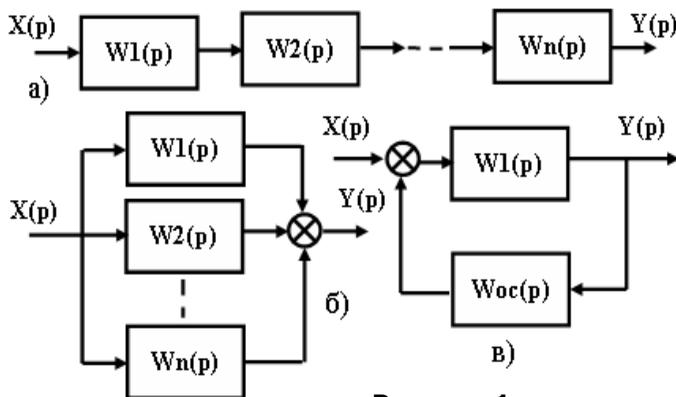
Вариант задания выбирается по номеру группы и номеру студента в списке группы. Например, для студента группы ПБПЗ1, номер которого в списке группы 15, вариант задания будет выглядеть следующим образом: 2.15.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАНИЮ 1.

Первое задание выбранного варианта заключается в проведении преобразования структурной схемы системы автоматического управления с целью ее упрощения, получения передаточной функции системы как совокупности передаточных функций составляющих ее звеньев и определения устойчивости системы.

При выполнении задания необходимо учитывать правила преобразования структурных схем, основные из которых приводятся ниже.

Структурная схема САУ в простейшем случае строится из элементарных динамических звеньев. Но несколько элементарных звеньев могут быть заменены одним звеном со сложной передаточной функцией.



**Рисунок 1**

Последовательное соединение, когда выходная величина предшествующего звена подается на вход последующего, преобразуется в эквивалентное звено с передаточной функцией, равной произведению передаточных функций отдельных звеньев

(рисунок 1,а):  $W_{\text{эKB}}(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p)$ .

Параллельно-согласное соединение, когда на вход каждого звена подается один и тот же сигнал, а выходные сигналы складываются, преобразуется в звено с передаточной функцией, равной сумме передаточных функций отдельных звеньев (рисунок

$$1,6): W_{\text{экв}}(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p).$$

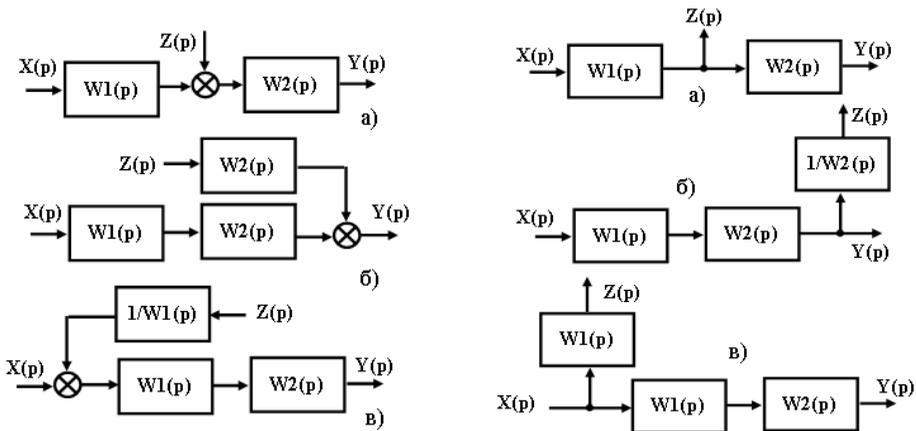
Параллельно-встречное соединение, когда звено охвачено положительной или отрицательной обратной связью, преобразуется (рисунок 1,в) в звено с передаточной функцией:

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{W(p)}{1 \pm W(p)W_{\text{ос}}(p)}.$$

Если многоконтурная система имеет перекрещивающиеся связи, то для вычисления  $W_{\text{экв}}$  нужны дополнительные правила.

В системе на рисунке 2,а при переносе сумматора через звено по ходу сигнала необходимо добавить звено с передаточной функцией того звена, через которое переносится сумматор (рисунок 2,б). Если сумматор переносится против хода сигнала, то добавляется звено с передаточной функцией, обратной передаточной функции звена, через которое переносим сумматор (рисунок 2,в).

При переносе узла через звено по ходу сигнала добавляется звено с передаточной функцией, обратной передаточной функции звена, через которое переносим узел. Если узел переносится против хода сигнала, то добавляется звено с передаточной функцией звена, через которое переносится узел.



**Рисунок 2**

Используя вышеописанные правила преобразования, можно многоконтурную систему автоматического регулирования привести к одному динамическому звену со сложной передаточной

функцией.

Преобразование начинается с внутренних контуров управления.

Каждый этап преобразования должен сопровождаться соответствующей структурной схемой. Если нет специального указания, все обратные связи в системе считать отрицательными.

Для определения устойчивости может быть использован один из двух критериев: критерий Гурвица или критерий Михайлова. Оба критерия базируются на анализе характеристического уравнения системы.

Согласно критерию устойчивости Гурвица из коэффициентов характеристического уравнения  $a_0p^n + a_1p^{n-1} + \dots + a_{n-1}p + a_n = 0$  строится определитель Гурвица по алгоритму:

- по главной диагонали слева направо выставляются все коэффициенты характеристического уравнения от  $a_1$  до  $a_n$ ;
- от каждого элемента диагонали вверх и вниз достраиваются столбцы определителя так, чтобы индексы убывали сверху вниз;
- на место коэффициентов с индексами меньше нуля или больше  $n$  ставятся нули.

Для того, чтобы САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все диагональные миноры определителя Гурвица были положительны.

При использовании частотного критерия устойчивости Михайлова для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы ее характеристический вектор при изменении частоты от 0 до  $+\infty$  повернулся в положительном направлении (против часовой стрелки), начиная с положительной вещественной оси на число квадрантов, равное порядку характеристического уравнения.

Характеристический вектор или годограф Михайлова строится на комплексной плоскости, для чего предварительно разделяют характеристический полином на действительную и мнимую части и, подставляя в полученные выражения  $\omega$  от 0 до  $\infty$ , проверяют соответствие полученного годографа критерию устойчивости Михайлова.

Исходные данные для выполнения второго задания курсовой работы выбираются из таблицы 1 в соответствии с вариантом курсовой работы.

Передаточные функции звеньев, входящих в систему:

$$W1(p) = k_1$$

$$W3(p) = \frac{k_2}{(T_3p + 1)}$$

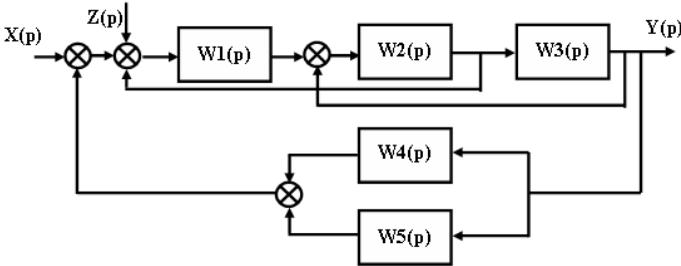
$$W5(p) = \frac{(p + 1)}{(T_5p + 1)}$$

$$W2(p) = \frac{1}{(T_1^2p^2 + T_2p + 1)}$$

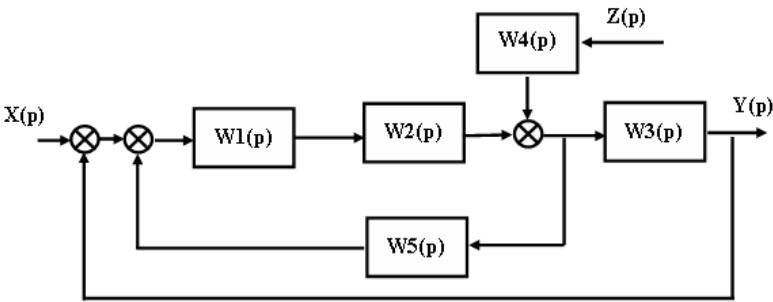
$$W4(p) = 1/T_4p$$

$$W6(p) = k_3$$

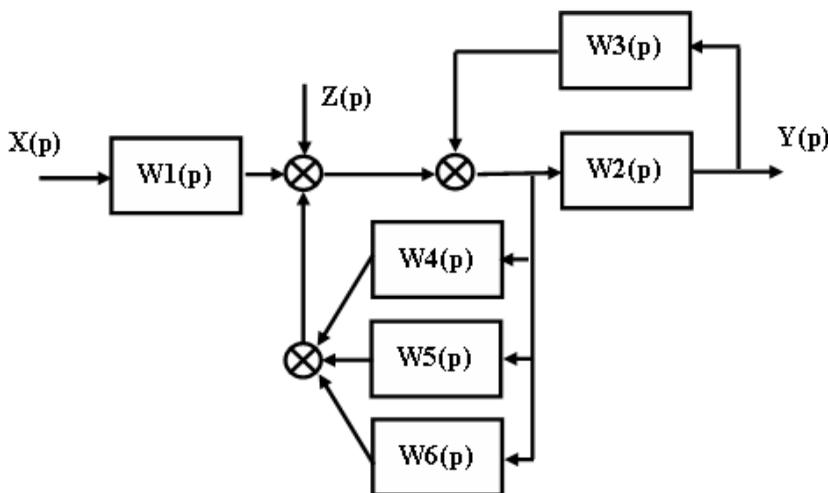
**Расчетные схемы САУ**



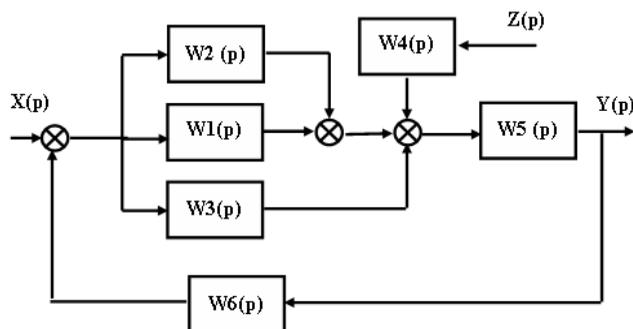
Расчетная схема 1



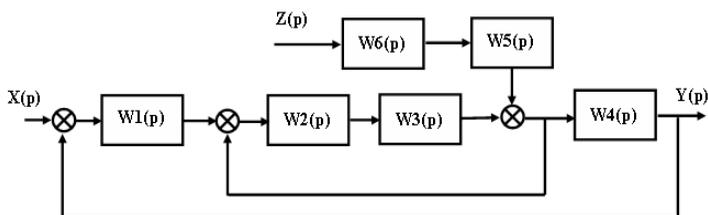
Расчетная схема 2



Расчетная схема 3



Расчетная схема 4



Расчетная схема 5

Таблица 1. Исходные данные для выполнения задания 1

Схема	Вариант	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$T_{1,C}$	$T_{2,C}$	$T_{3,C}$	$T_{4,C}$	$T_{5,C}$

Теория менеджмента: теория организации

1	1.1	50	1	-	0.01	0.25	0.1	0.3	2.7
	1.2	80	2	-	0.02	0.2	0.2	0.4	2.6
	1.3	110	3	-	0.03	0.15	0.3	0.5	2.5
	1.4	140	4	-	0.04	0.1	0.4	0.6	2.4
	1.5	170	5	-	0.05	0.05	0.5	0.7	2.3
2	1.6	50	6	-	0.01	0.25	0.6	0.8	2.2
	1.7	80	7	-	0.02	0.2	0.7	0.9	2.1
	1.8	110	8	-	0.03	0.15	0.8	1	2
	1.9	140	9	-	0.04	0.1	0.9	1.1	1.9
	1.10	170	10	-	0.05	0.05	1	1.2	1.8
3	1.11	50	11	-	0.01	0.25	0.1	1.3	1.7
	1.12	80	12	-	0.02	0.2	0.2	1.4	1.6
	1.13	110	13	-	0.03	0.15	0.3	1.5	1.5
	1.14	140	14	-	0.04	0.1	0.4	1.6	1.4
	1.15	170	15	-	0.05	0.05	0.5	1.7	1.3
4	1.16	50	16	-	0.01	0.25	0.6	1.8	1.2
	1.17	80	17	-	0.02	0.2	0.7	1.9	1.1
	1.18	110	18	-	0.03	0.15	0.8	2	1
	1.19	140	19	-	0.04	0.1	0.9	2.1	0.9
	1.20	170	20	-	0.05	0.05	1	2.2	0.8
5	1.21	50	21	10	0.01	0.25	0.5	2.3	0.7
	1.22	80	22	20	0.02	0.2	0.6	2.4	0.6
	1.23	110	23	30	0.03	0.15	0.7	2.5	0.5
	1.24	140	24	40	0.04	0.1	0.8	2.6	0.4
	1.25	170	25	50	0.05	0.05	0.9	2.7	0.3
1	2.1	170	25	-	0.05	0.05	1	2.7	2.7
	2.2	140	24	-	0.04	0.1	0.1	2.6	2.6
	2.3	110	23	-	0.03	0.15	0.9	2.5	2.5
	2.4	80	22	-	0.02	0.2	0.9	2.4	2.4
	2.5	50	21	-	0.01	0.25	0.9	2.3	2.3
2	2.6	170	20	-	0.05	0.05	0.8	2.2	2.2
	2.7	140	19	-	0.04	0.1	0.8	2.1	2.1
	2.8	110	18	-	0.03	0.15	0.8	2	2
	2.9	80	17	-	0.02	0.2	0.7	1.9	1.9
	2.10	50	16	-	0.01	0.25	0.7	1.8	1.8
3	2.11	170	15	-	0.05	0.05	0.7	1.7	1.7
	2.12	140	14	-	0.04	0.1	0.6	1.6	1.6
	2.13	110	13	-	0.03	0.15	0.6	1.5	1.5
	2.14	80	12	-	0.02	0.2	0.6	1.4	1.4
	2.15	50	11	-	0.01	0.25	0.5	1.3	1.3
4	2.16	170	10	-	0.05	0.05	0.5	1.2	1.2
	2.17	140	9	-	0.04	0.1	0.5	1.1	1.1
	2.18	110	8	-	0.03	0.15	0.4	1	1
	2.19	80	7	-	0.02	0.2	0.4	0.9	0.9
	2.20	50	6	-	0.01	0.25	0.3	0.8	0.8
5	2.21	170	5	50	0.05	0.05	0.3	0.7	0.7
	2.22	140	4	40	0.04	0.1	0.2	0.6	0.6
	2.23	110	3	30	0.03	0.15	0.2	0.5	0.5
	2.24	80	2	20	0.02	0.2	0.1	0.4	0.4
	2.25	50	1	10	0.01	0.25	0.1	0.3	0.3

В вариантах, номер которых заканчивается на четную циф-



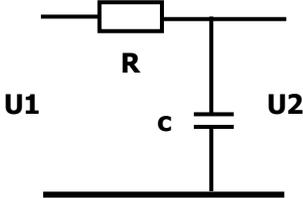
## Теория менеджмента: теория организации

ру, передаточную функцию системы необходимо определять по управляющему воздействию  $X(p)$ .

В вариантах, номер которых заканчивается на нечетную цифру, передаточную функцию системы необходимо определять по возмущающему воздействию  $Z(p)$ .

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАНИЮ 2.

Второе задание выбранного варианта должно выполняться в соответствии с нижеприведенным примером.



Необходимо определить динамические характеристики корректирующего звена, электрическая схема которого представлена на рисунке. Параметры элементов схемы:  $R = 100 \text{ Ом}$ ;  $C = 200 \text{ мкФ}$ .

Для определения передаточной функции применим правила расчета четырехполюсников:

$$W(p) = \frac{Z2(p)}{Z1(p)} = \frac{\frac{1}{Cp}}{R + \frac{1}{Cp}} = \frac{1}{1 + RCp}.$$

Этой передаточной функции соответствует частотная функция:

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

Частотная функция может быть представлена в виде  $A(\omega)$  - амплитудной частотной характеристики и  $\varphi(\omega)$  - фазовой частотной характеристики:

$$A(\omega) = \omega T / (1 + (\omega T)^2)^{1/2} = 0,0002\omega / (1 + (0,0002\omega)^2)^{1/2};$$

$$\varphi(\omega) = -\text{arctg}(\omega T) = -\text{arctg}(0,0002\omega).$$

Подставляя в полученные выражения  $\omega$  от 0 до  $\infty$ , можно проследить, как изменяются частотные характеристики корректирующего звена с возрастанием частоты.

Результаты графического построения переходных процессов и частотных характеристик в программе Classik приведены на рисунке 4.

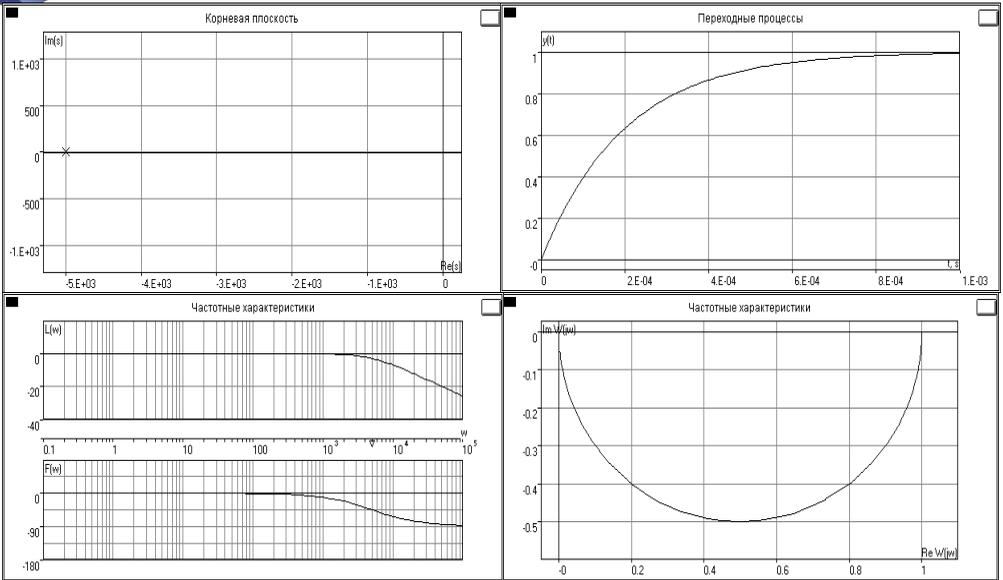


Рисунок 4

### Схемы корректирующих устройств

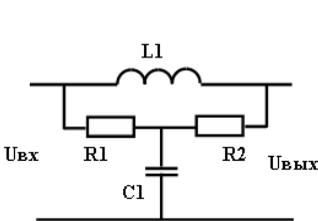


Схема 1

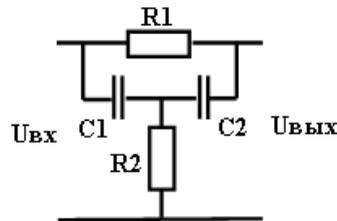


Схема 2

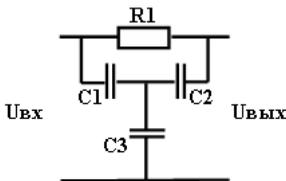


Схема 3

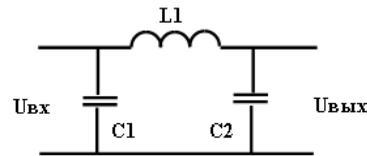


Схема 4

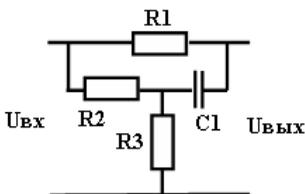


Схема 5

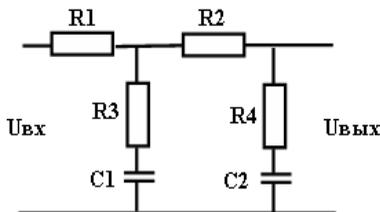


Схема 6

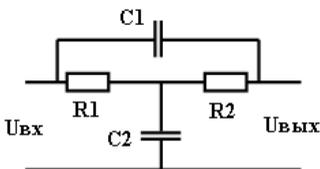


Схема 7

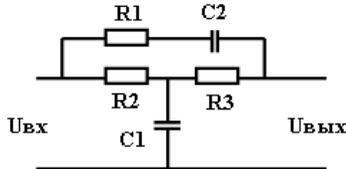


Схема 8

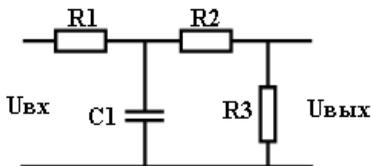


Схема 9

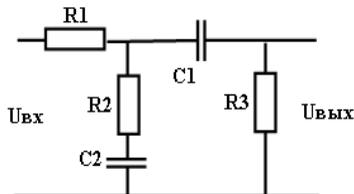


Схема 10

Исходные данные для выполнения второго задания курсовой работы выбираются из таблицы 2 в соответствии с вариантом курсовой работы.

Таблица 2. Исходные данные для выполнения задания 2

Схема	Вариант	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	L1, мГн	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ
-------	---------	--------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------

## Теория менеджмента: теория организации

1	1.1	100	500	-	-	0,1	0,1	-	-
	1.2	120	600	-	-	0,1	0,2	-	-
	1.3	140	700	-	-	0,1	0,3	-	-
	1.4	160	800	-	-	0,1	0,4	-	-
	1.5	180	900	-	-	0,1	0,5	-	-
2	1.6	100	500	-	-	-	0,1	0,3	-
	1.7	120	600	-	-	-	0,2	0,4	-
	1.8	140	700	-	-	-	0,3	0,5	-
	1.9	160	800	-	-	-	0,4	0,6	-
	1.10	180	900	-	-	-	0,5	0,7	-
3	1.11	100	-	-	-	-	0,1	0,3	0,3
	1.12	120	-	-	-	-	0,2	0,4	0,3
	1.13	140	-	-	-	-	0,3	0,5	0,3
	1.14	160	-	-	-	-	0,4	0,6	0,3
	1.15	180	-	-	-	-	0,5	0,7	0,3
4	1.16	-	-	-	-	0,1	0,1	0,3	-
	1.17	-	-	-	-	0,1	0,2	0,4	-
	1.18	-	-	-	-	0,1	0,3	0,5	-
	1.19	-	-	-	-	0,1	0,4	0,6	-
	1.20	-	-	-	-	0,1	0,5	0,7	-
5	1.21	100	500	300	-	-	0,1	-	-
	1.22	120	600	400	-	-	0,2	-	-
	1.23	140	700	500	-	-	0,3	-	-
	1.24	160	800	600	-	-	0,4	-	-
	1.25	180	900	300	-	-	0,5	-	-
6	2.1	100	500	400	800	-	0,1	0,3	-
	2.2	120	600	500	900	-	0,2	0,4	-
	2.3	140	700	600	1000	-	0,3	0,5	-
	2.4	160	800	500	1100	-	0,4	0,6	-
	2.5	180	900	600	1200	-	0,5	0,7	-
7	2.6	100	500	-	-	-	0,1	0,3	-
	2.7	120	600	-	-	-	0,2	0,4	-
	2.8	140	700	-	-	-	0,3	0,5	-
	2.9	160	800	-	-	-	0,4	0,6	-
	2.10	180	900	-	-	-	0,5	0,7	-
8	2.11	100	500	300	-	-	0,1	0,3	-
	2.12	120	600	400	-	-	0,2	0,4	-
	2.13	140	700	500	-	-	0,3	0,5	-
	2.14	160	800	600	-	-	0,4	0,6	-
	2.15	180	900	700	-	-	0,5	0,7	-
9	2.16	100	300	500	-	-	0,1	-	-
	2.17	120	400	600	-	-	0,2	-	-
	2.18	140	500	700	-	-	0,3	-	-
	2.19	160	600	800	-	-	0,4	-	-
	2.20	180	700	900	-	-	0,5	-	-
10	2.21	100	300	500	-	-	0,1	0,3	-
	2.22	120	400	600	-	-	0,2	0,4	-
	2.23	140	500	700	-	-	0,3	0,5	-
	2.24	160	600	800	-	-	0,4	0,6	-
	2.25	180	700	900	-	-	0,5	0,7	-

Примечание: если некоторые элементы схемы в выбранном ва-



## Теория менеджмента: теория организации

рианте соединены треугольником, целесообразно провести преобразование его в звезду по соответствующим формулам общей электротехники.

## 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАНИЮ 3.

Третье задание состоит в расчете конструктивных параметров и проведении компьютерного моделирования и коррекции динамических режимов работы следящей приборной системы.

Таблица 3. Исходные данные для выполнения задания 3

№ вар.	Скорость нагрузки, $\Omega$ , рад/с		Ускорение нагрузки, $\varepsilon$ , рад/с <sup>2</sup>		Статический момент нагрузки, $M_{ст}$ , Н·м		Момент инерции нагрузки, $J_n$ , кг·м <sup>2</sup>	
	Сх.1	Сх.2	Сх.1	Сх.2	Сх.1	Сх.2	Сх.1	Сх.2
1.1	0,1	0,15	0,5	0,5	1000	900	500	500
1.2	0,2	0,25	0,4	0,4	1000	900	1000	1000
1.3	0,3	0,35	0,3	0,3	1100	1100	1500	1500
1.4	0,4	0,45	0,2	0,2	1100	1100	2000	2000
1.5	0,12	0,13	0,5	0,5	1200	1300	500	500
1.6	0,22	0,23	0,4	0,4	1200	1300	1000	1000
1.7	0,32	0,33	0,3	0,3	1300	1500	1500	1500
1.8	0,42	0,43	0,2	0,2	1300	1500	2000	2000
1.9	0,13	0,14	0,5	0,5	1400	1700	500	500
1.10	0,23	0,24	0,4	0,4	1400	1700	1000	1000
1.11	0,33	0,34	0,3	0,3	1500	1900	1500	1500
1.12	0,43	0,44	0,2	0,2	1000	1900	2000	2000
1.13	0,14	0,12	0,5	0,5	1000	2100	500	500
1.14	0,24	0,22	0,4	0,4	1100	2100	1000	1000
1.15	0,34	0,32	0,3	0,3	1100	2300	1500	1500
1.16	0,44	0,42	0,2	0,2	1200	2300	2000	2000
1.17	0,15	0,1	0,5	0,5	1200	2400	500	500
1.18	0,25	0,2	0,4	0,4	1300	2400	1000	1000
1.19	0,35	0,3	0,3	0,3	1300	2500	1500	1500
1.20	0,45	0,4	0,2	0,2	1400	2500	2000	2000
2.1	0,45	0,45	0,5	0,5	1400	2500	500	500
2.2	0,44	0,44	0,4	0,4	1500	2500	1000	1000
2.3	0,43	0,43	0,3	0,3	1700	2400	1500	1500
2.4	0,42	0,42	0,2	0,2	1700	2400	2000	2000
2.5	0,4	0,4	0,5	0,5	1900	2300	500	500
2.6	0,35	0,35	0,4	0,4	1900	2300	1000	1000
2.7	0,34	0,34	0,3	0,3	2100	2100	1500	1500
2.8	0,33	0,33	0,2	0,2	2100	2100	2000	2000
2.9	0,32	0,32	0,5	0,5	2300	1900	500	500
2.10	0,3	0,3	0,4	0,4	2300	1900	1000	1000

<b>2.11</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>2500</b>	<b>1700</b>	<b>1500</b>	<b>1500</b>
<b>2.12</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>2500</b>	<b>1700</b>	<b>2000</b>	<b>2000</b>
<b>2.13</b>	<b>0,23</b>	<b>0,23</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2700</b>	<b>1500</b>	<b>500</b>	<b>500</b>
<b>2.14</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>2700</b>	<b>1500</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>
<b>2.15</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>2800</b>	<b>1300</b>	<b>1500</b>	<b>1500</b>
<b>2.16</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>2800</b>	<b>1300</b>	<b>2000</b>	<b>2000</b>
<b>2.17</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2900</b>	<b>1100</b>	<b>500</b>	<b>500</b>
<b>2.18</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>2900</b>	<b>1100</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>
<b>2.19</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>3000</b>	<b>900</b>	<b>1500</b>	<b>1500</b>
<b>2.20</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>3000</b>	<b>900</b>	<b>2000</b>	<b>2000</b>

Порядок выполнения задания:

- используя электрическую принципиальную схему следящей приборной системы и данные о параметрах нагрузки в соответствии с выбранным по таблице 3 вариантом, рассчитать необходимые характеристики устройств, входящих в следящую систему, учитывая, что погрешность системы не должна превышать 20’;

- выбрать по таблицам 4 и 5 устройства, параметры которых удовлетворяют расчетным характеристикам;

- построить структурную схему и компьютерную модель системы;

- проанализировать характер распределения нулей и полюсов передаточной функции системы в разомкнутом и замкнутом состоянии, характер изменения переходных процессов и частотных характеристик (ЛАЧХ и ФЧХ) при замыкании цепи главной обратной связи;

- привести обоснование необходимости введения в контур регулирования корректирующей обратной связи;

- построить структурную схему и компьютерную модель следящей системы с корректирующей обратной связью;

- проанализировать изменение характеристик качества регулирования при введении корректирующей обратной связи и дать заключение о влиянии коррекции на качество следящей системы;

- составить отчет о проведенной работе, включающий все необходимые расчеты, схемы и результаты моделирования.

### **Пример расчета и выбора сельсинов**

Подобрать пару сельсинов для следящей системы, погрешность которой не должна превышать 18’. Рассчитать точность



## Теория менеджмента: теория организации

передачи угла и чувствительность измерительной схемы.

1. Полагая, что  $\delta_{\text{ИРдоп}}$  составляет 30% заданной погрешности привода, находим:

$$\delta_{\text{ИРдоп}} = 18 \cdot 0,3 = 5,4'.$$

2. Из таблицы 4 выбираем пару сельсинов типа БС-3, погрешность следования которых составляет  $30'$ ,  $U_{\text{max}} = 5\text{В}$ ,  $f = 400\text{Гц}$ .

3. Так как погрешность сельсинов превышает допустимую, выбираем двухканальную систему с механическим редуктором.

Передаточное отношение редуктора:

$$i_p \geq \frac{\delta_{\text{го}}}{\delta_{\text{ИРдоп}}} = \frac{30}{5,4} = 5,5.$$

4. Принимаем несколько большее значение передаточного отношения редуктора:  $i_p = 10$ .

5. Погрешность преобразования угла вычисляем в предположении, что  $\delta_p(i_p) = 1,5'$ , а  $\delta_a = 0,5'$ :

$$\delta_{\text{то}} = \frac{\delta_{\text{го}}}{\delta_{\text{ИРдоп}}} + \delta_p(i_p) + \delta_a = \frac{30}{10} + 1,5 + 0,5 = 5'.$$

Передаточное отношение редуктора рассчитано правильно, так как погрешность преобразования угла не превышает допустимую погрешность, равную  $5,4'$ .

6. Чувствительность по каналу ГО в соответствии с таблицей 4 составляет  $U_{\text{max}} = 5\text{В/рад}$ .

7. Чувствительность по каналу ТО с учетом редуктора  $50\text{В/рад}$ .

### Пример расчета и выбора исполнительного двигателя

Выбрать исполнительный двигатель и определить его передаточную функцию, если:

- момент статической нагрузки  $M_{\text{ст}} = 2500 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,
- момент инерции нагрузки  $J_n = 5000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,
- требуемая скорость нагрузки  $\Omega_n = 0,16 \text{ рад/с}$ ,
- ускорение нагрузки  $\epsilon_n = 0,34 \text{ рад/с}^2$ .

1. Требуемая мощность:

$$P_{\text{тд}} = 2 \cdot 10^{-3} (M_{\text{ст}} + J_n \epsilon_n) \Omega_n = 1,34 \text{ кВт}.$$

По полученной мощности выбираем двигатель МИ-41.

Технические данные двигателя следующие:

$$P_{\text{ном}} = 1,6 \text{ кВт}; n_{\text{ном}} = 2500 \text{ мин}^{-1};$$

$$M_{\text{ном}} = 6,25 \text{ Н}\cdot\text{м}; J_d = 408 \cdot 10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$U_{\text{ном}} = 110 \text{ В}; I_a = 19,2 \text{ А}; R_a = 0,147 \text{ Ом}.$$

## Теория менеджмента: теория организации

2. Принимаем ориентировочно к.п.д. редуктора  $\eta = 0,9$ .

Оптимальное передаточное число:

$$i_0 = \sqrt{(M_{ст} + J_H \epsilon_H) / (J_D \epsilon_H)} = 550.$$

3. Выполняем проверку выбранного двигателя на соответствии требованиям по скорости.

Номинальная угловая скорость исполнительного двигателя:

$$\Omega_{ном} = n_{ном}/30 = 235 \text{ рад/с.}$$

Приведенная скорость нагрузки:  $\Omega_{тд} = \Omega_H i_0 = 88 \text{ рад/с.}$

Так как  $\Omega_{ном} > \Omega_{нi_0}$ , то по скорости выбранный двигатель подходит.

4. Выполняем проверку выбранного двигателя на соответствии требованиям по моменту.

Требуемый момент вращения:

$$M_{тр} = \frac{M_{ст}}{i_0 \eta} + \left( \frac{J_H}{i_0} + J_D i_0 \right) \epsilon_H = 15,55 \text{ Н·м.}$$

Проверка двигателя на перегрузку показывает, что двигатель не проходит по мощности:

$$M_{тд}/M_{ном} = 15,55/6,25 = 2,49 > 2.$$

5. Выбираем более мощный двигатель МИ-42 со следующими данными:

$$P_{ном} = 3,2 \text{ кВт; } n_{ном} = 2500 \text{ мин}^{-1};$$

$$M_{ном} = 12,5 \text{ Н·м; } J_D = 662 \cdot 10^{-4} \text{ кг·м}^2;$$

$$U_{ном} = 110 \text{ В; } I_a = 36,6 \text{ А; } R_a = 0,192 \text{ Ом.}$$

6. Пересчитываем оптимальное передаточное число редуктора:

$$i_0 = \sqrt{(M_{ст} + J_H \epsilon_H) / (J_D \epsilon_H)} = 431.$$

7. Выполняем проверку выбранного двигателя на соответствии требованиям по скорости:

$$\Omega_{ном} = n_{ном}/30 = 235 \text{ рад/с,}$$

$$\Omega_{тд} = \Omega_H i_0 = 69 \text{ рад/с.}$$

Так как  $\Omega_{ном} > \Omega_{нi_0}$ , то по скорости новый двигатель подходит.

8. Выполняем проверку выбранного двигателя на соответствии требованиям по моменту:

$$M_{тр} = \frac{M_{ст}}{i_0 \eta} + \left( \frac{J_H}{i_0} + J_D i_0 \right) \epsilon_H = 20 \text{ Н·м.}$$

Т.к.  $M_{тд}/M_{ном} = 1,64 < 2$ , то по перегрузке двигатель выбран

правильно.

9. Определяем передаточную функцию выбранного двигателя.

Коэффициент противоЭДС при номинальных значениях параметров:

$$c_e = (U_{\text{ном}} - I_a R_a) / \Omega_{\text{ном}} = 0,44 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

Коэффициент момента:

$$c_m = M_{\text{ном}} / I_a = 0,344 \text{ Н} \cdot \text{м/А.}$$

Полный момент инерции нагрузки:

$$J' = J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_0^2} = 930 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Механическая постоянная времени:

$$T_m = J' R_a / c_e c_m = 0,188 \text{ с.}$$

Коэффициент передачи двигателя по скорости:

$$k_d = 1 / c_e = 2,27$$

В результате передаточная функция двигателя:

$$W(p) = \frac{k_d}{p(T_m p + 1)} = \frac{2,27}{p(0,188p + 1)}.$$

### **Пример выполнения компьютерного моделирования динамических режимов работы следящей системы**

Алгоритм моделирования следующий:

- составляется структурная схема неизменяемой части системы, в которой каждый функциональный блок представлен своей передаточной функцией;

- определяются необходимые для оценки качества системы параметры переходных процессов и частотные характеристики;

- при необходимости коррекции определяется тип корректирующего устройства и место включения его в систему;

- параметры корректирующего устройства находятся в процессе повторного моделирования системы;

- если показатели качества не удовлетворяют заданным значениям, необходимо изменить тип корректирующего устройства или ввести в систему дополнительные корректирующие устройства;

- повторить процесс подбора параметров.

Один из вариантов типовой структурной схемы неизменяемой части следящей системы, представлен на рисунке 3.

Устройство управления, в качестве которого может исполь-

зваться потенциометрический, индукционный или др. преобразователь, состоит из узла сравнения и усилительного звена с передаточной функцией  $k_\delta$ . Усилительно-преобразовательное устройство, состоящее из полупроводниковых элементов, может быть также представлено усилительным звеном с передаточной функцией  $k_y$ . Исполнительный двигатель может быть представлен последовательным соединением усилительного, колебательного и интегрирующего звеньев. Однако, если считать, что  $T_m$  значительно больше  $T_e$ , то колебательное звено можно заменить апериодическим.

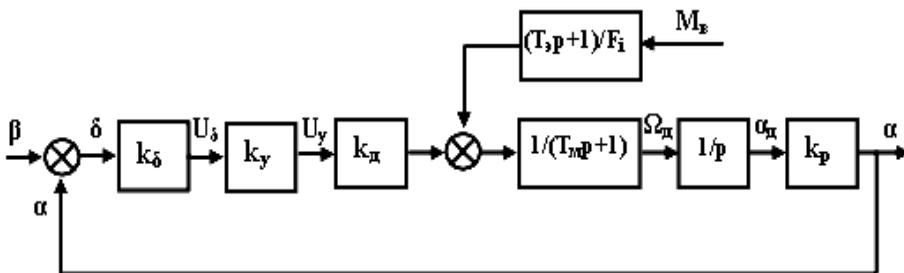


Рисунок 3. Структурная схема неизменяемой части системы

Кроме того, к силовой части привода прикладывается возмущающее воздействие  $M_E$  через передаточную функцию  $(T_3 p + 1) / F_i$ . Редуктор, связывающий вал двигателя с валом исполнительного устройства, также можно представить безинерционным звеном с передаточной функцией  $k_p$ .

После построения структурной схемы для определения временных и частотных характеристик, определяющих качество неизменяемой части системы, необходимо:

- по имеющейся структурной схеме создать компьютерную модель системы в предположении, что возмущающее воздействие равно 0, поэтому общая передаточная функция системы определяется по управляющему воздействию;
- для упрощения модели допускается объединение блоков с передаточными функциями  $k_\delta$ ,  $k_y$  и  $k_d$  в один блок с общим коэффициентом передачи  $k$ ;
- ввести в полученную модель данные о расчетных параметрах каждого блока;
- получить и проанализировать характеристики при единичном входном воздействии и разомкнутой цепи главной обратной связи;

## Теория менеджмента: теория организации

- повторить получение и анализ характеристик, замкнув цепь главной обратной связи.

Компьютерная модель неизменяемой части системы, выполненная в программе Classik, представлена на рисунке 4.

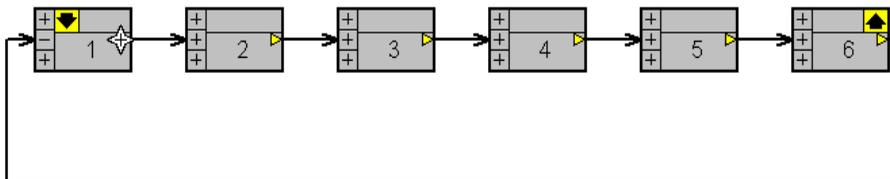
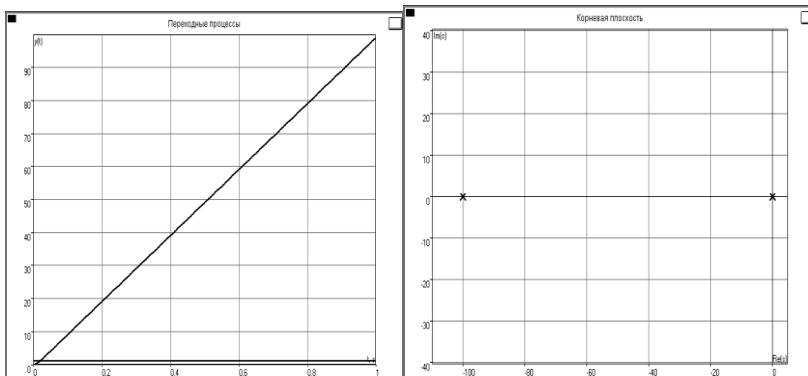


Рисунок 4.

Рассмотрим возможные результаты моделирования динамических процессов в неизменяемой части СС.

При разомкнутой цепи главной обратной связи система находится на границе устойчивости и интегрирует входное воздействие, что подтверждается видом переходной характеристики, расположением корней характеристического уравнения и частотных характеристик (Рисунок 5).



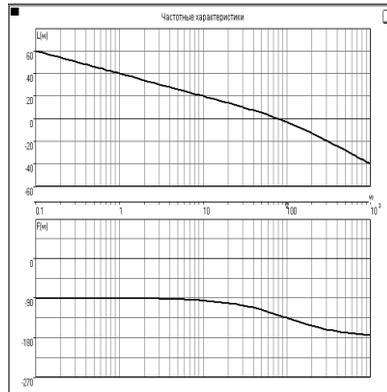


Рисунок 5. Переходная характеристика, распределение корней характеристического уравнения, логарифмическая амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики неизменяемой части СС при разомкнутой цепи главной обратной связи

Замыкание отрицательной главной обратной связи делает систему устойчивой, однако, характер переходных процессов зависит от расчетных параметров функциональных элементов. Возможные варианты динамических характеристик показаны на рисунке 6.

При неизменных постоянных времени инерционных звеньев качество системы определяется коэффициентом усиления основной цепи передачи управляющих воздействий. На рисунке 6а показаны переходные процессы в замкнутой системе при большом коэффициенте усиления, на рисунке 6б – при малом коэффициенте усиления.

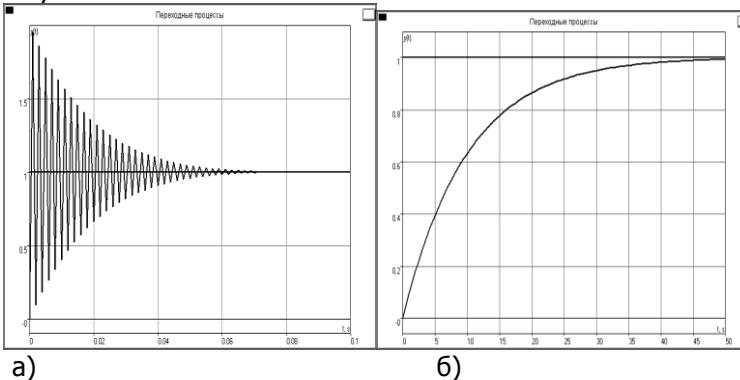


Рисунок 6. Переходные характеристики неизменяемой час-

ти системы при замкнутой цепи главной обратной связи

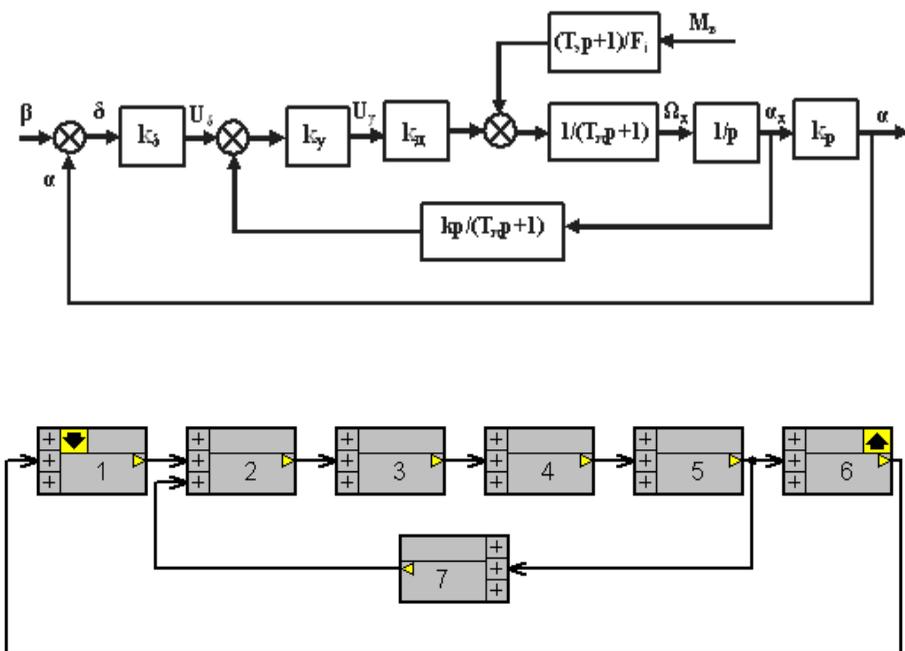


Рисунок 7. Структурная схема и компьютерная модель системы с корректирующей обратной связью по углу поворота ротора двигателя

Для того, чтобы получить малоколебательный переходной процесс с максимальным быстродействием, необходимо ввести в систему корректирующее устройство.

Таким корректирующим устройством в данном случае является тахогенератор, включенный в цепь корректирующей обратной связи. Тахогенератор можно представить апериодическим звеном  $W(p) = k_{тг}/(1 + T_{тг}p)$ , где  $T_{тг}$  – постоянная времени, если входная величина - угловая скорость исполнительного двигателя, и инерционным дифференцирующим звеном  $W(p) = k_{тг}p/(1 + T_{тг}p)$ , если входная величина - угол поворота. Глубина обратной связи может регулироваться подбором необходимых значений  $k_{тг}$  и  $T_{тг}$ .

После введения корректирующей обратной связи (Рисунок 7) и подбора ее параметров получены следующие динамические характеристики (Рисунок 8):

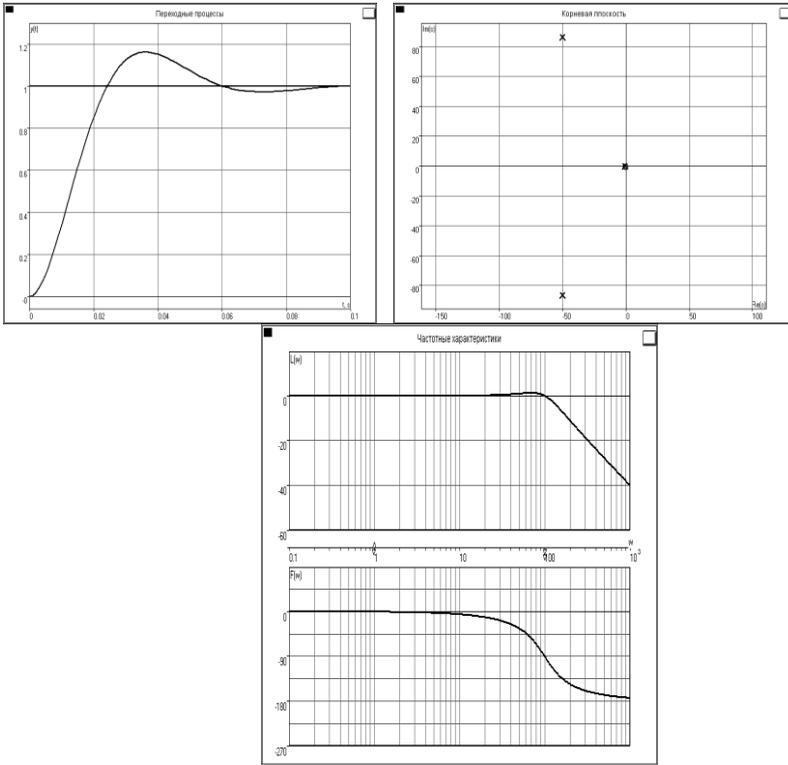


Рисунок 8.

Таким образом, использование коррекции в цепи обратной связи позволило при сохранении точности повысить устойчивость системы.

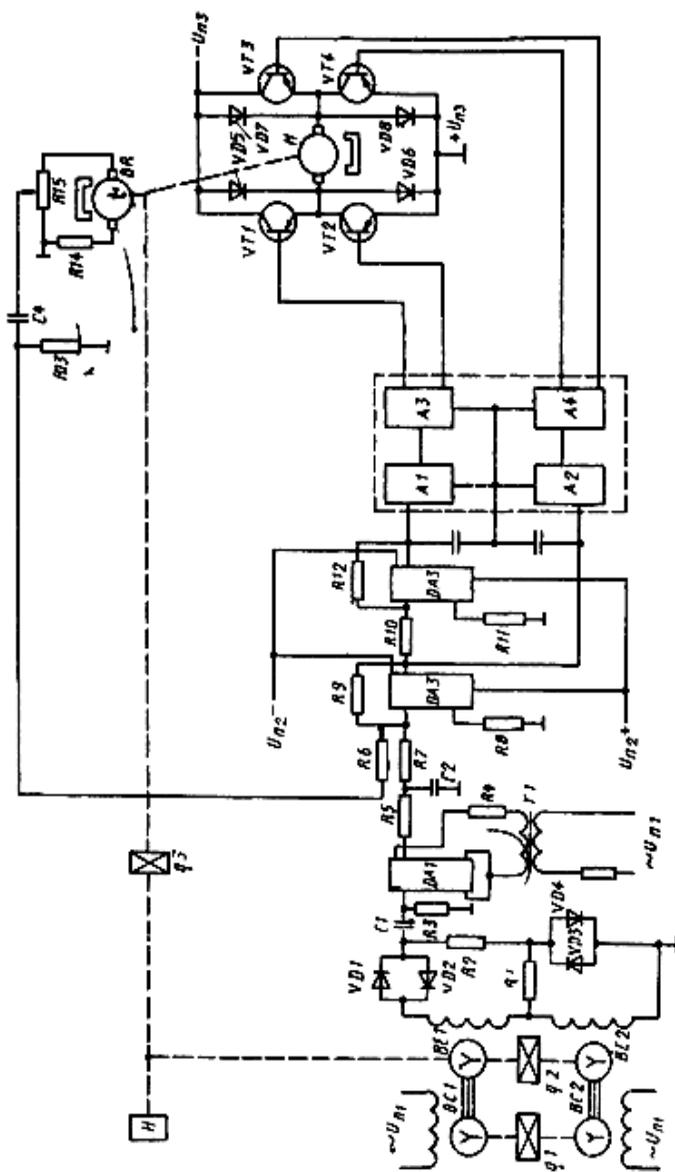


Схема 1. Исполнительный следящий

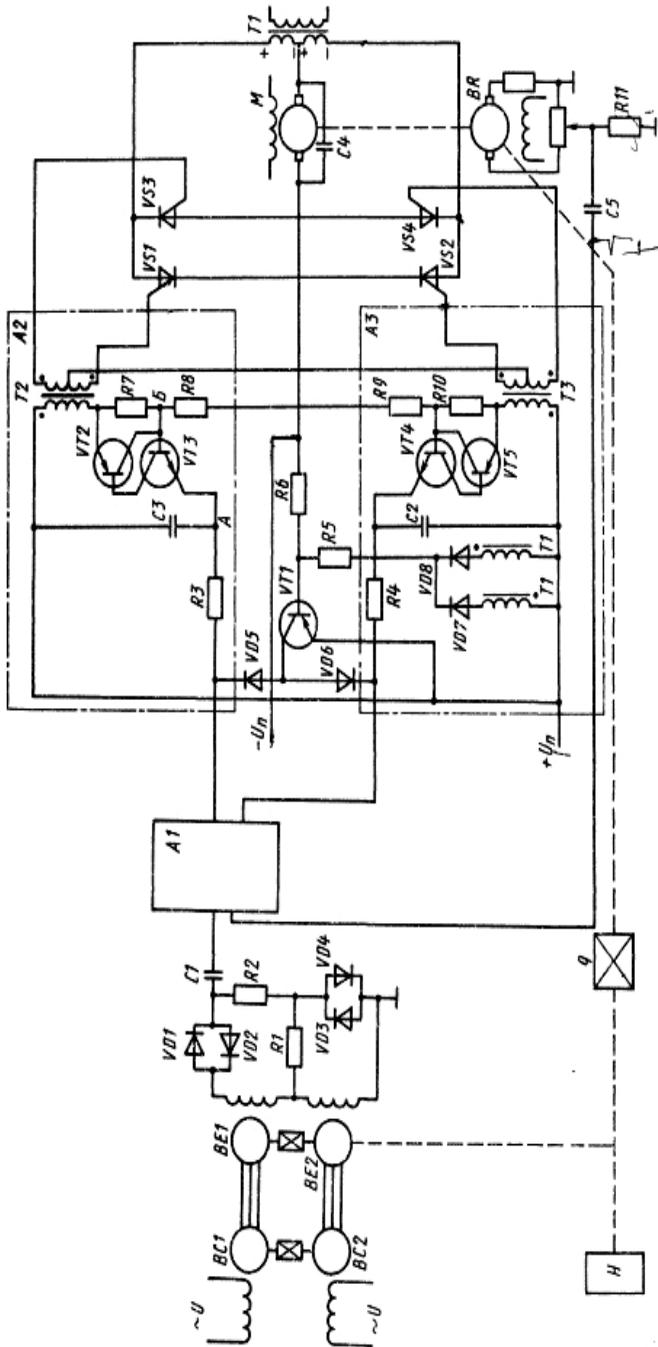


Схема 2. Исполнительный следящий привод

Таблица 4 - Технические данные сельсинов

Тип сельсина	Назначение	Частота напряжения питания, Гц	Напряжение питания $U_n$	Напряжение синхронизации $U_m$	Погрешность следования	Потребляемый ток, А	Ассиметрия нулевых точек
			В				
НД-501БТВ НД-414БТВ  НД-404П НД-214 НД-204  БД-501БТВ БД-404АТВ  БД-404ВТВ	Датчик	50	110	152	—	0,700 0,600	±15'
		400		100	—		
		50		152	—	1,200 0,400	±21'
				34	—		
БС-3 СБ-20-1ВД	400	36	5 25	—	—	±8' ±6'	
СС-405ТВ  СТ-1  БС-405ТВ БС-405БТВ	50 400	110 36		53 31		±20'	0,012 0,090 0,130
50	110	34 78	100	±18' - 1 кл ±30' - 2 кл	0,035 0,090	— —	
		±45' - 3 кл		—			

БС-155А					±5' - 1 кл ±20' - 3 кл ±10' - 2 кл ±40' - 4 кл	0,150	
СБ-32-1ВП		400	36	21	±10' - 1 кл	0,020	±10'
БС-3				5	±20' - 2 кл ±30' - 3 кл	0,012	±8'

Таблица 5. Технические данные двигателей типа МИ

Тип двигателя	Мощность на валу, $P_{\text{НОМ}}$ , кВт	Частота вращения, $n_{\text{НОМ}}$ , мин <sup>-1</sup>	Напряжение питания, $U_{\text{В}}$	Ток якоря, $I_{\text{Я}}$ , А	Сопр. обм. якоря, $R_{\text{Я}}$ , Ом	Момент, $M_{\text{НОМ}}$ , Н·м	Момент инерции, $J_{\text{Д}}$ ·10 <sup>4</sup> , кг·м <sup>2</sup>
МИ-11	0,12	3000	60	2,8 6	0,46	0,39	15,3
	0,1	2000	110	2,2 7	0,94	0,49	
	0,12	3000	60	1,5 3	1,48	0,39	
	0,1	2000	110	1,2 2	3,0	0,49	
МИ-12	0,2	3000	60	4,5 7	0,23	0,65	20,4
	0,12	2000	60	2,7 2	0,52	0,58 5	
	0,2	3000	110	2,4 6	0,675	0,65	
	0,12	2000	110	1,4 6	1,74	0,58 5	
МИ-21	0,25	3000	60	5,6	0,284	0,81	35,7
	0,2	2000	60	4,3	0,284	0,81	

## Теория менеджмента: теория организации

	<b>0,25</b>	<b>3000</b>	<b>11 0</b>	<b>3,0 5</b>	<b>0,945</b>	<b>0,97</b>	
	<b>0,2</b>	<b>2000</b>	<b>11 0</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>0,97</b>	
<b>МИ-31</b>	<b>0,45</b>	<b>3000</b>	<b>60</b>	<b>10, 3</b>	<b>0,118</b>	<b>1,45</b>	<b>91,8</b>
	<b>0,37</b>	<b>2000</b>	<b>60</b>	<b>8,2</b>	<b>-</b>	<b>1,8</b>	
	<b>0,2</b>	<b>1000</b>	<b>60</b>	<b>4,4</b>	<b>-</b>	<b>1,95</b>	
	<b>0,45</b>	<b>3000</b>	<b>11 0</b>	<b>5,6</b>	<b>0,345</b>	<b>1,45</b>	
	<b>0,37</b>	<b>2000</b>	<b>11 0</b>	<b>4,4</b>	<b>0,757</b>	<b>1,8</b>	
	<b>0,2</b>	<b>1000</b>	<b>11 0</b>	<b>2,4</b>	<b>2,5</b>	<b>1,95</b>	
<b>МИ-41</b>	<b>1,6</b>	<b>2500</b>	<b>11 0</b>	<b>19, 2</b>	<b>0,147</b>	<b>6,25</b>	<b>408</b>
	<b>1,1</b>	<b>1500</b>	<b>11 0</b>	<b>13, 0</b>	<b>0,42</b>	<b>7,15</b>	
	<b>0,76</b>	<b>1000</b>	<b>11 0</b>	<b>9,0</b>	<b>1,5</b>	<b>7,4</b>	
	<b>1,6</b>	<b>2500</b>	<b>22 0</b>	<b>9,5</b>	<b>0,58</b>	<b>6,25</b>	
	<b>1,1</b>	<b>1500</b>	<b>22 0</b>	<b>6,4</b>	<b>1,7</b>	<b>7,15</b>	
	<b>0,76</b>	<b>1000</b>	<b>22 0</b>	<b>4,5</b>	<b>3,32</b>	<b>7,4</b>	
<b>МИ-51</b>	<b>5,0</b>	<b>2500</b>	<b>22 0</b>	<b>27, 2</b>	<b>-</b>	<b>19,4</b>	<b>127</b>
	<b>3,2</b>	<b>1500</b>	<b>22 0</b>	<b>17, 1</b>	<b>-</b>	<b>20,8</b>	
	<b>1,6</b>	<b>1000</b>	<b>22 0</b>	<b>8,7</b>	<b>-</b>	<b>15,6</b>	



## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Цыбрий И.К., Ананченко В.Н., Сыроватка В.Н., Вяликов И.Л. Основы проектирования элементов приборов и систем: учеб. пособие - Ростов/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012
2. Смирнова В.М., Разинцев В.М. Проектирование и расчет автоматизированных приводов. - М., Машиностроение, 1990
3. Цыбрий И.К. Исследование динамических характеристик систем автоматического управления. Методические указания к курсовой работе по курсу «Основы автоматического управления» / ДГТУ (учеб. – метод. разраб.) - Ростов/Д: Издательский центр ДГТУ, 2009