

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт  
Кафедра «Робототехника и автоматизация производства»

Утверждено на заседании кафедры  
«Робототехника и автоматизация  
производства»  
«14» января 2022г., протокол №6

Заведующий кафедрой



Е.В. Ларкин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по проведению практических (семинарских) занятий  
по дисциплине (модулю)

«Проектирование следящих приводов роботов»

основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы магистратуры

15.04.06

Мехатроника и робототехника

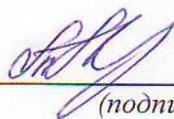
с направленностью (профилем)  
Роботы и робототехнические системы

Форма обучения: очная  
Идентификационный номер образовательной программы: 150406-02-22

Тула 2022 год

**Разработчик методических указаний**

Кузнецова Татьяна Рудольфовна, доцент, канд. техн. наук,  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



---

(подпись)

## Оглавление

Практическое занятие №1. ....	4
Электрический расчет следящего привода .....	4
Практическое занятие №2. ....	11
Кинематический расчет привода .....	11
Практическое занятие №3. ....	15
Расчет динамических характеристик привода .....	15
Практическое занятие №4. ....	19
Расчет усилителя .....	19
Практическое занятие №5. ....	22
Оценки качества регулирования .....	22

## Практическое занятие №1.

### Электрический расчет следящего привода

#### Теоретические сведения

Основное назначение **следящих приводов**: слежение за вводимым в систему сигналом управления, изменяющимся по заранее неизвестному закону. Следящие приводы составляют большую группу приводов, используемых в промышленности. Наиболее распространенным случаем является обработка движения некоторого входного вала выходным валом привода. При этом повторение движения выходным валом должно осуществляться с требуемой ошибкой. В следящих приводах регулируемой величиной обычно является угол поворота  $\Theta$ , а само регулирование — **регулированием по положению**.

Функциональная схема следящего привода, приведенная на рис. 1, имеет замкнутую структуру с жесткой отрицательной обратной связью по углу поворота  $\Theta_2$  выходного вала.

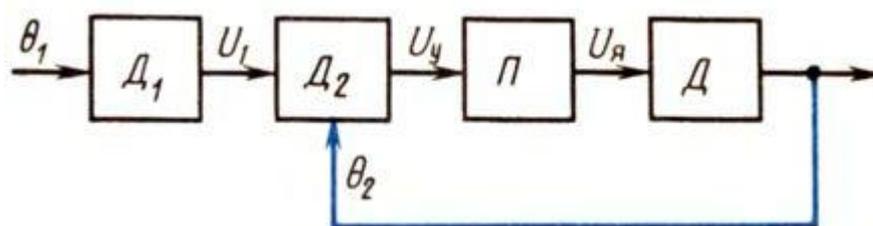


Рис. 1. Функциональная схема следящего привода

Принцип действия следящего привода следующий. Предположим, что между углом  $\Theta_1$  входного вала и  $\Theta_2$  выходного вала появилось некоторое рассогласование, т. е.  $\Theta_1$  не равно  $\Theta_2$ . Датчики  $D_1$  и  $D_2$  формируют напряжения, пропорциональные углам поворота, и выдают на вход преобразователя  $\Pi$  напряжение управления  $U_y = U_1 - U_2$ , где  $U_1 = k_1\Theta_1$ ,  $U_2 = k_2\Theta_2$ . Поэтому датчики  $D_1$  и  $D_2$  обычно называют **измерителями рассогласования**. Преобразователь  $\Pi$  преобразует  $U_y$  в пропорциональный сигнал управления двигателем, которым может быть напряжение подаваемое на якорь.

Напряжение  $U_y$  формируется такого знака, чтобы двигатель  $D$ , получив питание, стал поворачивать свой вал в направлении, при котором разность углов  $\Theta_2 - \Theta_1$  уменьшалась. Иными словами, следящий привод всегда стремится к непрерывному автоматическому устранению рассогласования между входным и выходным валами.

В качестве измерителя рассогласования в следящем приводе применяют потенциометрический измеритель, сельсин, работающий в трансформаторном режиме, вращающийся трансформатор и др., в качестве устройства преобразователя - двигатель системы Г—Д, ЭМУ-Д, МУ-Д, УВ-Д и др.

Структурная схема простейшей следящей системы, показанная на рис. 2, состоит из сельсина датчика СД, сельсина приемника СП, которые работают в

трансформаторном режиме и выполняют функции датчиков Д1 и Д2, т. е. измерителя рассогласования входного угла  $\Theta_1$  и выходного  $\Theta_2$ .

Сельсины - это электрические микромашины переменного тока, обладающие способностью самосинхронизации. Их применяют в дистанционных системах передачи угла в качестве датчиков и приемников. Передача угловой величины в такой системе происходит синхронно, синфазно и плавно. При этом между устройством, задающим угол (датчиком), и устройством, принимающим передаваемую величину (приемником), существуют только электрическое соединение в виде линии связи.

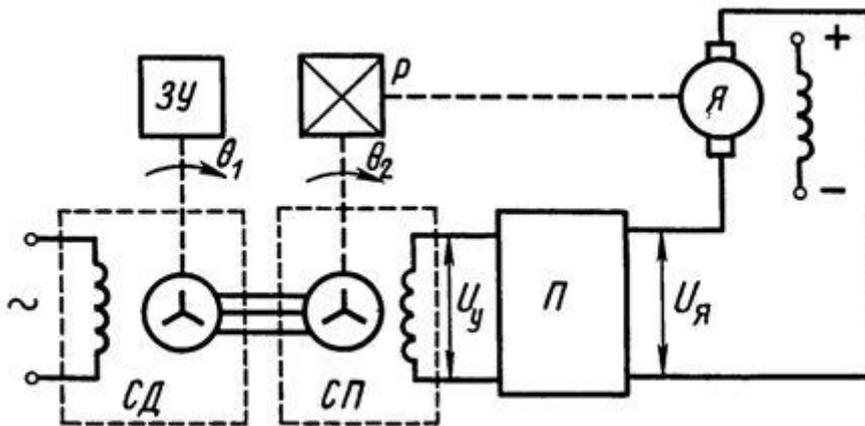


Рис. 2. Схема следящего привода с сельсинами



Рис. 3. Сельсины

В систему включается преобразователь, который выпрямляет переменное напряжение однофазной обмотки СП и усиливает его. Преобразователь (см. рис. 2) должен быть знакочувствительным, т. е. в зависимости от фазы сигнала обмотки СП выдавать на якорь двигателя постоянное напряжение положительного или отрицательного знака.

Исполнительный двигатель связан с ротором СП через понижающий редуктор Р. Входной задающий угол поворота  $\Theta_1$  вводится в систему задающим устройством ЗУ, вал которого связан неподвижно с валом СД. Иногда эта связь осуществляется через редуктор.

Если ЗУ переместит вал СД от его исходного положения в положение угла  $\Theta_1$ , на выходе однофазной обмотки СП появится переменное напряжение, амплитуда которого пропорциональна разности входного и выходного углов привода  $U_y = U_1 = k_1(\Theta_1 - \Theta_2)$ .

Частота напряжения  $U_y$  определяется частотой питания однофазной обмотки СД (50, 400 Гц и т. д.). Преобразователь П выпрямляет и усиливает напряжение  $U_y$ .

Схемно он может быть представлен фазочувствительным выпрямителем и усилителем постоянного тока, выполненным на различной элементной базе. Например, в качестве выпрямителя может быть использован транзисторный усилитель, а в качестве усилителя — ЭМУ.

Электрический двигатель, получив питание в виде  $U_{я}$  в зависимости от полярности этого напряжения начинает поворачивать свой вал и вал СП через редуктор таким образом, что разность углов  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  уменьшается. Как только окажется, что  $\Theta_1 - \Theta_2 = 0$ , однофазная обмотка СП перестанет выдавать напряжение  $U_y$ , т. е.  $U_y = 0$ . Тогда снимется напряжение, подаваемое на якорь двигателя, и он перестанет поворачивать свой вал. Таким образом, система обрабатывает сигнал управления, поступивший извне.

Часто в следящих системах кроме отрицательной связи по углу поворота (по положению) используется обратная связь по частоте вращения. В этом случае схема, приведенная на рис. 2, изменится.

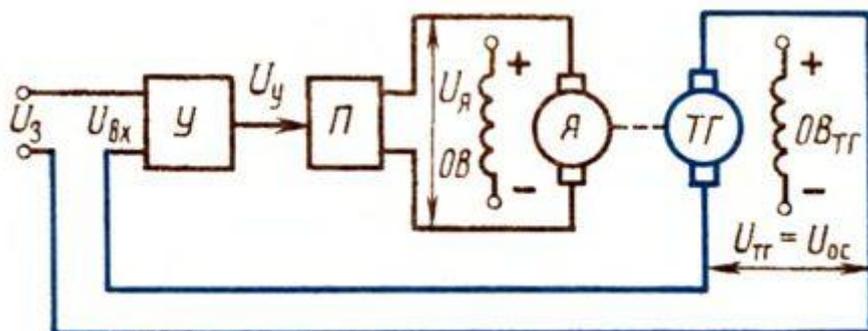


Рис. 4. Схема замкнутого привода с отрицательной обратной связью по частоте вращения

На валу двигателя будет находиться тахогенератор, а напряжение с его обмотки будет подаваться на преобразователь П последовательно с напряжением  $U_y$ , так как это показано на рис. 4. На практике используют и другие виды обратных связей.

#### Следящий электропривод

Электропривод, обеспечивающий воспроизведение механических перемещений контролируемого или управляемого объекта посредством исполнительного электродвигателя. Помимо исполнительного электродвигателя, следящий электропривод включает в себя задающее устройство, датчик положения, устройства сравнения, усилители. Задающее устройство вырабатывает исходный (заданный) сигнал, изменяющийся, как правило, по произвольному закону. Датчик положения непрерывно измеряет на управляемом объекте фактическое значение параметра, подлежащего изменению, которое при помощи устройства сравнения соотносится с заданным. В результате сравнения вырабатывается сигнал рассогласования, пропорциональный разности между заданным и фактическим значениями воспроизводимой величины. Сигнал рассогласования (в виде напряжения или тока) поступает на вход усилителя, а затем на исполнительный электродвигатель, осуществляющий такое движение управляемого объекта, при котором сигнал рассогласования уменьшается. В отсутствие сигнала рассогласования ротор электродвигателя находится в покое. В большинстве следящих электроприводов задаваемой величиной является угол поворота входного вала, а регулируемой —

угол поворота выходного вала, с которым связан управляемый объект. Применяется в системах автоматического управления, передачи информации и измерения. Мощность обычно не выше нескольких десятков киловатт.

Пример расчета.

Выбор исполнительного двигателя. Проектирование следящего привода начинают с выбора исполнительного двигателя.

Рассчитаем требуемую мощность двигателя:

$$P_{\text{дв}} = \frac{2\Omega_n}{\eta} \cdot (J_n \cdot \varepsilon + M_n) = \frac{2 \cdot 0,9}{0,9} \cdot (4 \cdot 0,6 + 10) = 24,8 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{ном.дв}} \geq P_{\text{тр.дв}} \cdot \eta = 0,9 - \text{КПД редуктора}$$

По полученным данным выберем двигатель *АДП-263А* с паспортными данными:

Частота сети, Гц *500*

Напряжение возбуждения  $U_{\text{в}}$ , В *36*

Ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ , А *1,6*

Напряжение управления  $U_{\text{ном}}$ , В *275*

Ток управления  $I_{\text{у}}$ , А *0,55*

Вращающий момент  $M_{\text{ном}}$ , Нм *0,045*

Частота вращения  $n_{\text{ном}}$ , об/мин *6000*

Номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ , Вт *24,7*

КПД *27*

Электромеханическая постоянная времени, с *0,05*

Пусковой момент  $M_{\text{п. ном}}$ , Нм *0,6*

Момент инерции  $J_{\text{д}} \cdot 10^8$ , кгм *120*

Определим оптимальное передаточное число редуктора:

$$i_0 = \sqrt{\frac{J_n \cdot \varepsilon_n + M_n}{J_{\text{дв}} \cdot \varepsilon_n \cdot \eta}} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 4 + 10}{0,6 \cdot 120 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9}} = 4374$$

Проверим выбранный двигатель. Проверка на соответствие требованиям по скорости вращения вала:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = \frac{\pi \cdot 6000}{30} = 628,32 \text{ рад/с}$$

$$\omega_{\text{треб}} = i_0 \cdot \omega_{\text{нагр}} = 4374 \cdot 0,9 = 3936,6 \text{ рад/с}$$

$$\text{Так как } \omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = \frac{\pi \cdot 6000}{30} = 628,32$$

$\omega_{\text{ном}} < \omega_{\text{треб}}$ , то двигатель по скорости не проходит, т.е. требуемая скорость больше, чем та, которую двигатель может обеспечить. Поэтому отказываемся от оптимального передаточного отношения редуктора  $i_0$  и вычислим

$$i_{\text{тр}} = \frac{\omega_{\text{мп}}}{\Omega_n} = \frac{\omega_n}{\Omega_n}$$

$$\text{требуемое значение } i: \quad i_{\text{мп}} = \frac{\omega_{\text{мп}}}{\Omega_n} = \frac{\omega_n}{\Omega_n} = \frac{628,32}{0,9} = 698,13$$

Проверим выбранный двигатель на соответствие требованиям по моменту:

$$M = \left[ J_{\text{дв}} + \frac{J_n}{i_{\text{мп}}^2 \cdot \eta} \right] \cdot \varepsilon_n \cdot i_{\text{мп}} + \frac{M_n}{\eta \cdot i_{\text{мп}}} = \left[ 120 \cdot 10^{-8} + \frac{4}{698,13^2 \cdot 0,9} \right] \cdot 0,6 \cdot 698,13 + \frac{10}{0,9 \cdot 698,13} = 0,02024 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{Т. к. отношение } \frac{M_{\text{мп}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{0,02024}{0,045} = 0,45, \text{ то двигатель по моменту проходит.}$$

$$\text{Передаточная функция двигателя имеет вид} \quad W(p) \approx \frac{k_{\text{дв}}}{p(T_m p + 1)(T_E p + 1)}$$

Определим постоянную двигателя  $C_m$ :

$$C_M = \frac{M_{\text{номпус}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{0,6}{275} = 2,1818 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Нм}}{\text{В}} ;$$

Определим коэффициент демпфирования F:

$$F = \frac{M_{\text{номпус}} - M_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{0,6 - 0,045}{628,32} = 8,8331 \cdot 10^{-4} \text{ Нмс/рад}$$

Определим коэффициент  $K_d$ :

$$k_{\text{дв}} = \frac{C_M}{F} = \frac{2,1818 \cdot 10^{-3}}{8,8331 \cdot 10^{-4}} = 2,47 \frac{\text{рад}}{\text{Вс}}$$

Определим приведенный момент инерции двигателя:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{наг}}}{\eta \cdot i^2} = 120 \cdot 10^{-8} + \frac{4}{0,9 \cdot 698,13^2} = 1,032 \cdot 10^{-5} \text{ кгм}$$

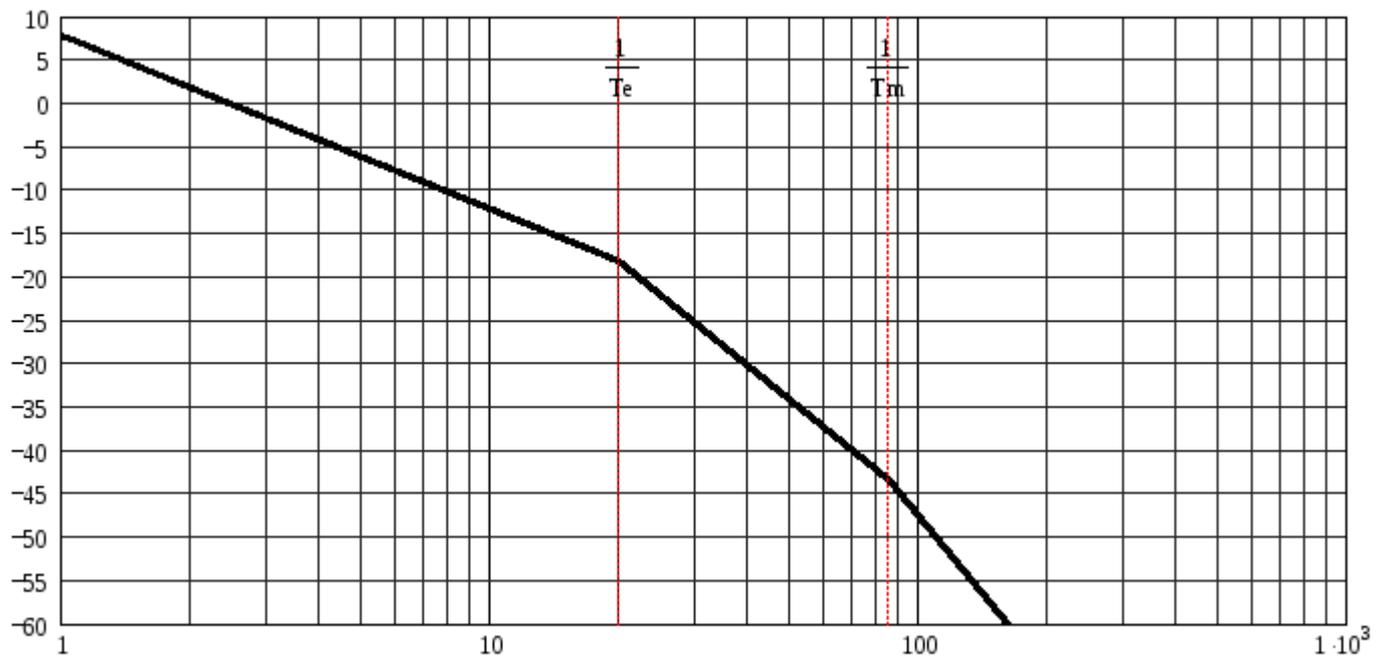
Определим постоянную времени  $T_M$ :

$$T_M = \frac{J_{\text{пр}}}{F} = \frac{1,032 \cdot 10^{-5}}{8,8331 \cdot 10^{-4}} = 0,011682 \text{ с}$$

Передаточная функция двигателя имеет вид:

$$W(p) = \frac{2,47}{(1,1682 \cdot 10^{-2} p + 1)(5 \cdot 10^{-2} p + 1)p}$$

↑  
ЛАЧХ двигателя:



## Практическое занятие №2.

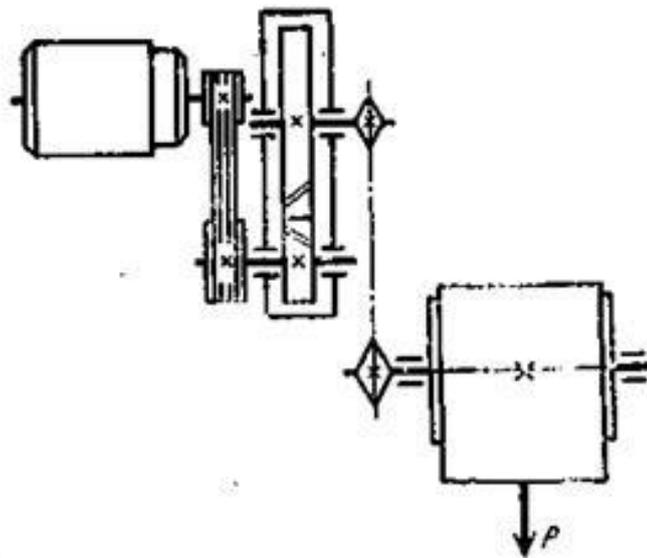
### Кинематический расчет привода

#### Теоретические сведения

##### Задание

Произвести кинематический расчет привода, показанного на рис.1, при следующих данных: диаметр барабана  $D = 400$  мм, тяговое усилие на ленте  $P = 3000$  Н, скорость ленты  $v = 0,7$  м/с.

**Рис.1 Кинематическая схема привода ленточного транспортера**



#### Пример расчета

Произвести кинематический расчет привода, показанного на рис.1, при следующих данных: диаметр барабана  $D = 500$  мм, тяговое усилие на ленте  $P = 4000$  Н, скорость ленты  $v = 0,8$  м/с.

Принимаем КПД передач (табл. 1.2), показанных на рис. 1:

ременной передачи  $\eta_1 = 0,98$ ;

зубчатой пары  $\eta_2 = 0,98$ ;

цепной передачи  $\eta_3 = 0,96$ ;

потери в опорах трех валов  $\eta_0^3 = 0,99^3$ .

Таблица 1.2. Средние значения КПД механических передач (без учета потерь)

Тип передачи	Закрытая	Открытая
Зубчатая:		
цилиндрическая	0,96 ... 0,97	0,93 ... 0,95
коническая	0,95 ... 0,97	0,92 ... 0,94
Цепная	0,95 ... 0,97	0,90 ... 0,93
Ременная:		
плоским ремнем	-	0,96 ... 0,98
клиновыми (поликлиновыми) ремнями	-	0,95 ... 0,97
червячная при числе заходов червяка:		
Z1= 1	0,70...0,75	
Z1= 2	0,80...0,85	
Z1= 4	0,80...0,95	
муфта соединительная	0,98	
подшипники качения	0,99	

Таблица 1.3 Допустимая перегрузка по номинальной мощности

Продолжительность включения электродвигателя, ПВ %	Допустимая перегрузка по номинальной мощности для асинхронных двигателей серии АИР
100%	0%
80%	5%
60%	10%
40%	20%

КПД всего привода

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_0^3 = 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,96 \cdot 0,99^3 = 0,89.$$

Требуемая мощность электродвигателя

$$P_{дв} = \frac{P_v}{\eta} = \frac{4000 \cdot 0,8}{0,89} = 3600 \text{ Вт.}$$

Частота вращения вала барабана

$$n_p = \frac{60v}{\pi D} = \frac{60 \cdot 0,8}{3,14 \cdot 0,5} \approx 30,5 \text{ об/мин.}$$

Из таблицы 1.6 выбираем ближайшие по мощности электродвигатели с повышенным пусковым моментом:

Таблица 1.6. Двигатели асинхронные короткозамкнутые трёхфазные серии 4А общепромышленного применения;

закрытые обдуваемые. Технические данные

Номинальная мощность $P_n$ , кВт	Синхронная частота вращения, мин <sup>-1</sup>							
	3000		1500		1000		750	
	Тип двигателя, 4А	$n_s (d)_s$	Тип двигателя, 4А	$n_s (d)_s$	Тип двигателя, 4А	$n_s (d)_s$	Тип двигателя, 4А	$n_s (d)_s$
0,25	AM56B2У3	2760(11)	AM63A4У3	1370(14)	AM63B6У3	890(14)	M71B8У3	680(19)
0,37							M80A8У3	
0,55	AM63A2У3	2740(14)	AM63B4У3	1365(14)	M71A6У3	910(19)	M80B8У3	675(22)
0,75					M71B6У3		M90LA8У3	
1,1	AM63B2У3	2710(14)	M471A4У3	1390(19)	M80A6У3	900(19)	M90LB8У3	700(22)
1,5	M71A2У3	2840(19)	M71B4У3	1390(19)	M80B6У3	915(22)	M100L8У3	700(24)
2,2	M71B2У3		M80A4У3		M90L6У3		M112MA8У3	
3,0	M80A2У3	2810(19)	M80B4У3	1420(19)	M100L6У3	920(22)	M112MA8У3	700(24)
4,0	M80B2У3	2850(22)	M90L4У3	1415(22)	M112MA6У3	935(24)	M112MB8У3	700(28)
5,5	M90L2У3		M100S4У3		M112MB6У3		M132S8У3	
7,5	M100S2У3	2850(22)	M100L4У3	1425(22)	M132S6У3	950(28)	M132M8У3	700(32)
11,0							M132M8У3	
15,0	M100L2У3	2840(24)	M112M4У3	1435(24)	M132M6У3	955(32)	M160S8У3	700(32)
	M112M2У3	2880(28)	M132S4У3	1430(28)	M160S6У3	950(32)	M160M8У3	720(36)
	M132M2У3	2880(28)	M1M2M4У3	1445(28)	M160M6У3	965(36)	M180M8У3	720(36)
	M160S2У3	2900(32)	M160S4У3	1455(32)		970(36)		730(42)
		2930(36)		1450(36)		970(42)		730(42)
		2930(42)		1460(42)		970(42)		730(42)

Примечание: Структура обозначения типоразмера двигателя (расшифровывается слева направо):

4 – порядковый номер серии;

A – вид двигателя – асинхронный;

A – станина и щиты двигателя алюминиевые (отсутствие знака означает, что станина и щиты чугунные или стальные);

M – модернизированный; двух- или трёхзначное число – высота оси вращения ротора;

A, B – длина сердечника статора;

K, L, M, S – установочный размер по длине станины;

2, 4, 6, 8 – число полюсов;

УЗ – климатическое исполнение и категория размещения (для работы в зонах с умеренным климатом) по ГОСТ 15150-69.

АО2-42-6, имеющий  $N = 4$  кВт и  $n = 955$  об/мин, и  
АО2-41-4, у которого  $N = 4$  кВт и  $n = 1440$  об/мин.

Определяем передаточные отношения привода:

в первом случае

$$i = \frac{n}{n_p} = \frac{955}{30,5} = 31,4;$$

во втором

$$i = \frac{1440}{30,5} = 47,2.$$

Приемлемы оба типа двигателя; в первом варианте передаточное отношение может быть реализовано, например, так: по таблице 1.3 выбираем для ременной передачи  $i_1 = 2$ ; для редуктора  $i_2 = 4$  и для цепной передачи  $i_3 = 4$ .  
Общее  $i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 = 2 \cdot 4 \cdot 4 = 32$ . Отклонение

от заданного составит  $\frac{32-31,4}{31,4} 100\% \approx 1,9\%$  (допускается отклонение до  $\pm 3\%$ ).

После выбора электродвигателя и определения передаточного отношения редуктора выполняют расчеты зубчатых передач.

## Практическое занятие №3.

### Расчет динамических характеристик привода

Построение логарифмической амплитудно-частотной характеристики нескорректированного привода.

Для этого найдем положение рабочей точки А ( $\omega_p$ ;  $20lg(b_0/d_{gap})$ ).

$$50 \approx 0,833 \text{ град}$$

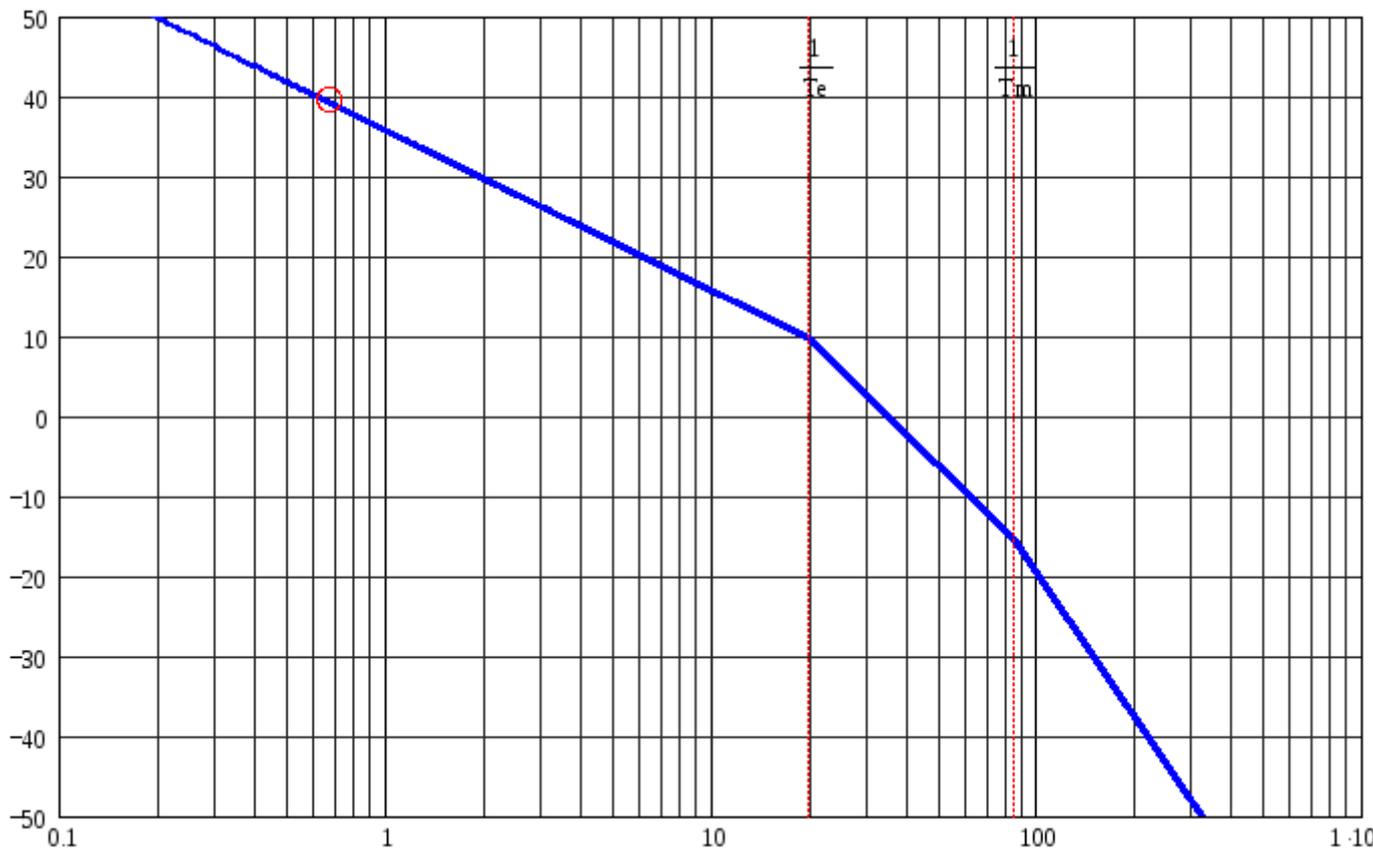
$$\omega_p = \frac{\varepsilon_n}{\Omega_n} = \frac{0,6}{0,9} = 0,667 \text{ рад/с}$$

$$\beta_0 = \frac{\Omega_n^2}{\varepsilon_{gap}} = \frac{0,9^2}{0,6} = 1,4 \text{ рад}$$

$$20lg \left| \frac{\beta_0}{\delta_{gap}} \right| = 20lg \frac{1,4}{0,833 \cdot \frac{\pi}{180}} = 39,7 \text{ дБ}$$

Рабочая точка имеет координаты А (0,667; 39,7).

По передаточной функции  $W(p) = \frac{61,7}{(1,1682 \cdot 10^{-2} p + 1)(5 \cdot 10^{-2} p + 1)p}$ , строим фактическую ЛАЧХ. И рабочую точку А (0,667; 39,7).



р.т. А



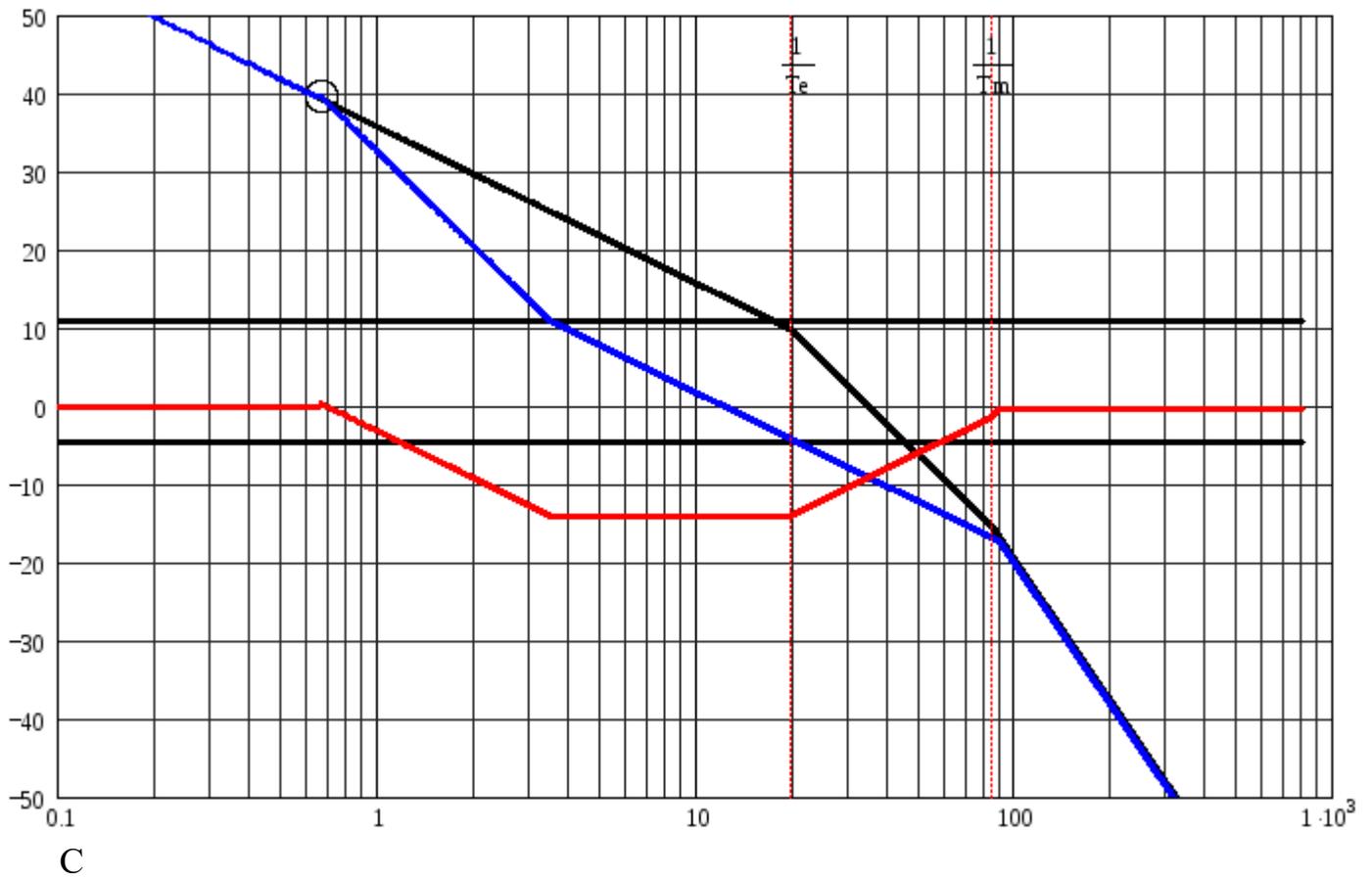
Как видно из графика, рабочая точка лежит на ЛАЧХ.

Построим желаемую ЛАЧХ. Для этого выбираем типовую желаемую ЛАЧХ. Так как задана колебательность привода  $M=1,4$ , то найдем переменные, между которыми должна быть заключена среднечастотная асимптота для обеспечения показателей качества:

$$20 \cdot \log \frac{M}{M-1} = \frac{1,4}{1,4-1} = 10,9$$

$$20 \cdot \log \frac{M}{M+1} = \frac{1,4}{1,4+1} = -4,7$$

Для совмещения желаемой и фактической ЛАЧХ необходимо сдвинуть желаемую ЛАЧХ до совмещения в обл. высоких частот.



**P.T.**

**L реал**

**L жел**

**L ку**

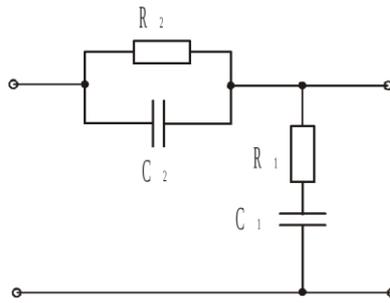
↪ оставление передаточной функции корректирующего звена. Строим передаточную функцию корректирующего звена, как разность желаемой и фактической ЛАЧХ.

$$K_0(p) = \frac{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}{(T_0 p + 1) \cdot (T_3 p + 1)}, \text{ где}$$

$$T_0 = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{0,667} = 1,5 \text{ с} \quad T_2 = \frac{1}{\omega_2} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ с}$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_1} = \frac{1}{3,5} = 0,2857 \text{ с} \quad T_3 = \frac{1}{\omega_3} = \frac{1}{90} = 0,0111 \text{ с}$$

Подбор корректирующего звена. По виду передаточной функции выбираем корректирующее звено.



Параметры корректирующего звена находятся из соответствий

$(T_0 + T_3) - (T_1 + T_2) = R_2 C_1$ ; зададимся  $C_1 = 10 \text{ мкФ}$ , тогда:

$$R_1 = \frac{T_1}{C_1} = \frac{0,2857}{10 \cdot 10^{-6}} = 28,57 \text{ кОм};$$

$$R_2 = \frac{(T_0 + T_3) - (T_1 + T_2)}{C_1} = \frac{(1,5 + 0,0111) - (0,2857 + 0,05)}{10 \cdot 10^{-6}} = 50,72 \text{ кОм}$$

$$C_2 = \frac{T_2}{R_2} = \frac{0,05}{50,72 \cdot 10^3} = 1 \text{ мкФ}$$

Таким образом параметры корректирующего звена определены. Это звено имеет передаточную функцию:

$$K_0(p) = \frac{(0,2857p + 1) \cdot (0,05p + 1)}{(1,5p + 1) \cdot (0,0111p + 1)}$$

Тогда передаточная функция привода с корректирующим звеном определяется по формуле:

$$W_{\text{жс}}(p) = K_0(p)W(p) = \frac{\mu}{p \cdot (T_M \cdot p + 1)(T_E \cdot p + 1)} \cdot \frac{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}{(T_0 p + 1) \cdot (T_3 p + 1)};$$

$$\begin{aligned} W_{\text{жс}}(p) &= \frac{61,7}{p \cdot (0,05 \cdot p + 1) \cdot (0,011682 \cdot p + 1)} \cdot \frac{(0,2857p + 1) \cdot (0,05p + 1)}{(1,5p + 1) \cdot (0,0111p + 1)} = \\ &= \frac{61,7(0,2857p + 1)}{(0,011682p + 1)(0,0111p + 1)(1,5p + 1)p} \end{aligned}$$

## Практическое занятие №4.

### Расчет усилителя

В цепь включается силовой трансформатор на 150Вт для преобразования напряжения. Коэффициент трансформации  $k_{\text{тран}} = \frac{U_{\text{двиг}}}{U_{\text{пит}}} = \frac{275}{18} = 15,3$

Подбор транзисторов. Усилитель состоит из составных транзисторов, для обеспечения требуемого тока базы.

Двигатель имеет следующие параметры:

$$U_{\text{ном}} = 275 \text{ В}$$

$$I_y = 0,55 \text{ А}$$

$$P_{\text{ном}} = 24,7 \text{ Вт}$$

При полном открывании VT2 все напряжение двух источников прикладывается к VT1, поэтому VT1 должен иметь допустимое напряжение

$$U_{\text{кэ}} = \frac{2 \cdot \frac{U_{\text{ДВИГ}}}{K_{\text{ТР}}} + U_{\text{НАС}}}{0,9} = \frac{2 \cdot \frac{275}{15,3} + 2}{0,9} = 42 \text{ В}$$

Ток коллектора

$$I_{\text{к}} = 2 \cdot I_{\text{ДВИГ}} \cdot K_{\text{ТР}} = 2 \cdot 0,55 \cdot 15,3 = 16,8 \text{ А}$$

По найденным значениям  $U_{\text{кэmax}}$ ,  $I_{\text{кmax}}$  выбираются по справочнику конкретные типы транзисторов. Выписывается их допустимая мощность рассеяния  $P_{\text{к max}}$  и статический коэффициент усиления  $h_{21}$ .

	Тип	$I_{\text{к max}}$ , А	$U_{\text{кэ}}$ , В	$P$ , Вт	$h_{21}$
VT1	n-p-n 2Т827В	20	60	125	6000
VT2	p-n-p 2Т825В	20	45	160	6000

Выполним проверку выбранных транзисторов по допустимой мощности

$$P_{\text{к max}} = 125 \text{ Вт} \quad P_{\text{к max}} = 160 \text{ Вт}$$

$$I_{к2Т827В} = \frac{P_{кmax}}{U_{к}} = \frac{125}{U_{к}} I_{к2Т825В} = \frac{P_{кmax}}{U_{к}} = \frac{160}{U_{к}}$$

Строим кривые мощности для 2Т827В и 2Т825В

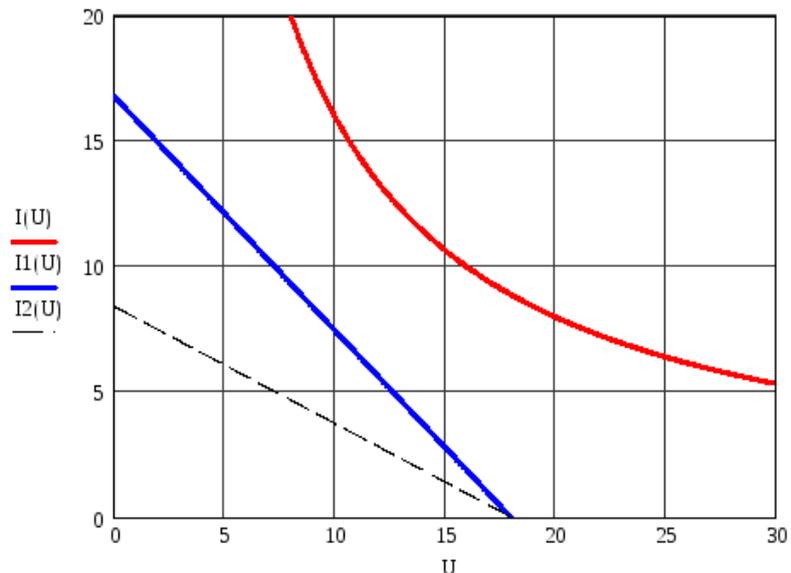
Построение кривой мощности для 2Т827В

Построение кривой мощности для 2Т825В

Транзисторы по мощности проходят, так как кривая мощности  $P_{кmax}$  лежит выше нагрузочной прямой.

Требуемый ток  
 базы  $I_{\sigma} = \frac{I_{кmax}}{h_{21}} = \frac{16,8}{6000} = 2,8$  мА.

Выбор усилителя. Выбираем усилитель типа К140УД6



$$\pm U_{вых} = 10 \text{ В}$$

$$R_H = 1 \text{ кОм}$$

Собственный коэффициент усиления 50000

$$\pm U_n = 5-20 \text{ В}$$

$$I_n = 3 \text{ мА}$$

Расчет элементов входящих в схему.

Рассчитываемый усилитель

обладает коэффициентом усиления  $k_{yc} = 5970$ . Разобьем его на два последовательно включенных усилителя с коэффициентами усиления равными:  $K_{yc1} = 1000$  и  $K_{yc2} = 5970/1000 = 5,97$

$$\text{Входное сопротивление } R_1 = R_2 = 10R_{IP} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ Ом}$$

$$k_{yc1} = \frac{R_3}{R_1}, R_3 = R_1 \cdot k_{yc1} R_3 = 1 \cdot 10^3 \cdot 100 = 100 \text{ кОм}$$

Входное сопротивление  $R_4 = R_5 = 10R_{к2} = 10 \cdot 28000 = 280 \text{ кОм}$

$$k_{yc2} = \frac{R_6}{R_4}, R_6 = R_4 \cdot k_{yc2} R_6 = 280 \cdot 10^3 \cdot 5,97 = 1,6 \text{ МОм}$$

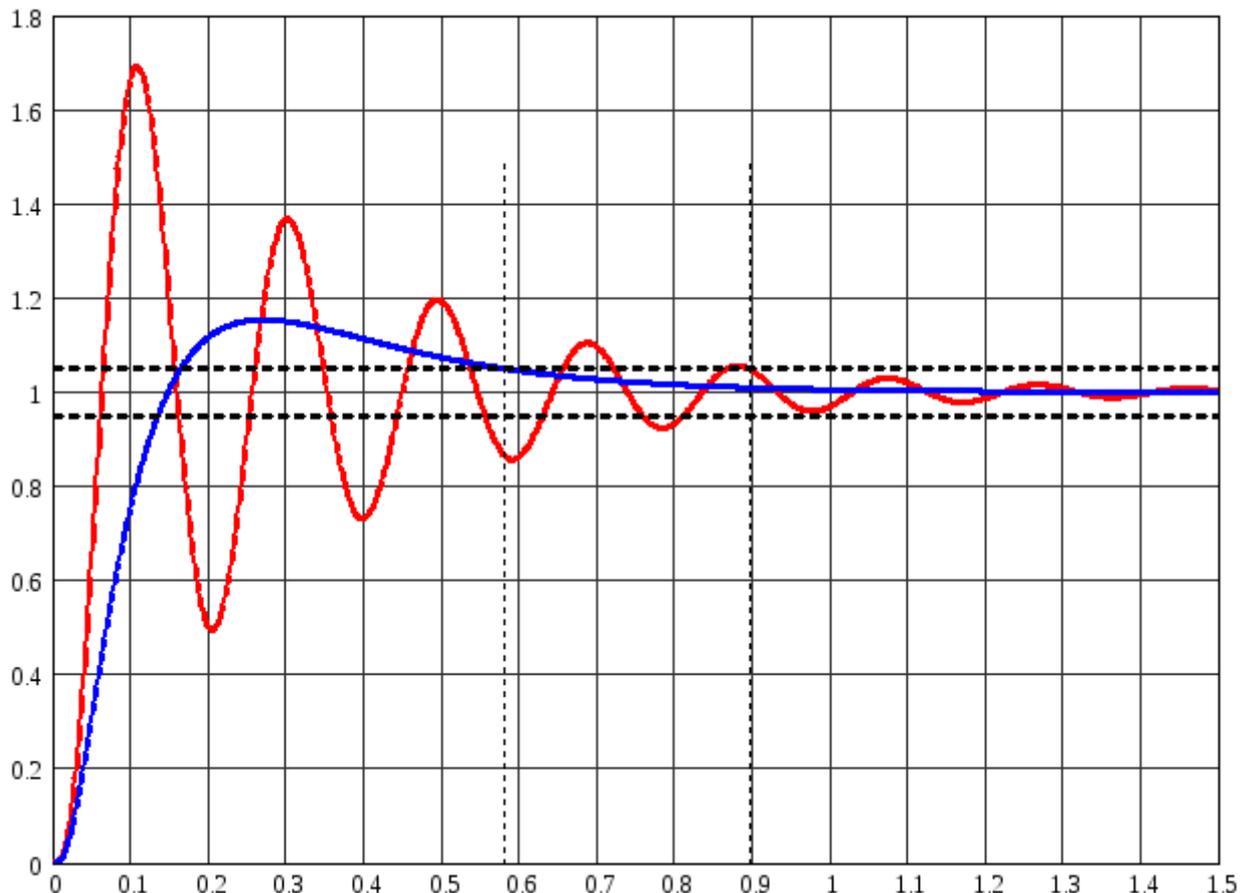
Стабилизаторы напряжения выбираются с напряжением стабилизации 15В (7815 и 7915). Ток стабилизации до 1,5А.

## Практическое занятие №5.

### Оценки качества регулирования

Сравним две системы с коррекцией и без неё по переходным процессам и с помощью точных ЛАЧХ и ЛФЧХ:

Построим переходный процесс  $h(t)$



Переходный процесс системы с последовательной коррекцией

Время регулирования  $t_p$  – это такой интервал времени, при котором регулируемая величина достигает установившегося значения с заданной точностью  $\Delta=5\%h_{уст}$ .

Время переходного процесса:  $t_p = 0.894$

Время переходного процесса (с коррекцией):  $t_p = 0.58$

Перерегулирование – максимальное отклонение выраженное в процентах.

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} 100\%$$

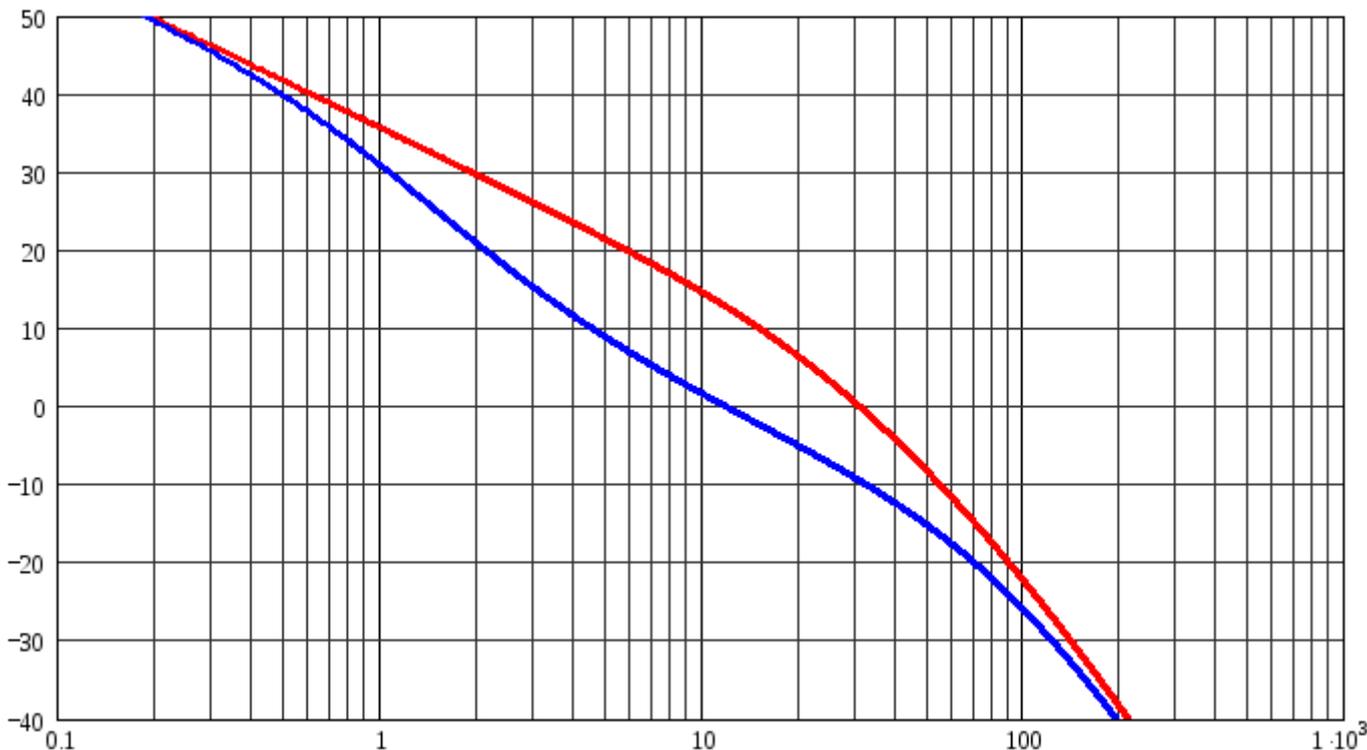
Перерегулирование (без коррекции):  $\sigma_1 = \frac{1,691 - 1}{1} 100\% = 69,1\%$

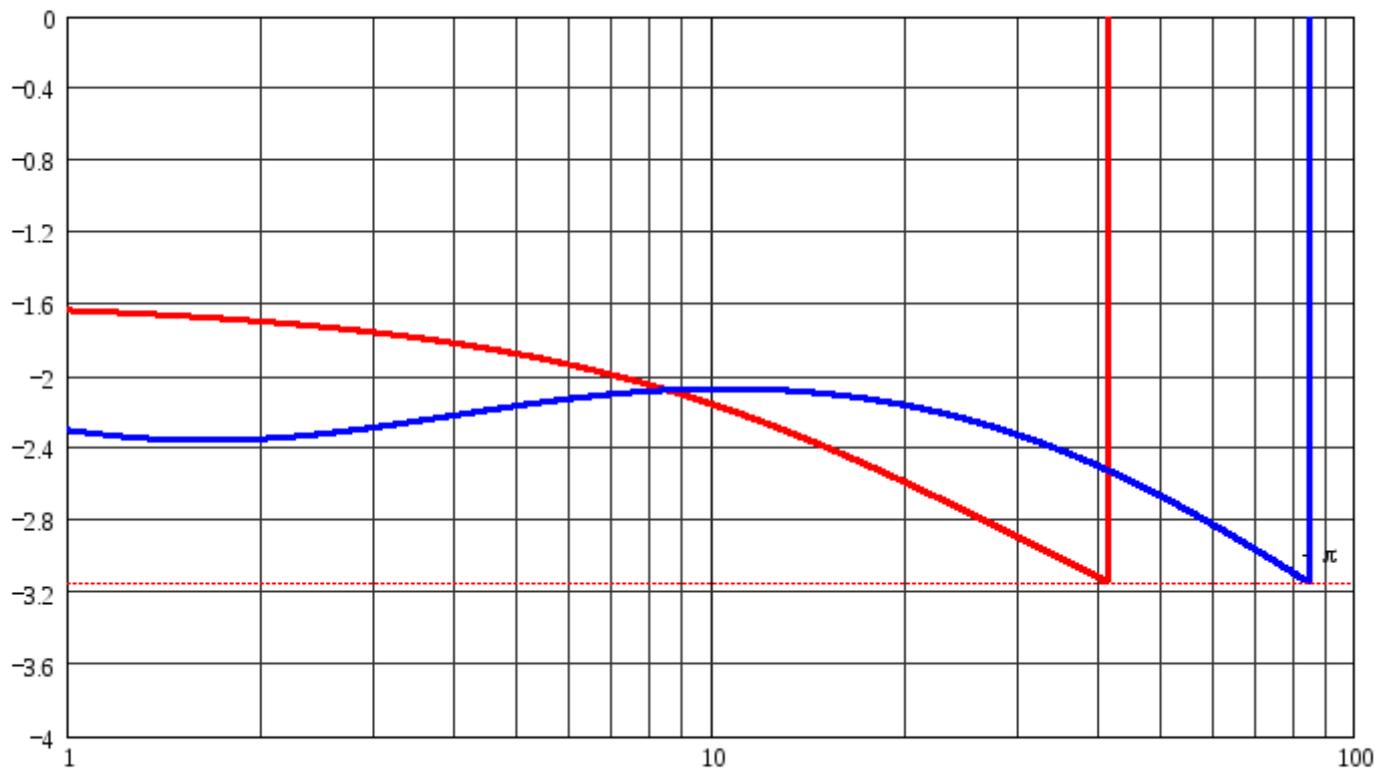
Перерегулирование (с коррекцией):  $\sigma_2 = \frac{1,154 - 1}{1} 100\% = 15,4\%$

$\omega_k := \frac{2 \cdot \pi}{T_k} = 32,502$      $T_k = 0,193$      $T_k := t_2 - t_1 = 0,255$      $t_1 = 0,061$     Расчет периода и частоты колебаний (система без коррекции):  
 собственных

Время нарастания – время, за которое регулируемая величина впервые достигает установившегося значения:  $t_n = 0,061$  с  $t_{нк} = 0,147$  с

Построим точные ЛАЧХ и ЛФЧХ.





По графику определяем запас устойчивости по фазе и по амплитуде:

$$G = 2,85 \text{ Дб}\Delta$$

$$F = 12,57 \text{ }^\circ\Delta$$

$$G_k = 15,343 \text{ Дб}\Delta$$

$$F_k = 51,061 \text{ }^\circ\Delta$$

Итак, по всем показателям система с коррекцией лучше.