СКОРОСТНОЙ СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Синтез регулятора тока для настройки контура тока на оптимум по модулю

В теории проектирования электроприводов (ЭП) широкое применение получили методы последовательной коррекции под названием «стандартные настройки» (СН).

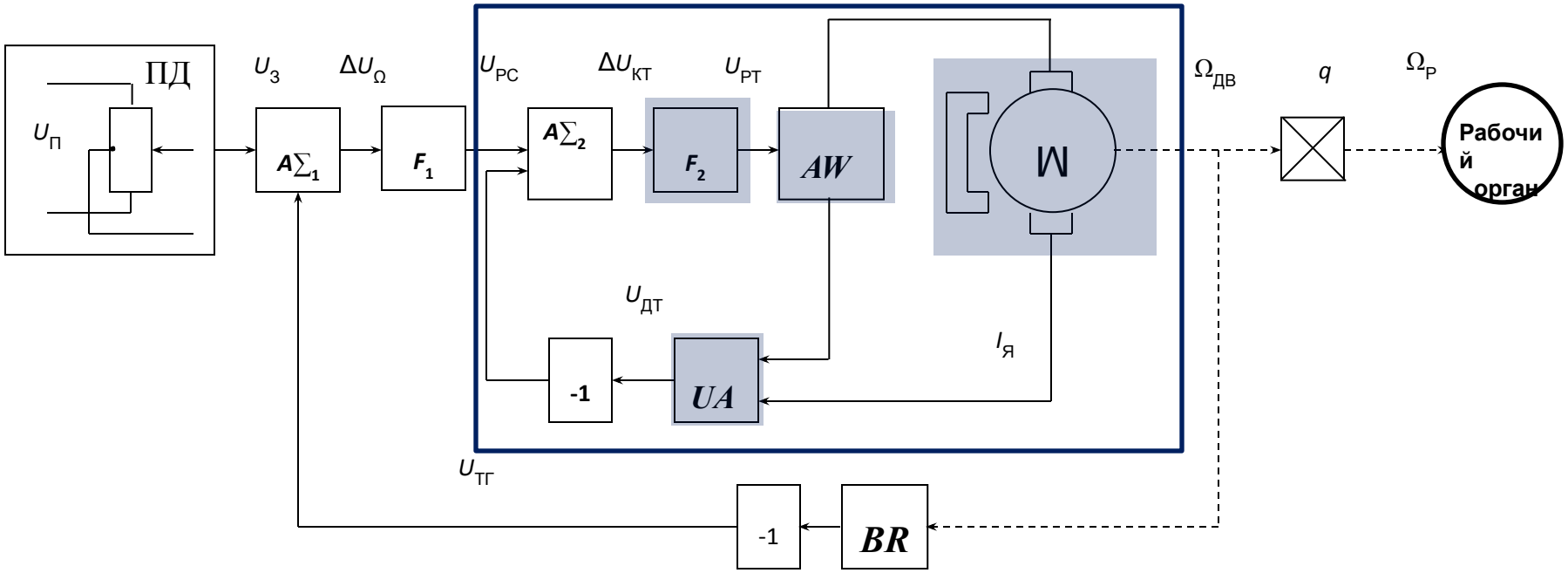
Различают два вида СН: настройка на оптимум по модулю (ОМ) и настройка на симметричный оптимум (СО).

При такой коррекции решается задача оптимального выбора параметров регулятора с целью получения заранее известного стандартного набора показателей качества процесса управления: времени нарастания $t_Н$, перерегулирования σ, запаса устойчивости по фазе $\theta_З$ и амплитуде $L_з$, числа колебаний N.

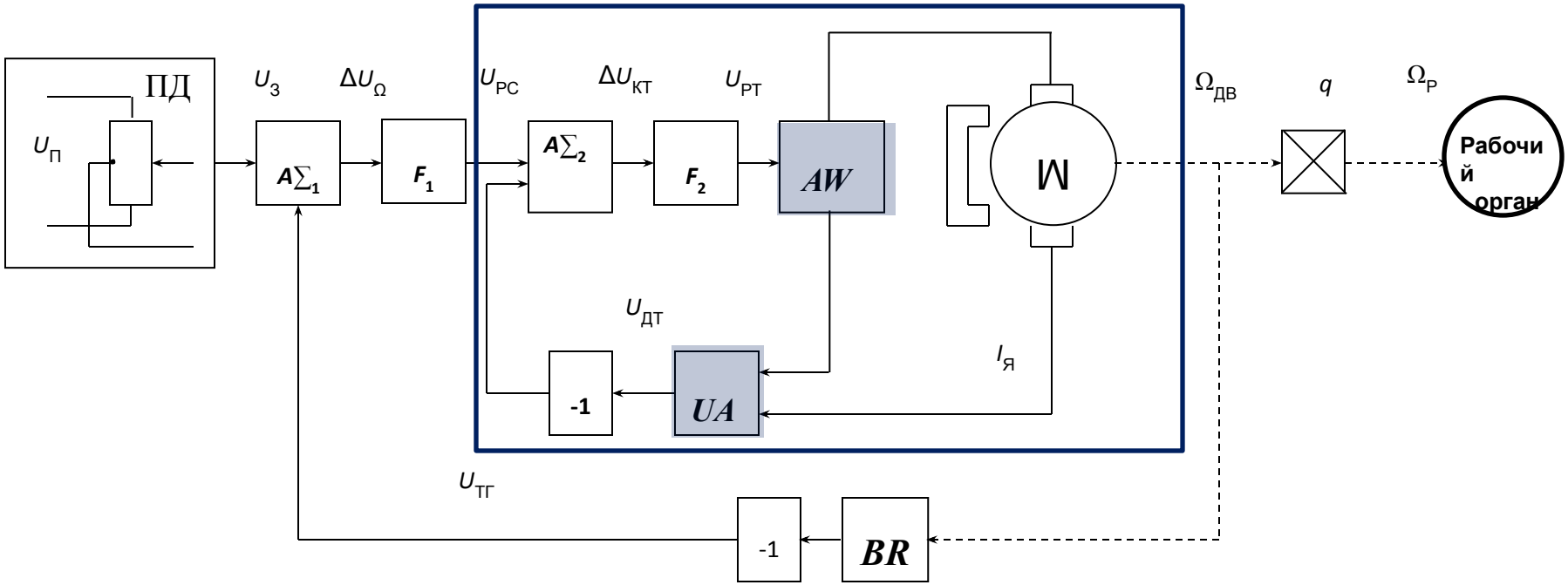
Настройкой контура на ОМ называется синтез регулятора с целью получения динамических характеристик замкнутого контура, близких к характеристикам колебательного звена с относительным коэффициентом затухания $\xi = 0{,}707$, перерегулированием $\sigma = 4{,}3\%$, запасом устойчивости по фазе $\theta_З = 63°$, временем нарастания $t_Н = 4{,}7T_\Sigma$.

При настройке контура на ОМ осуществляется компенсация больших постоянных времени силового канала ЭП и динамические процессы будут определяться суммарными малыми постоянными времени контура.

Согласно функциональной схемы, изображенной на рисунке , КТ состоит из РТ, БП, а также включает якорную цепь ЭД и ДТ. Динамические модели БП, ЭД и ДТ известны.



БП, как правило, включает широтно-импульсный преобразователь (ШИП), на выходе которого формируется последовательность импульсов переменной скважности γ и является существенно нелинейным элементом.



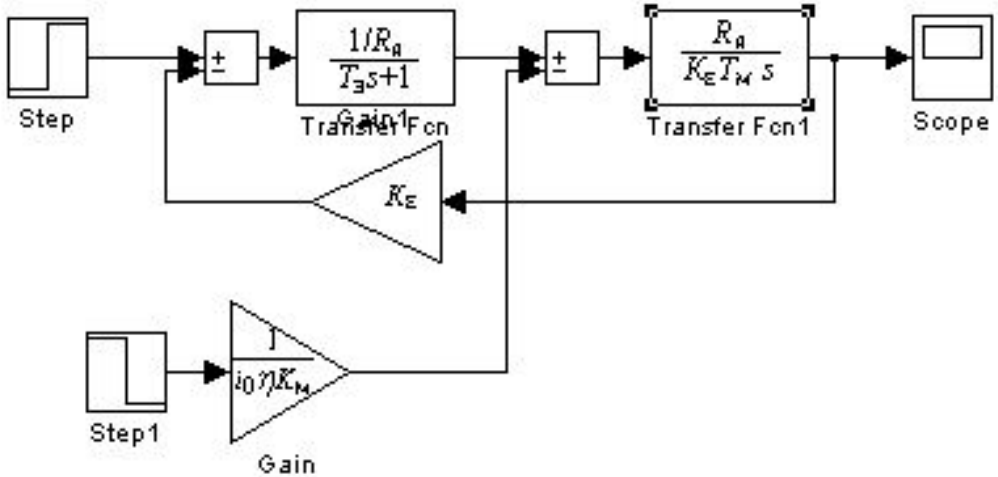
Вместе с тем, частота среза КТ находится значительно ниже зоны рабочих частот БП и, поэтому, для решения практических задач полагают, что динамические свойства БП, с большой степенью точности, описываются инерционным звеном с передаточной функцией

$$W_{БП}(s) = \frac{K_{БП}}{T_{БП}s + 1} \qquad (5.1)$$

ДТ формирует сигнал, пропорциональный току $I_Я$, протекающему в обмотке якоря Его динамические свойства также описываются инерционным звеном

$$W_{ДТ}(s) = \frac{K_{ДТ}}{T_{ДТ}s + 1} \qquad (5.2)$$

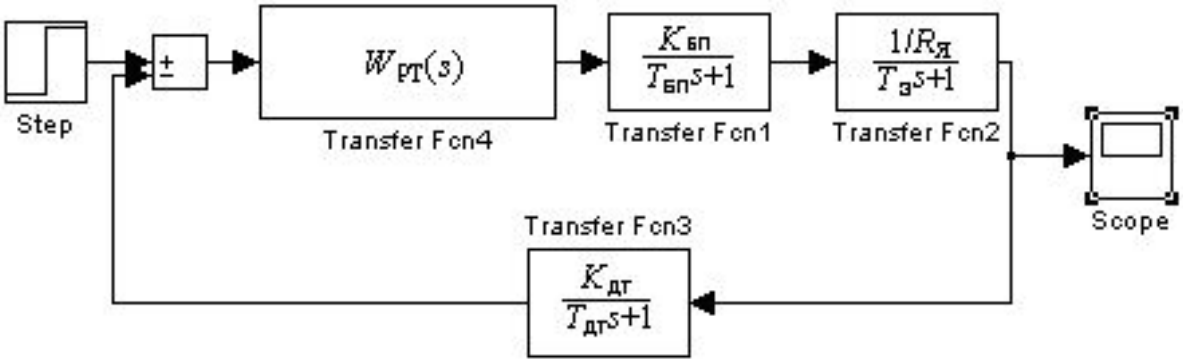
Параметры динамической модели ЭД рассчитаны на предыдущем занятии, поэтому синтез РТ сводится к определению его структуры и расчету параметров, обеспечивающих настройку КТ на ОМ.



$$W_{БП}(s) = \frac{K_{БП}}{T_{БП}s + 1}$$

$$W_{ДТ}(s) = \frac{K_{ДТ}}{T_{ДТ}s + 1}$$

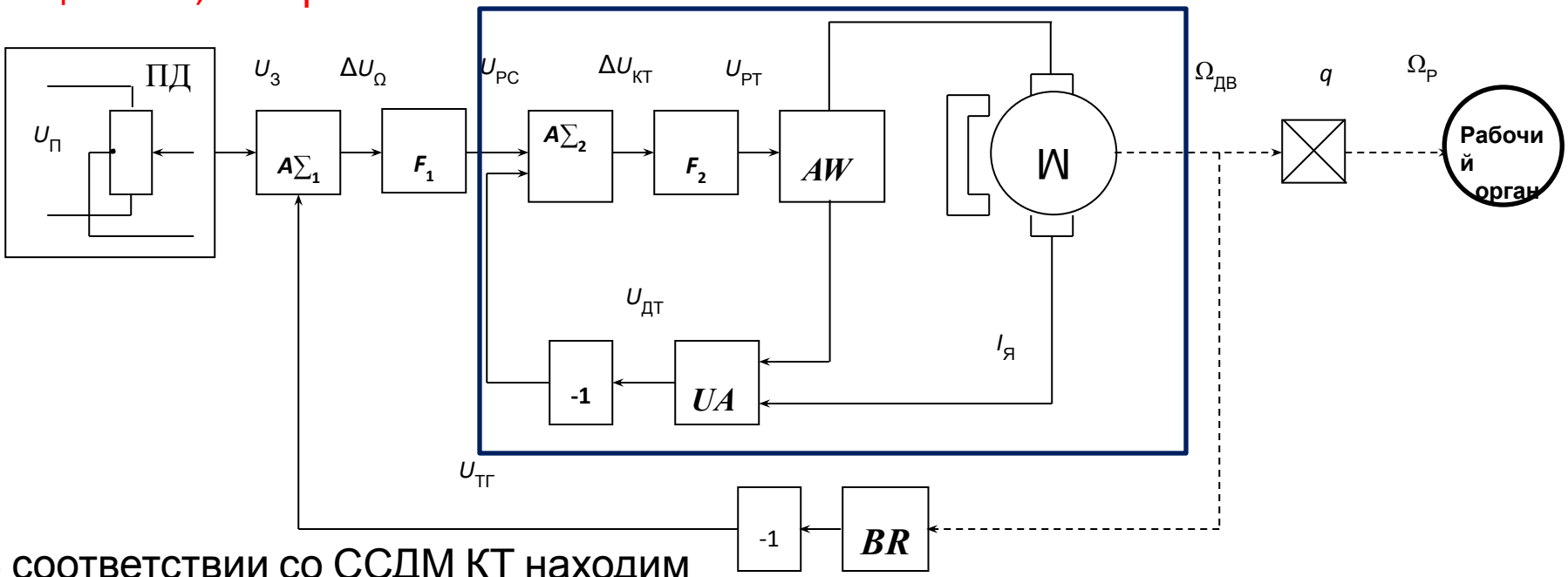
На основании изложенного ССДМ КТ принимает вид, изображенный на рисунке



Структурная схема динамической модели контура тока

Расчет параметров регулятора тока и построение динамической модели контура тока

Для определения структуры РТ необходимо рассчитать передаточную функцию разомкнутого КТ и сопоставить полученное выражение с известной передаточной функцией КТ, настроенного на ОМ.



В соответствии со ССДМ КТ находим

$$W_{КТ}(s)=\frac{U_{ДТ}(s)}{\Delta U_{КТ}(s)}=W_{РТ}(s)\frac{K_{БП}}{T_{БП}s+1}\cdot\frac{1/R_Я}{T_Э s+1}\cdot\frac{K_{ДТ}}{T_{ДТ}s+1} \qquad (5.3)$$

В полученном выражении постоянные времени БП $T_{БП}$ и ДТ $T_{ДТ}$ следует отнести к малым постоянным времени.

Передаточная функция КТ, настроенного на ОМ

$$W_{КТ}(s)=\frac{1}{2T_{\Sigma}^{КТ}s\left(T_{\Sigma}^{КТ}s+1\right)}, \qquad (5.4)$$

где $T_{\Sigma}^{КТ}=T_{БП}+T_{ДТ}$ суммарная малая постоянная времени КТ.

Приравнивая правые части выражений (5.3) и (5.4)

$$W_{\text{РТ}}(s)\cdot\frac{K_{\text{БП}}}{T_{\text{БП}}s+1}\cdot\frac{1/R_{\text{Я}}}{T_{\text{Э}}s+1}\cdot\frac{K_{\text{ДТ}}}{T_{\text{ДТ}}s+1}=\frac{1}{2T_{\Sigma}^{\text{КТ}}s\left(T_{\Sigma}^{\text{КТ}}s+1\right)}.$$

находим передаточную функцию РТ

$$W_{\text{РТ}}(s)=\frac{R_{\text{Я}}\left(T_{\text{Э}}s+1\right)}{K_{\text{БП}}K_{\text{ДТ}}2T_{\Sigma}^{\text{КТ}}s} \qquad (5.5)$$

Полученное выражение по своей структуре является передаточной функцией ПИ-регулятора

$$W_{\text{РТ}}(s)=\frac{K_{\text{РТ}}\left(T_{\text{РТ}}s+1\right)}{T_{\text{РТ}}s} \qquad (5.6)$$

Сравнив (5.5) и (5.6), получим формулы для расчета коэффициента передачи $K_{\text{РТ}}$ и постоянной времени $T_{\text{РТ}}$ РТ

$$K_{\text{РТ}}=\frac{R_{\text{Я}}T_{\text{РТ}}}{2T_{\Sigma}^{\text{КТ}}K_{\text{БП}}K_{\text{ДТ}}}; \qquad (5.7)$$

$$T_{\text{РТ}}=T_{\text{Э}} \qquad (5.8)$$

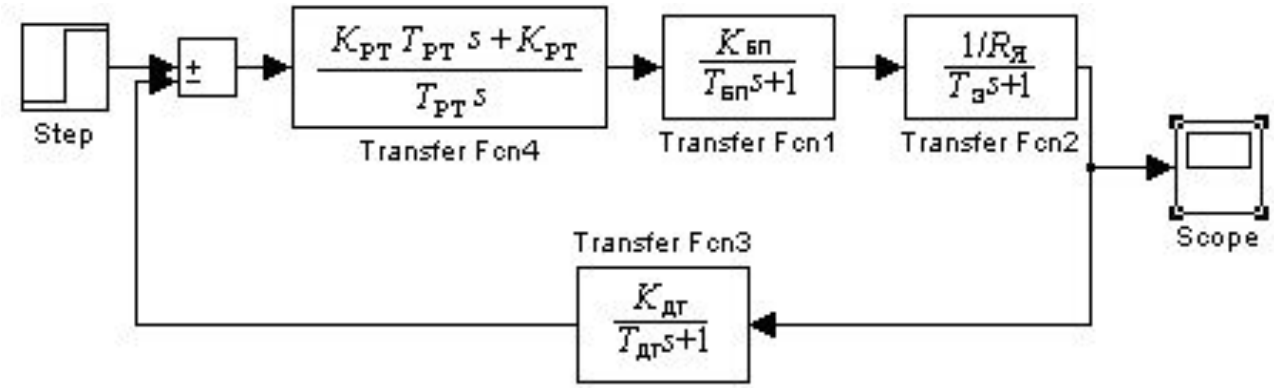
Для вычисления коэффициента передачи датчика тока необходимо применить формулу

$$K_{\text{ДТ}}=\frac{U_{\text{ВХ}}^{\text{КТ}}}{I_{\text{НОМ}}} \qquad (5.9)$$

Следует заметить, что прежде, чем приступить к моделированию КТ на ЭВМ, необходимо раскрыть скобки в (5.6), тогда

$$\frac{K_{\text{РТ}}\left(T_{\text{РТ}}s+1\right)}{T_{\text{РТ}}s}=\frac{K_{\text{РТ}}T_{\text{РТ}}s+K_{\text{РТ}}}{T_{\text{РТ}}s} \qquad (5.10)$$

После замены передаточной функции РТ $W_{\text{РТ}}(s)$ на функцию (5.9) получим ССДМ КТ, настроенного на ОМ .



Структурная схема динамической модели контура тока с ПИ-регулятором тока

Пример Определить параметры РТ и построить динамическую модель КТ скоростного следящего ЭП с ЭД МИ-22, если коэффициент передачи БП $K_{БП}$=30; постоянная времени фильтра $T_{Ф}$=0,0024 с; число пульсаций выпрямленного напряжения за период m=2; частота питающего напряжения бортового преобразователя $f_{П}$=400 Гц; входное напряжение суммирующего усилителя контура тока $U_{вх}^{КТ}$ = 10 В, постоянная времени ДТ $T_{ДТ}$=0,001 с.

Решение.

1. Рассчитываем коэффициент передачи ДТ по формуле (5.9)

$$K_{ДТ} = \frac{U_{ВХ}^{КТ}}{I_{НОМ}} = \frac{10}{8,2} = 1,22 B/A$$

При использовании в качестве датчика тока шунта, его сопротивление определяется по формуле

$$R_{Ш} = K_{ДТ} = 1,22 ОМ$$

2. Рассчитываем суммарную малую постоянную времени КТ.

Номинальная мощность ЭД МИ-22 $P_{НОМ}$=0,37 кВт. Согласно методических указаний номинальная мощность выбранного ЭД превышает значение 0,2 кВт. Поэтому постоянная времени БП определится по формуле

$$T_{БП} = T_{Ф} + \frac{1}{2 f_{П} m} = 0,0024 + \frac{1}{2 \cdot 400 \cdot 2} = 0,003 \text{ с.}$$

Для расчета суммарной малой постоянной времени КТ воспользуемся выражением (5.4), тогда

$$T_{\Sigma}^{\text{КТ}} = T_{\text{БП}} + T_{\text{ДТ}} = \quad 0{,}003 + 0{,}001 = 0{,}004 \text{ с.}$$

3. Определяем параметры РТ.

По формуле (5.7) рассчитываем коэффициент передачи РТ

$$K_{\text{РТ}} = \frac{R_{\text{Я}} T_{\text{Э}}}{2 T_{\Sigma}^{\text{КТ}} K_{\text{БП}} K_{\text{ДТ}}} = \frac{0{,}192 \cdot 0{,}003}{2 \cdot 0{,}004 \cdot 30 \cdot 1{,}22} = 0{,}001967.$$

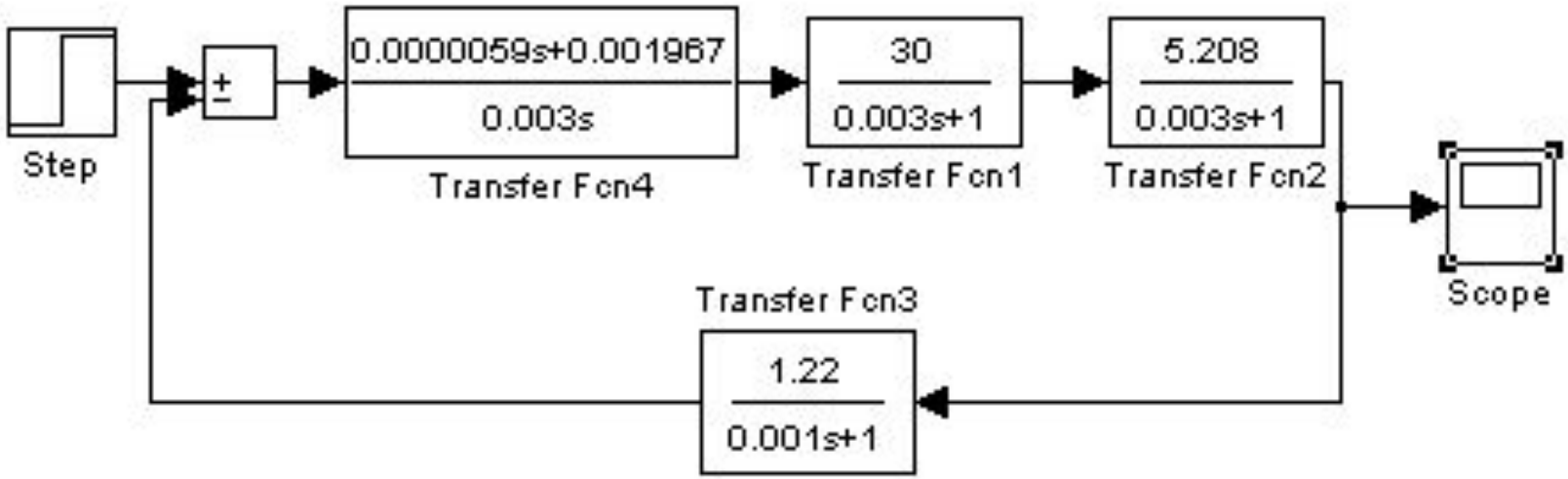
Постоянная времени РТ, согласно (5.8), определится в виде:

$$T_{\text{РТ}} = T_{\text{Э}} = 0{,}003 \text{ с.}$$

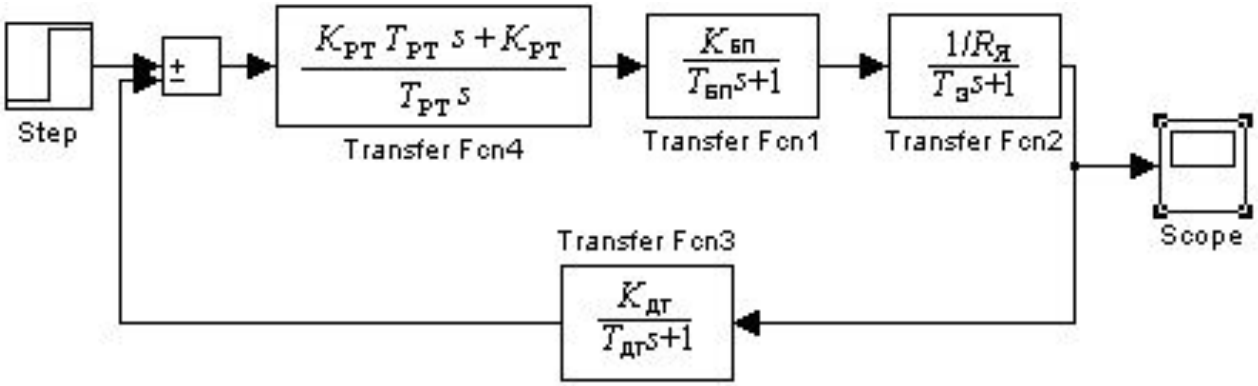
4. Для построения ССДМ КТ в соответствии с (5.10), находим

$$W_{\text{РТ}}(s) = \frac{K_{\text{РТ}} T_{\text{РТ}} s + K_{P\text{Т}}}{T_{\text{РТ}} s} = \frac{0{,}001967 \cdot 0{,}003 s + 0{,}001967}{0{,}003 s} = \frac{0{,}0000059 s + 0{,}001967}{0{,}003 s}.$$

Подставив заданные и рассчитанные числовые значения в схему ССДМ КТ, получаем ССДМ КТ, настроенного на ОМ с числовыми значениями.



Структурная схема динамической модели контура тока с числовыми значениями



Структурная схема динамической модели контура тока с ПИ-регулятором тока

$$K_{РТ} = \frac{R_Я T_Э}{2T_\Sigma^{КТ} K_{БП} K_{ДТ}}$$

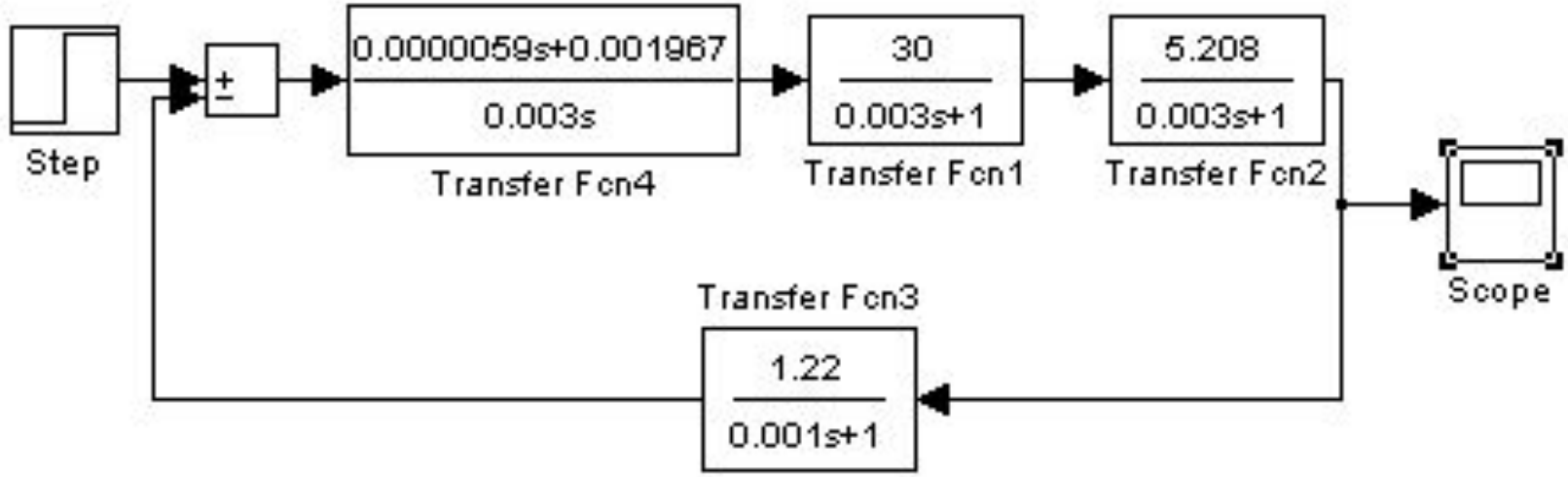
$$T_{БП} = T_Ф + \frac{1}{2 f_П m} \qquad T_\Sigma^{КТ} = T_{БП} + T_{ДТ} \qquad T_{РТ} = T_Э \qquad K_{ДТ} = \frac{U_{ВХ}^{КТ}}{I_{НОМ}}$$

$$K_Е = \frac{U_{НОМ} - I_Я R_Я}{\Omega_{НОМ}} \qquad K_М = \frac{M_{НОМ}}{I_Я} \qquad T_М = \frac{(J_{ДВ} + \frac{J_Р}{i_1^2}) R_Я}{K_Е K_М} \qquad L_Я < \frac{T_М R_Я}{4} \qquad T_Э = \frac{L_Я}{R_Я}$$

Моделирование контура тока и анализ полученных результатов

Для моделирования используется пакет моделирующих программ MATLAB-SIMULINK, позволяющий получить графики переходной характеристики и логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) КТ, настроенного на ОМ.

Задача моделирования решается на основании ССДМ КТ, полученной на предыдущем занятии, при условии, что $E(s)=0$. По результатам моделирования определяются прямые и косвенные показатели качества и проводится сравнительный анализ полученных данных с данными технических требований к ЭП, сформулированными в задании.



Структурная схема динамической модели контура тока с числовыми значениями

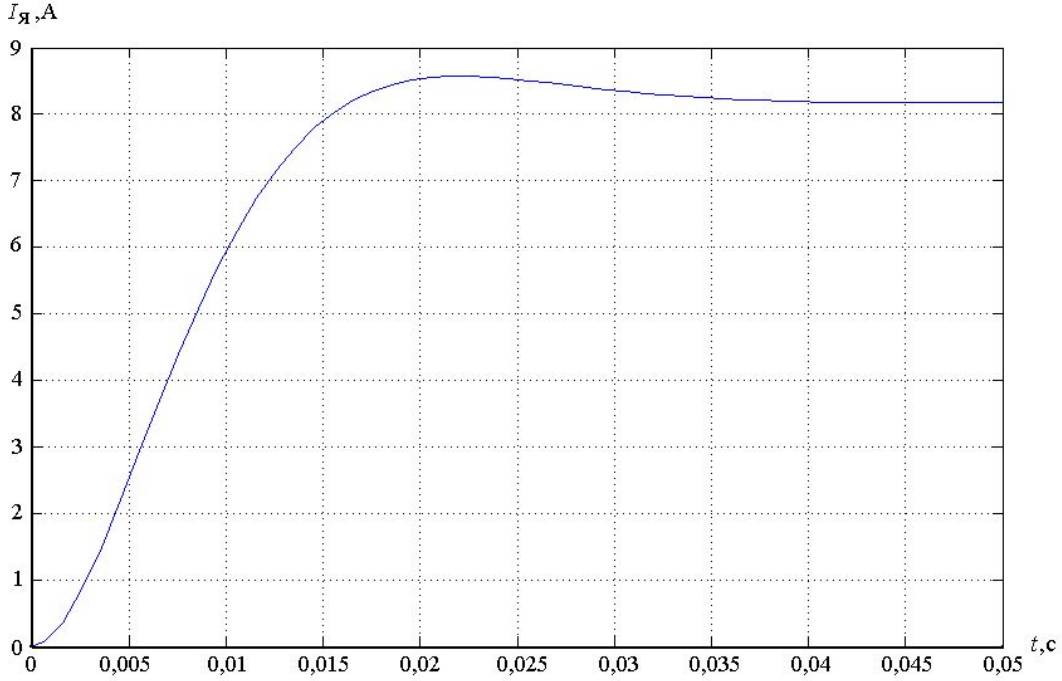
Пример. Построить переходную характеристику КТ и ЛЧХ с применением моделирующей программы и провести анализ результатов моделирования.

Решение

1. Построение переходной характеристики КТ по задающему воздействию

Значение задающего воздействия на КТ принимаем равным $U_{\text{ВХ}}^{\text{КТ}} = 10\text{В}$

Согласно методике, рассмотренной ранее, получаем переходную характеристику КТ по задающему воздействию, изображённую на рисунке. Рекомендуемое время решения задачи (Simulation) составляет 0,05 с.



Переходная характеристика контура тока по задающему воздействию

2. Построение ЛЧХ КТ

Для построения ЛЧХ необходимо определить передаточную функцию разомкнутого контура тока, которая определяется как отношение изображения по Лапласу тока якоря $I_Я(s)$ к сигналу рассогласования с выхода суммирующего усилителя КТ $\Delta U_{КТ}(s)$

$$W_{КТ}(s) = \frac{I_Я(s)}{\Delta U_{КТ}(s)} \qquad (5.11)$$

Поскольку все элементы в цепи КТ соединены последовательно, то выражение (5.11) определится как произведение всех передаточных функций элементов, входящих в КТ

$$W_{КТ}(s) = W_{РТ}(s) \cdot W_{БП}(s) \cdot W_{ОЯ}(s) \cdot W_{ДТ}(s) \qquad (5.12)$$

В выражении (5.12) $W_{ОЯ}(s)$ является передаточной функцией обмотки якоря.

Таким образом, в командном окне (Command Windows) программы Matlab 6.5 необходимо составить произведение (5.12), предварительно обозначив соответствующие передаточные функции как:

sys1= $W_{РТ}(s)$ sys2= $W_{БП}(s)$ sys3= $W_{ОЯ}(s)$ sys4= $W_{ДТ}(s)$

Для набора обозначенных передаточных функций необходимо предварительно записать числитель и знаменатель соответствующего блока. Например, если передаточная функция имеет вид

$$W_1(s) = \frac{b_1 s + b_0}{d_1 s + d_0}$$

то в командном окне необходимо произвести следующую запись

num1=[b_1 b_0];
den1=[d_1 d_0];
sys1=tf(num1,den1).

После набора программы для контроля правильности обозначений следует нажать Enter. Коэффициенты числителя b_1, b_0 и знаменателя d_1, d_0 записываются через пробел.

Для построения ЛЧХ КТ используется результат произведения (5.12). Чтобы построить ЛЧХ, необходимо задать логарифмическое пространство logspace(-n,n). Значение (-n,n) обозначает показатели степени при основании 10, указывающие диапазон частот, в котором будут построены ЛЧХ. Например, если n=3, диапазон частот составляет

10^{-3} – 10^{3} рад/с, т.е. 0,001 – 1000 рад/с.

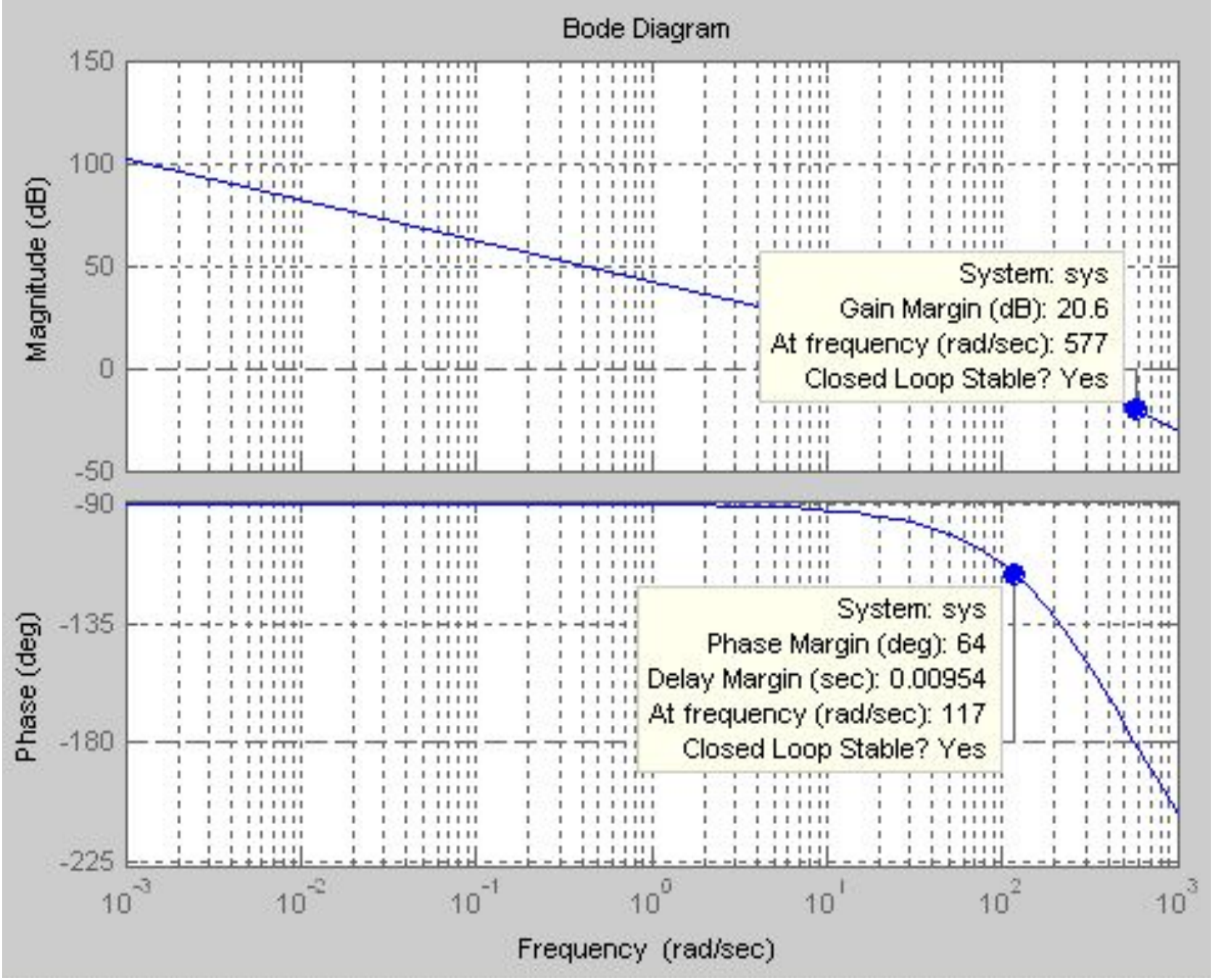
Соответственно программа для получения ЛЧХ КТ принимает вид:

```
>> num1=[0.0000059 0.001967];
>> den1=[0.003 0];
>> sys1=tf(num1,den1)

Transfer function:
5.9e-006 s + 0.001967
---------------------
      0.003 s

>> num2=[30];
>> den2=[0.003 1];
>> sys2=tf(num2,den2)

Transfer function:
   30
-----------
0.003 s + 1

>> num3=[5.208];
>> den3=[0.003 1];
>> sys3=tf(num3,den3)

Transfer function:
  5.208
-----------
0.003 s + 1
```

```
>> num4=[1.22];
>> den4=[0.001 1];
>> sys4=tf(num4,den4)

Transfer function:
  1.22
-----------
0.001 s + 1

>> sys5=sys1*sys2*sys3*sys4

Transfer function:
                0.001125 s + 0.3749
-----------------------------------------------------
2.7e-011 s^4 + 4.5e-008 s^3 + 2.1e-005 s^2 + 0.003 s
```

```
>> w=logspace(-3,3);
>> bode(sys5,w)
```

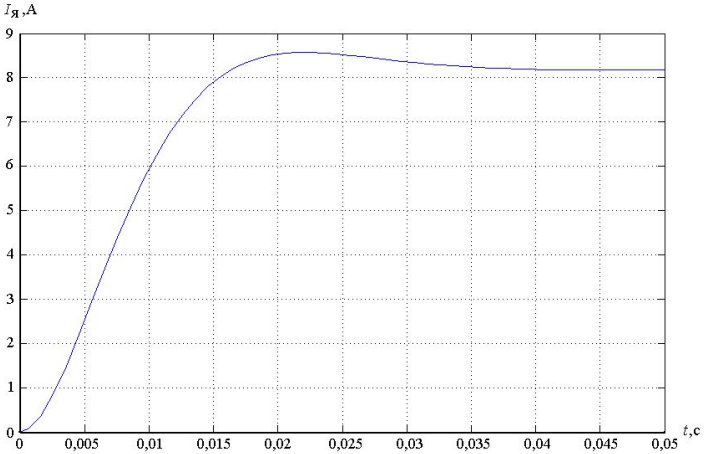
На следующем рисунке представлены результаты моделирования.



ЛЧХ контура тока

4. Анализ результатов моделирования

Анализ переходной характеристики.



Определяем величину перерегулирования $\sigma_{КТ}$ и время нарастания $t_Н^{КТ}$

Перерегулирование рассчитаем по формуле

$$\sigma_{КТ} = \frac{I_{max} - I_{уст}}{I_{уст}} \cdot 100\%. \qquad (5.13)$$

По рисунку 5.4 или по таблице результатов определяем максимальное отклонение тока якоря

$$I_{max} = 8{,}55 \text{ А}$$

и установившееся значение

$$I_{уст} = 8{,}2 \text{ А}.$$

по формуле (5.13) находим

$$\sigma_{КТ} = \frac{I_{max} - I_{уст}}{I_{уст}} \cdot 100\% = \frac{8{,}55 - 8{,}2}{8{,}2} \cdot 100\% = 4{,}3\%.$$

Время нарастания $t_Н^{КТ}$ определим в первой точке пересечения графика переходной функции и установившегося значения тока якоря

Из графика переходной характеристики находим $t_Н^{КТ} = 0{,}018$ с.

Сравнивая результаты моделирования и технические требования задания, делаем вывод о том, что параметры РТ рассчитаны правильно, а КТ настроен на ОМ.

$$t_Н^{КТ} = 4{,}7\, T_\Sigma^{КТ} = 4{,}7 \cdot 0{,}004 = 0{,}0188 \text{ с}.$$

Анализ ЛЧХ.

Запас устойчивости по фазе $\theta_З^{КТ}$ находим по нижнему графику (Phase) на частоте среза

$$\omega_С^{КТ} = 117 \text{рад/с (rad/sec)}$$

Значение запаса по фазе $\theta_З^{КТ} = 64°$ (deg)

Напомним, что частота среза соответствует точке пересечения логарифмической амплитудно-частотной характеристики (Magnitude) с осью частот.

Для проверки необходимо рассчитать частоту среза аналитически

$$\omega_С^{КТ} = \frac{1}{2T_\Sigma^{КТ}} = \frac{1}{2 \cdot 0{,}004} = 125 \text{ рад/с}$$

Полученное значение соответствует результатам моделирования.

Запас устойчивости по амплитуде $L_З^{КТ}$ определяем по верхнему графику (Magnitude)

Значение запаса по амплитуде $L_З^{КТ} = 20{,}6 \text{ дБ (dB)}$

Частота $\omega_\pi^{КТ} = 577 \text{рад/с (rad/sec)}$ соответствует точке пересечения логарифмической фазо-частотной характеристики (Phase) с линией -180° (-π).

Запасы устойчивости по фазе и амплитуде соответствуют настроенным параметрам ПИ-регулятора и удовлетворяют требованиям технического задания

Исходные данные

№ п/п	$J_н$, кг · м^2	$M_н$, Н · м	$Ω_н$, град/с	$ε_н$ град/с	$K_{бп}$	$T_ф$, с	m	, В	$T_{дт}$, с	, В	$T_{тг}$, с	η
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	142	250	10	6	10	0,001	2	15	0,002	3	0.008	0.80
2	345	155	18	3	12	0,002	3	14	0,004	4	0,007	0,85
3	48	60	70	25	14	0,003	6	13	0,006	5	0,008	0,90
4	251	65	60	24	16	0,004	9	12	0,008	6	0,005	0,90
5	254	90	97	25	18	0,005	12	11	0,007	7	0,006	0,90
6	57	75	100	37	20	0,006	9	10	0,005	8	0,007	0,92
7	160	80	62	25	22	0,001	6	9	0,003	10	0,008	0,82
8	263	85	84	30	24	0,002	3	8	0,003	9	0,01	0,88
9	366	80	16	14	26	0,003	2	7	0,004	11	0,008	0,90
10	269	95	48	11	28	0,004	3	6	0,006	12	0,007	0,85
11	172	100	80	42	10	0,005	6	5	0,008	13	0,006	0,90
12	375	105	23	5	12	0,006	9	4	0,007	14	0,005	0,92
13	78	10	100	80	14	0,001	12	3	0,005	15	0,006	0,88
14	81	15	72	20	16	0,002	9	15	0,003	5	0,007	0,85
15	184	120	33	15	18	0,003	6	14	0,002	6	0,008	0,90
16	187	125	86	15	20	0,003	3	13	0,004	7	0,01	0,92
17	100	130	38	9	22	0,005	2	12	0,006	8	0,008	0,80
18	205	135	41	8	24	0,006	3	11	0,008	9	0,007	0,85
19	110	140	52	11	26	0,001	6	10	0,007	4	0,006	0,82

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
20	115	145	54	18	28	0,002	9	9	0,005	5	0,008	0,90
21	120	150	56	16	10	0,001	12	8	0,003	10	0,006	0,80
22	126	160	60	12	12	0,004	9	7	0,002	11	0,007	0,87
23	132	170	58	17	14	0,005	6	6	0,004	12	0,008	0,80
24	138	180	53	6	16	0,003	3	5	0,006	13	0,01	0,85
25	144	190	50	23	18	0,001	2	4	0,005	15	0,008	0,90
26	151	200	47	22	20	0,002	3	3	0,004	10	0,007	0,95
27	155	190	44	21	22	0,003	2	4	0,005	9	0,006	0,90
28	159	185	40	20	24	0,004	3	5	0,003	8	0,005	0,92
29	163	180	42	8	26	0,005	6	6	0,002	7	0,007	0,82
30	160	170	38	10	28	0,006	9	7	0,004	6	0,008	0,88