



ІІТМО

Электрический привод

Практика 3. «Моделирование механики электропривода»

**Маматов Александр Геннадьевич, к.т.н., ассистент ф. СУиР,
руководитель группы научно-технического развития,
НПЦ «Прецизионная Электромеханика»**

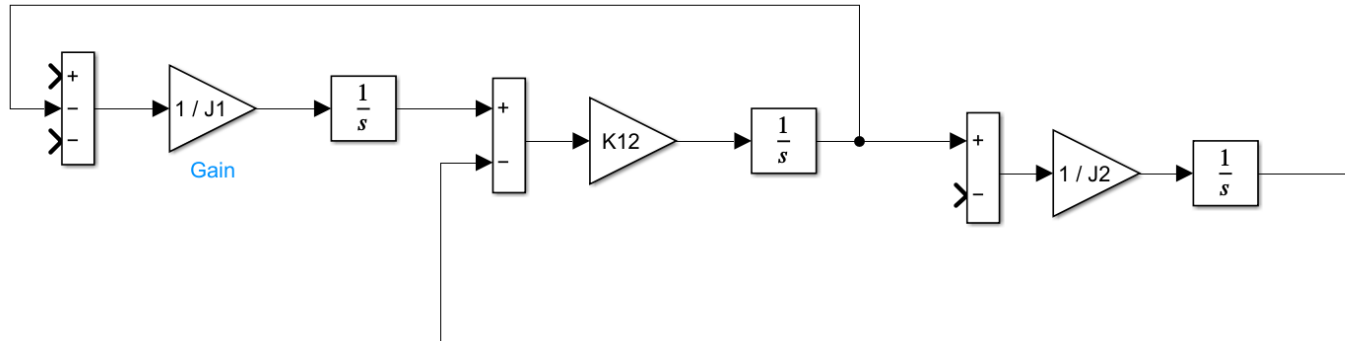
$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} = M(t) - M_{s12}(t) - M_{L1}(t), \\ \frac{dM_{s12}(t)}{dt} = K_{12}(\omega_1(t) - \omega_2(t)) \\ J_2 \frac{d\omega_2(t)}{dt} = M_{s12}(t) - M_{L2}(t). \end{cases}$$



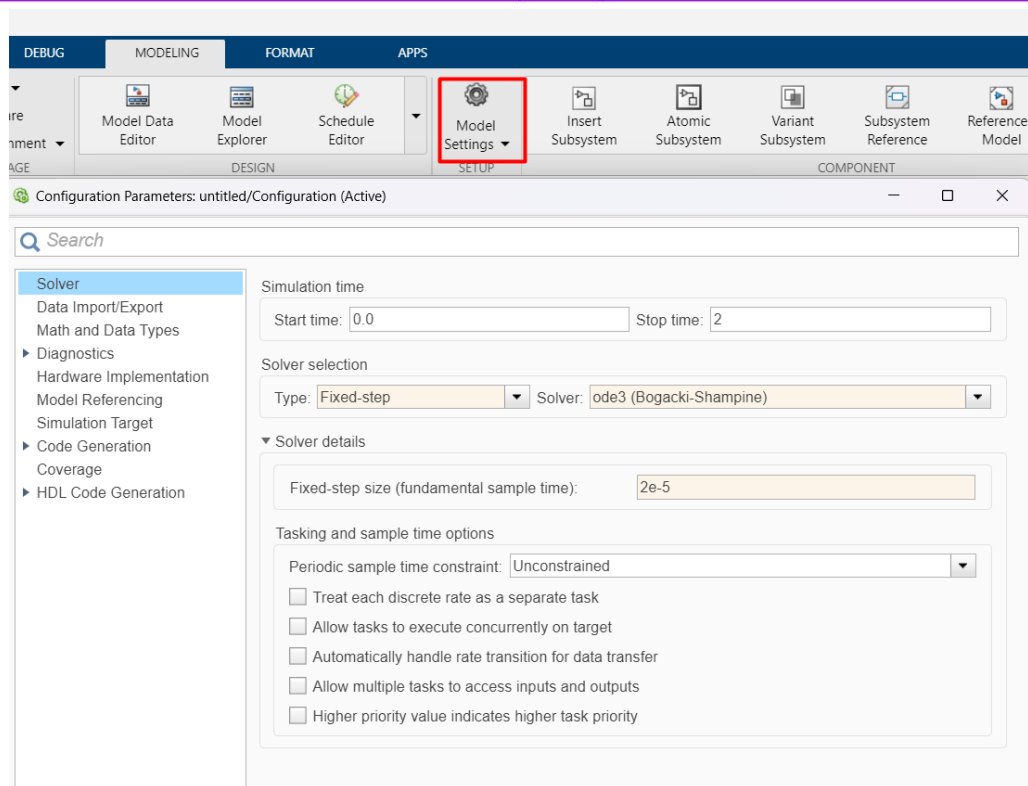
$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} = -M_{s12}(t), \\ \frac{dM_{s12}(t)}{dt} = K_{12}(\omega_1(t) - \omega_2(t)) \\ J_2 \frac{d\omega_2(t)}{dt} = M_{s12}(t). \end{cases}$$

Количество дифференциальных уравнений = количество интеграторов
в модели

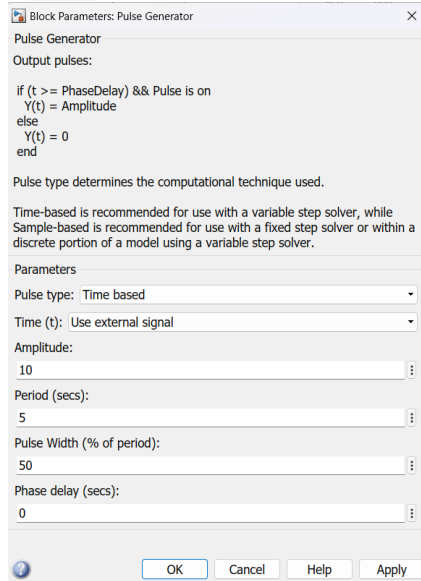
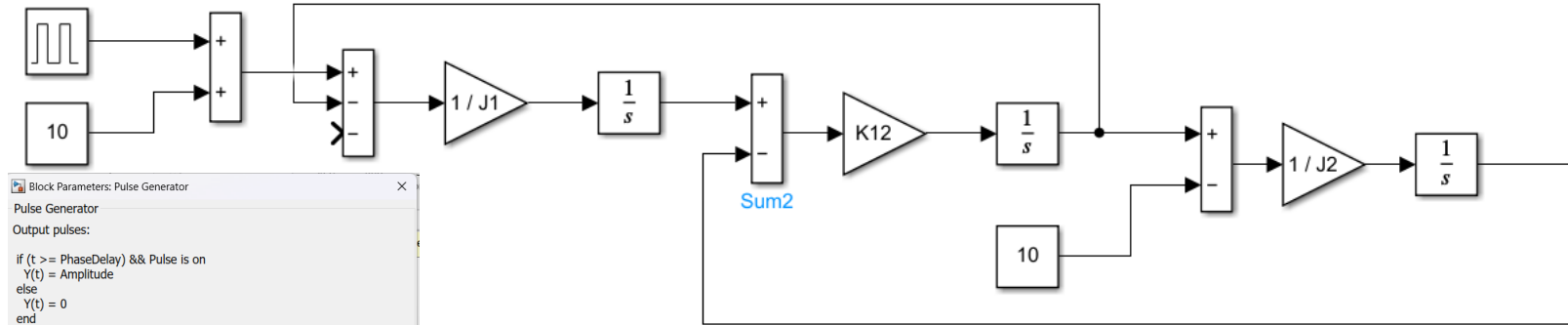
$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} = -M_{s12}(t), \\ \frac{dM_{s12}(t)}{dt} = K_{12}(\omega_1(t) - \omega_2(t)) \\ J_2 \frac{d\omega_2(t)}{dt} = M_{s12}(t). \end{cases}$$



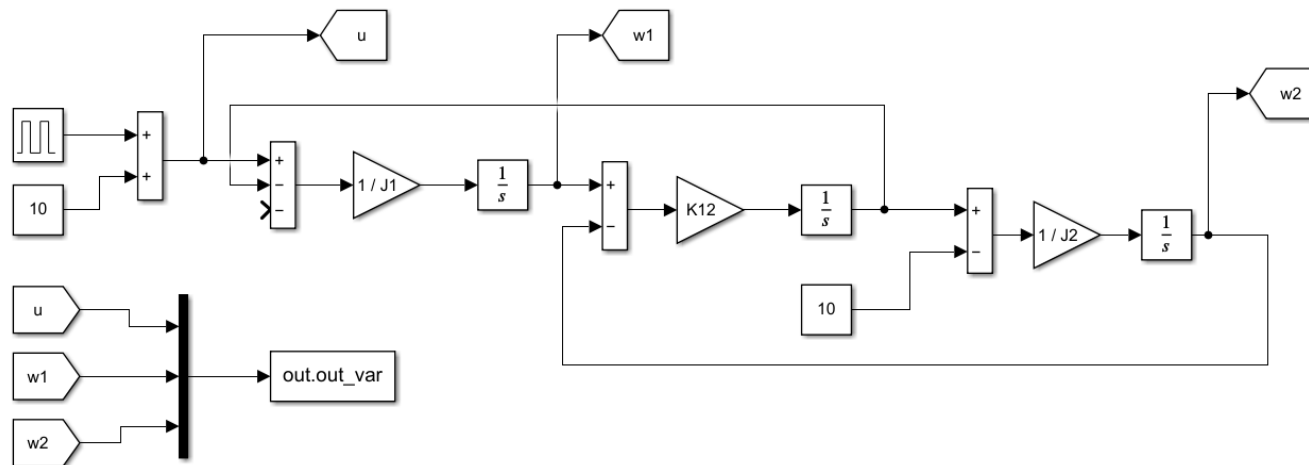
Моделирование в Simulink



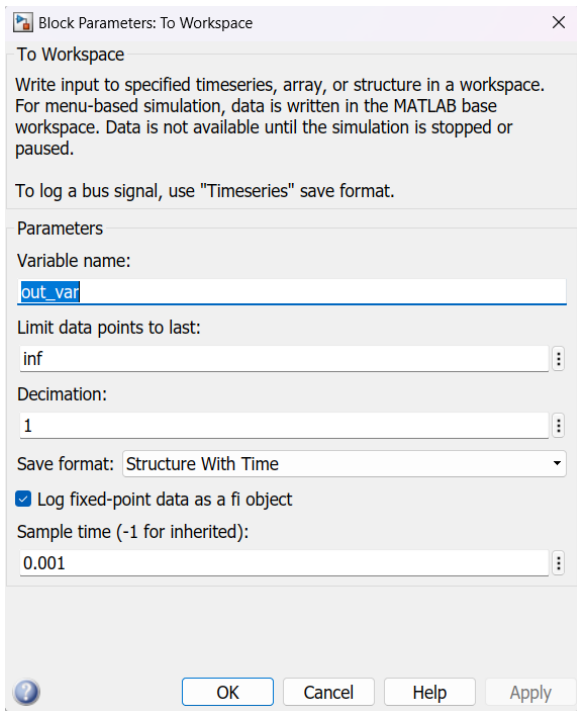
Моделирование в Simulink



Моделирование в Simulink



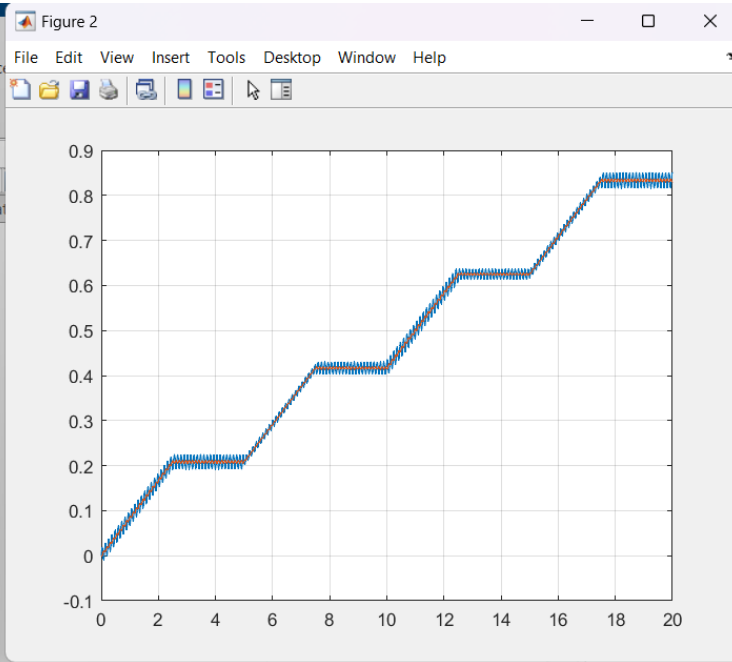
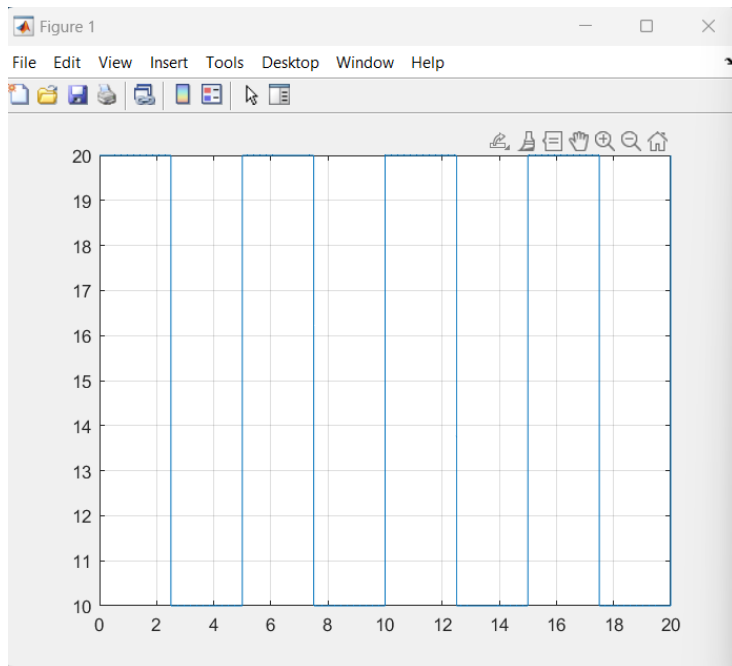
Моделирование в Simulink



```
1 clear
2 J1 = 20;
3 J2 = 100;
4 K12 = 5e4;
5 sim_res = sim('practice_3_mod.slx');
6 u = sim_res.out_var.signals.values(:, 1);
7 w1 = sim_res.out_var.signals.values(:, 2);
8 w2 = sim_res.out_var.signals.values(:, 3);
9 t = sim_res.out_var.time;
10 figure();
11 plot(t, u);
12 grid on
13 figure();
14 plot(t, w1);
15 hold all
16 plot(t, w2);
17 grid on
```

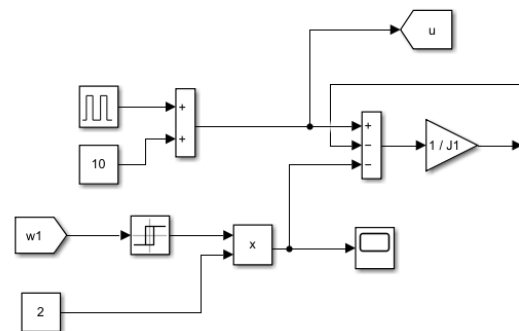
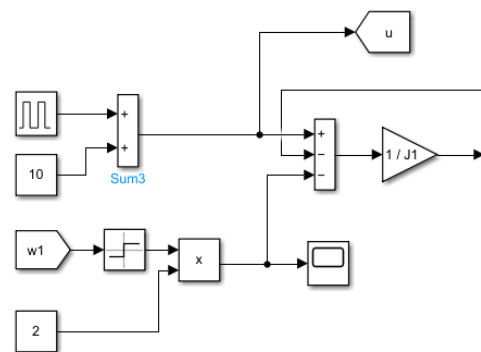
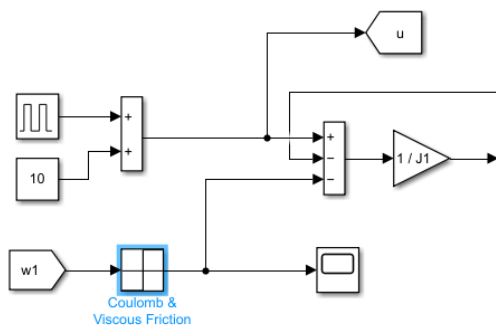


Моделирование в Simulink



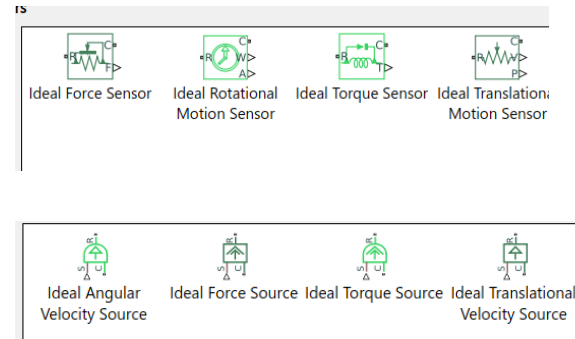
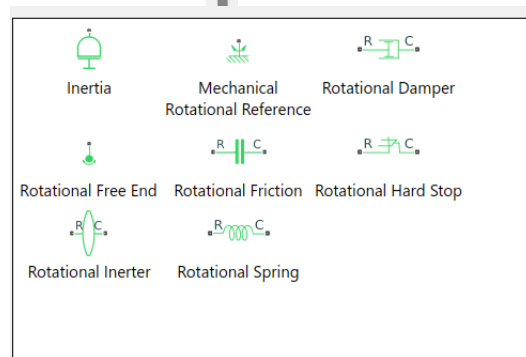
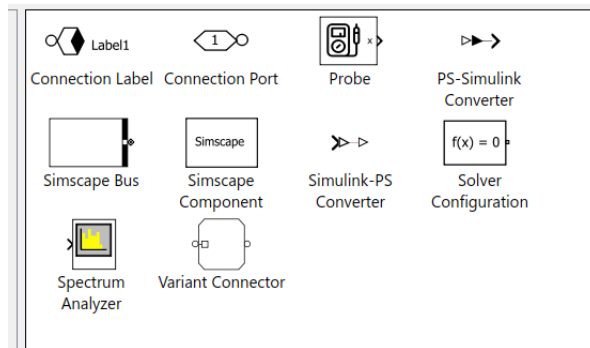
Момент «сухого» трения

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} = M(t) - M_{s12}(t) - M_{CF} \cdot \text{sgn}(\omega_1), \\ \frac{dM_{s12}(t)}{dt} = K_{12}(\omega_1(t) - \omega_2(t)) \\ J_2 \frac{d\omega_2(t)}{dt} = M_{s12}(t) - M_{L2}(t). \end{cases}$$

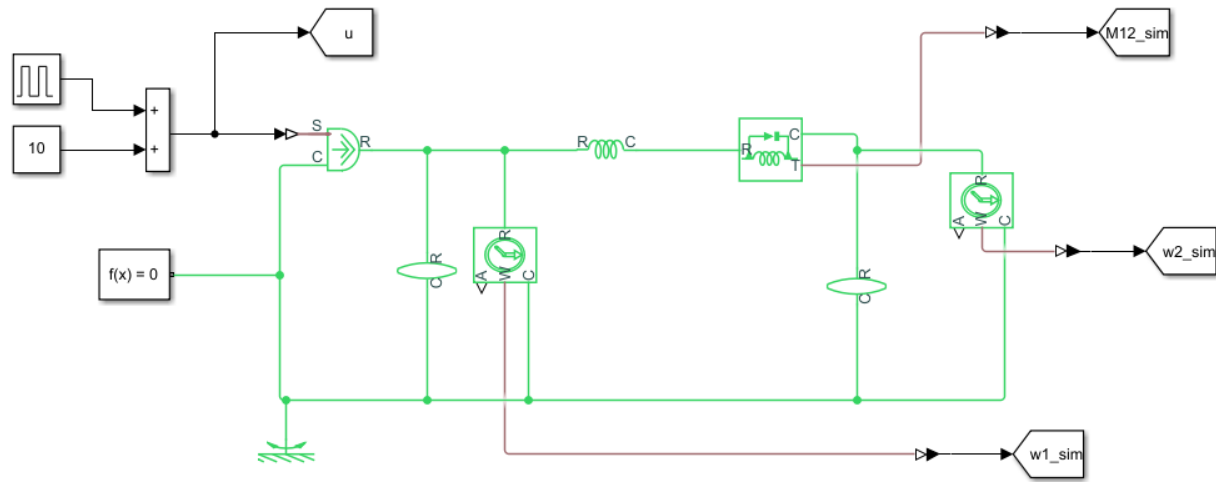


Моделирование в Simulink/Simscape

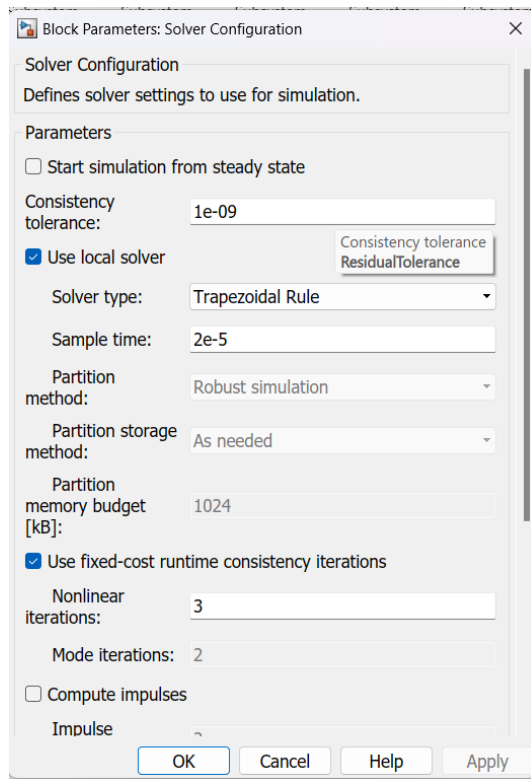
- ▼ Simscape
 - ▼ Foundation Library
 - > Electrical
 - > Gas
 - > Hydraulic
 - > Isothermal Liquid
 - > Magnetic
 - > Mechanical
 - > Moist Air
 - > Physical Signals
 - > Thermal
 - > Thermal Liquid
 - > Two-Phase Fluid
 - Utilities
 - > Driveline
 - > Electrical
 - > Fluids
 - > Multibody



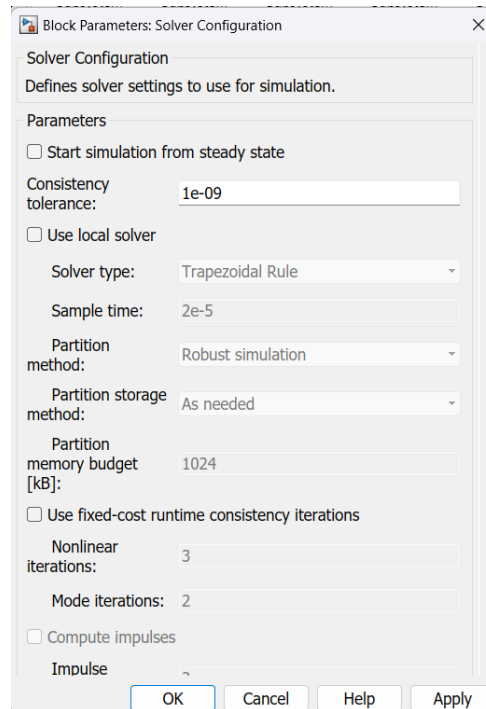
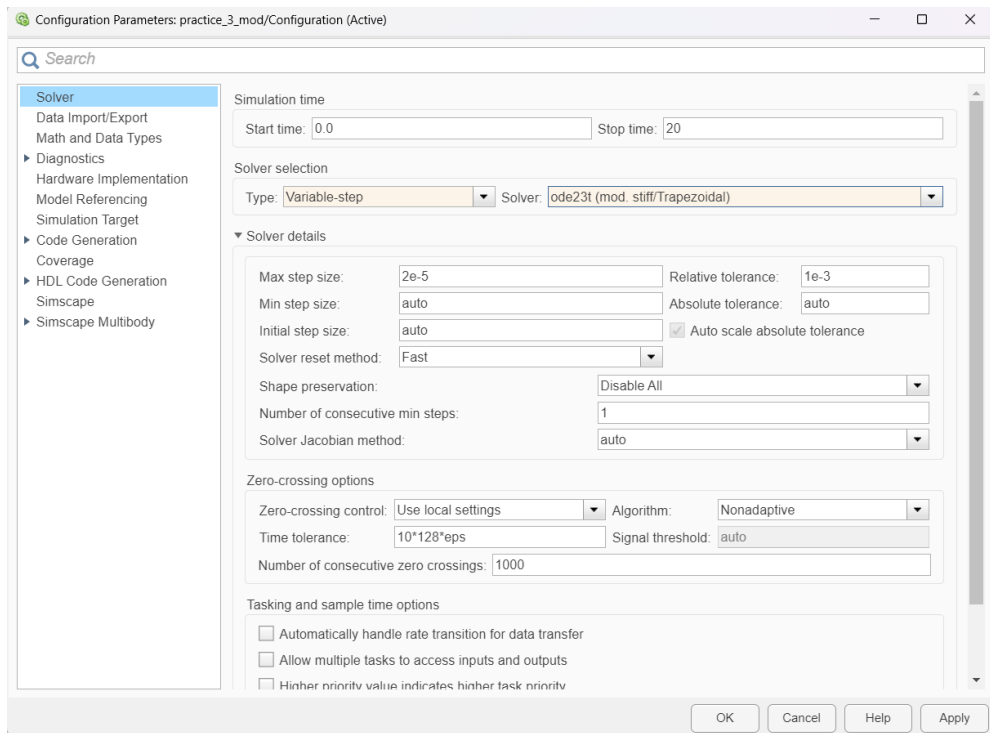
Моделирование в Simulink/Simscape



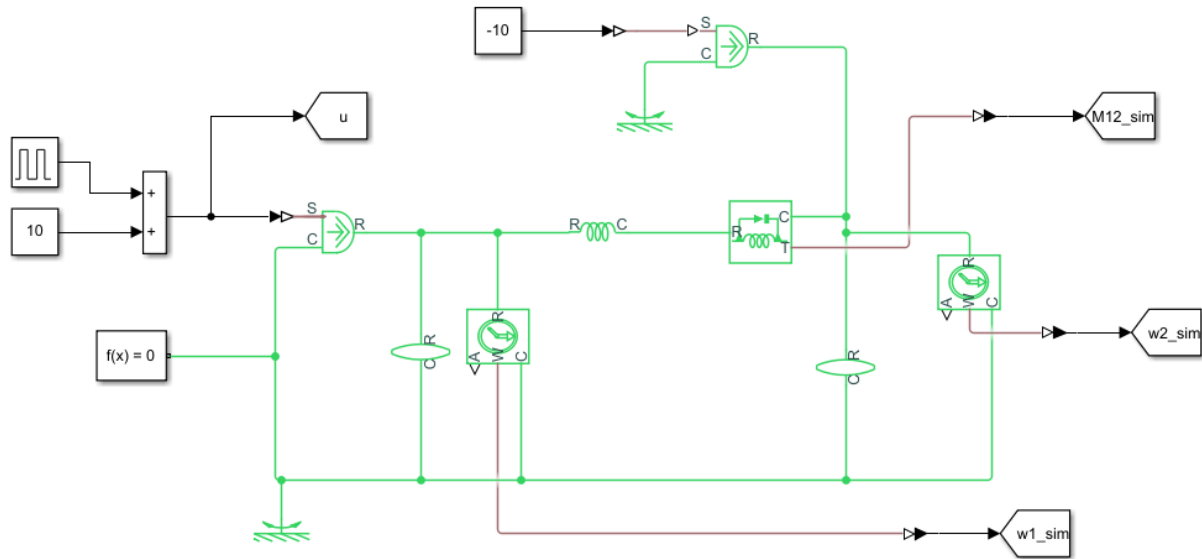
Моделирование в Simulink/Simscape



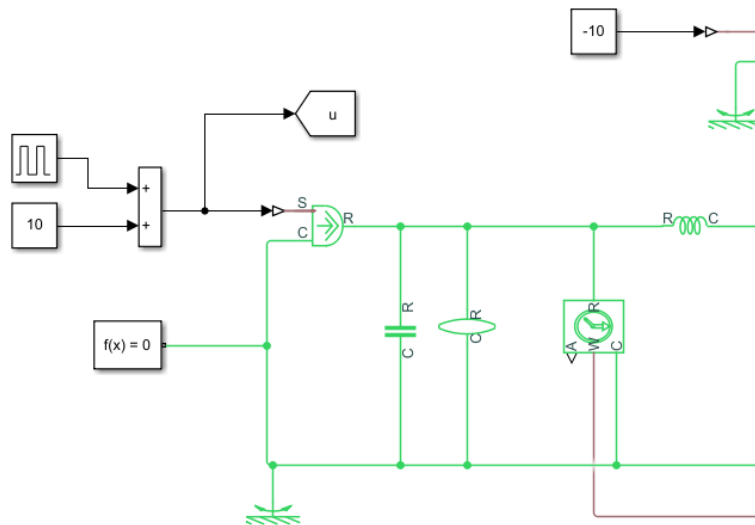
Моделирование в Simulink/Simscape



Моделирование в Simulink/Simscape



Моделирование в Simulink/Simscape



Block Parameters: Rotational Friction

Rotational Friction

The block represents friction in the contact between rotating bodies. The friction force is simulated as a function of relative velocity and assumed to be the sum of Stribeck, Coulomb, and viscous components. The sum of the Coulomb and Stribeck frictions at zero velocity is often referred to as the breakaway friction.

Connections R and C are mechanical rotational conserving ports. The block positive direction is from port R to port C. This means that if port R velocity is greater than that of port C, the block transmits torque from port R to port C.

[Source code](#)

Settings

Parameters	Variables
Breakaway friction torque:	2 N*m
Breakaway friction velocity:	1e-6 rad/s
Coulomb friction torque:	2 N*m
Viscous friction coefficient:	0 N*m/(rad/s)

OK Cancel Help Apply

Задание 3



Составить модели 2-, 3- и 5- массовых систем в Simulink и Simscape с учетом рассчитанных активных моментов нагрузки.

Промоделировать с входным воздействием типа «меандр» с амплитудами $\pm 1.1 \cdot M_L$

Предположим, что на массы J1, J2, J7, J10_1, J10_2 действует возмущающий момент типа «сухое» трение величиной 0.1 Нм. Необходимо выполнить приведение возмущающих моментов к валу двигателя.

Добавить моменты сухого трения во все модели и промоделировать с входным воздействием типа «меандр» с амплитудами $\pm 1.1 \cdot M_L$

Сравнить результаты моделирования.

По частотной характеристике



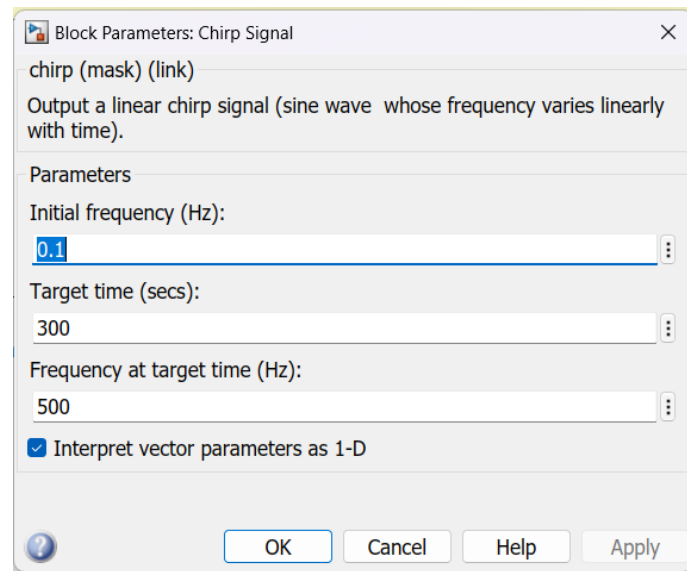
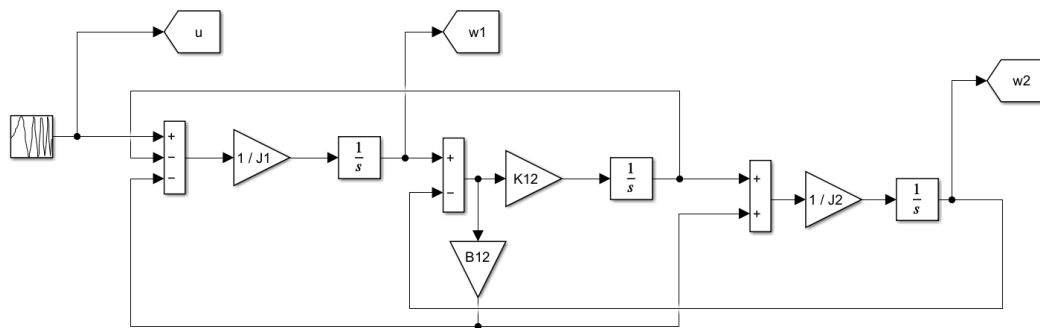
$$W_{mech2}(s) = \frac{\omega_1(s)}{M(s)} = \frac{1}{J_1 + J_2} \cdot \frac{\frac{J_2}{K_{12}} s^2 + \frac{B_{12}}{K_{12}} s + 1}{s \left(\frac{J_1 J_2}{K_{12} (J_1 + J_2)} s^2 + \frac{B_{12}}{K_{12}} s + 1 \right)}.$$



$$W_{mech2}(s) = \frac{\omega_1(s)}{M(s)} = \frac{K_{\omega} (T_1^2 s^2 + 2 \cdot T_1 \cdot \xi_1 \cdot s + 1)}{s (T_2^2 s^2 + 2 \cdot T_2 \cdot \xi_2 \cdot s + 1)}.$$

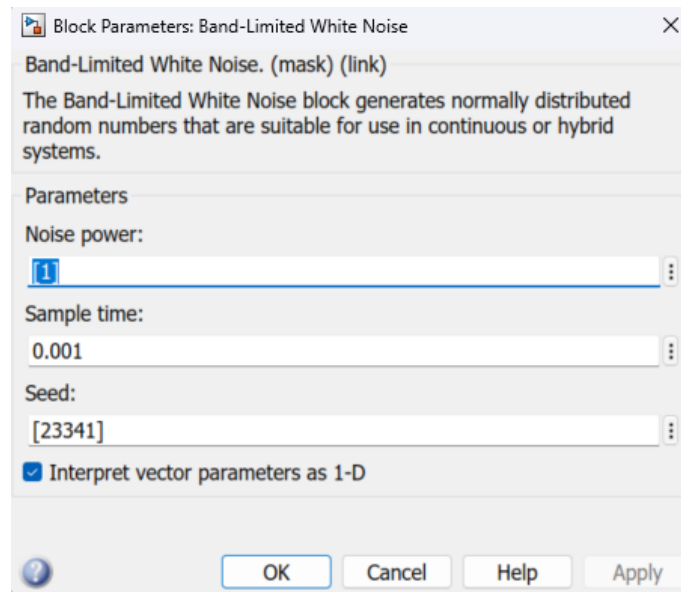
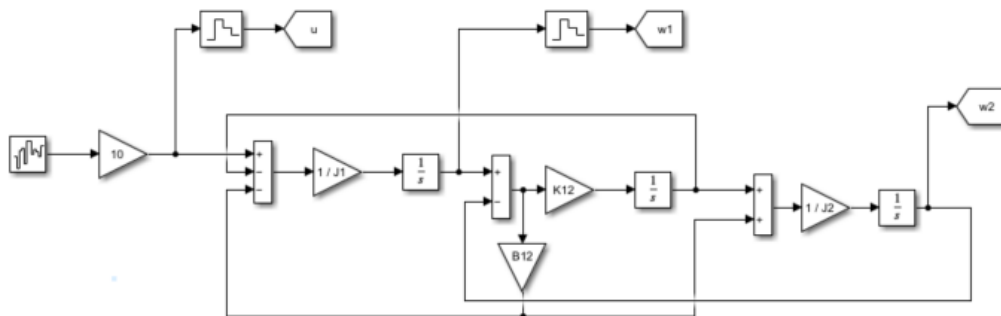
Идентификация параметров

По частотной характеристике



Идентификация параметров

По частотной характеристике



По частотной характеристике

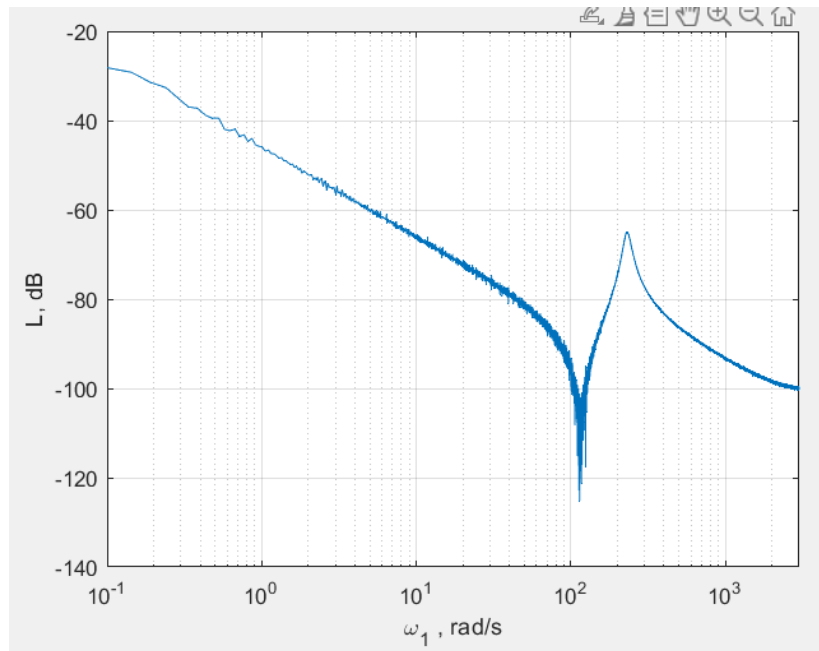


```
clear
J1 = 50;
J2 = 150;
K12 = 2e6;
B12 = 1e3;
sim_res = sim('practice_3_mod.slx');
u = sim_res.out_var.signals.values(:, 1);
w1 = sim_res.out_var.signals.values(:, 2);
w2 = sim_res.out_var.signals.values(:, 3);
t = sim_res.out_var.time;
```

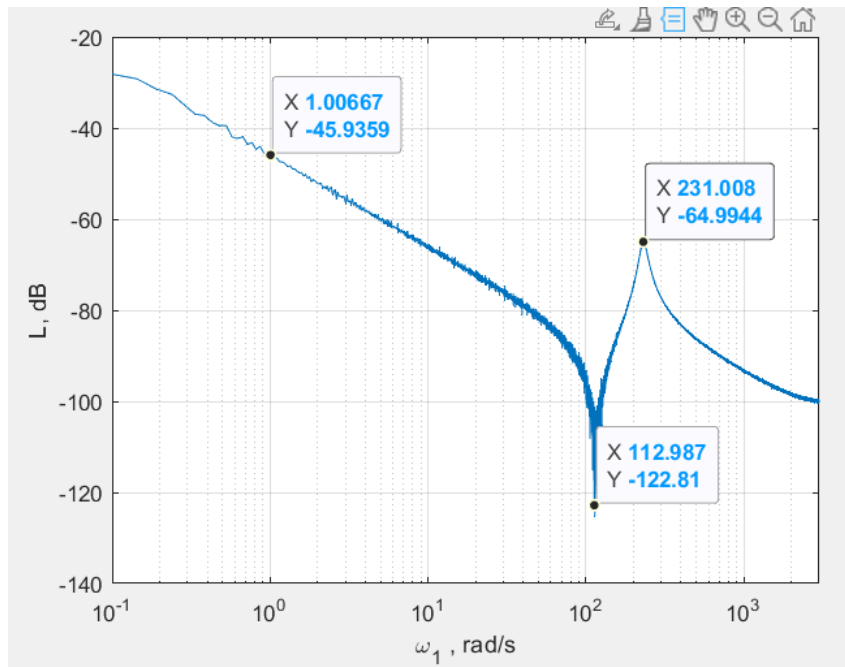
```
% обработка экспериментальных данных
[txy, f] = tfestimate(u,w1,[],[],[],1000);
om_1 = 2 * pi * f;
L_1 = 20 * log10(abs(txy));
figure();
plot(om_1, L_1);
xlim([0.1, 3000]);
xlabel('\omega_1 , rad/s')
ylabel('L, dB')
ax = gca;
set(ax,'XScale','log')
grid on
hold all
```

Идентификация параметров

По частотной характеристике



По частотной характеристике



% подбор параметров модели

$L_{ob} = -45.94;$

$\omega_{m1} = 113;$

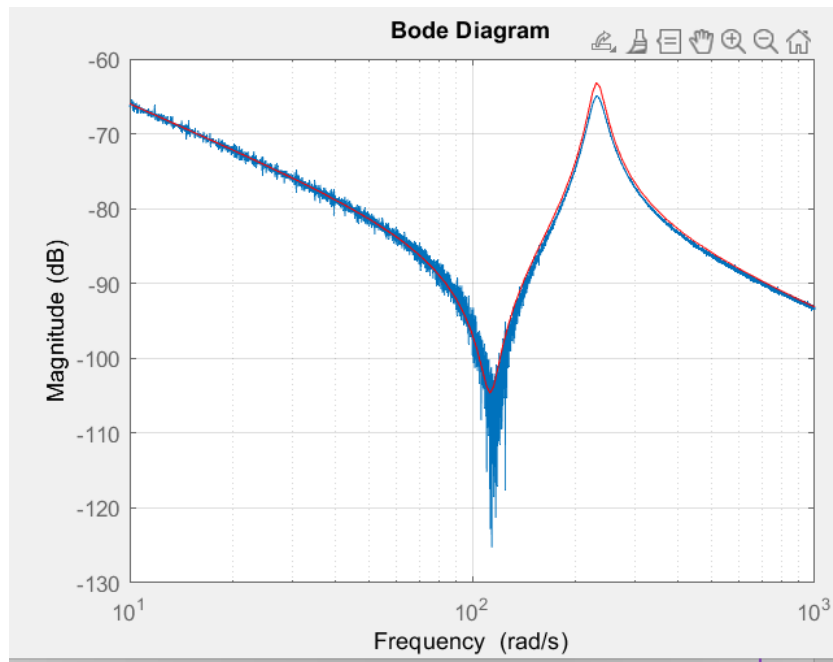
$\omega_{m2} = 231;$

$K_w = 10^{(L_{ob}/20)};$

$T_1 = 1 / \omega_{m1};$

$T_2 = 1 / \omega_{m2};$

По частотной характеристике



```
Kw = 10^(Lob/20);  
T1 = 1 / om1;  
T2 = 1 / om2;  
% Попробуем подобрать коэффициенты демпирования  
ksi1 = 0.05;  
ksi2 = 0.05;  
% Идентифицированная передаточная функция  
s = tf('s');  
W_ob = Kw * (T1^2 * s^2 + 2 * T1 * ksi1 * s + 1) ...  
        / s / (T2^2 * s^2 + 2 * T2 * ksi2 * s + 1);  
bodemag(W_ob, 'r')  
grid on
```

По частотной характеристике



Корректируем параметры передаточной функции пока не получим совпадение частотных характеристик.

Из параметров передаточной функции пересчитываем параметры механической нагрузки.

Дополнительное задание 1



Исходные данные: файл, содержащий записи момента и скорости первой массы с периодом дискретизации 1 мс.

Задания:

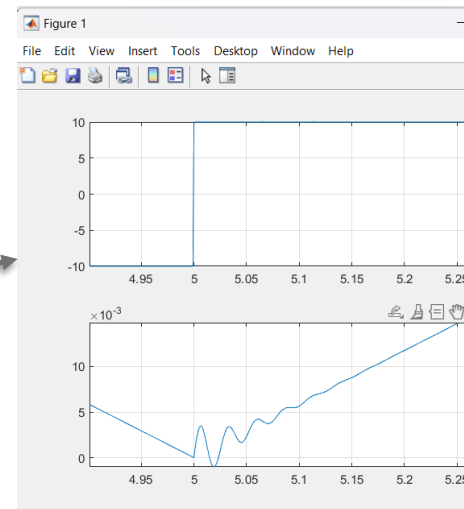
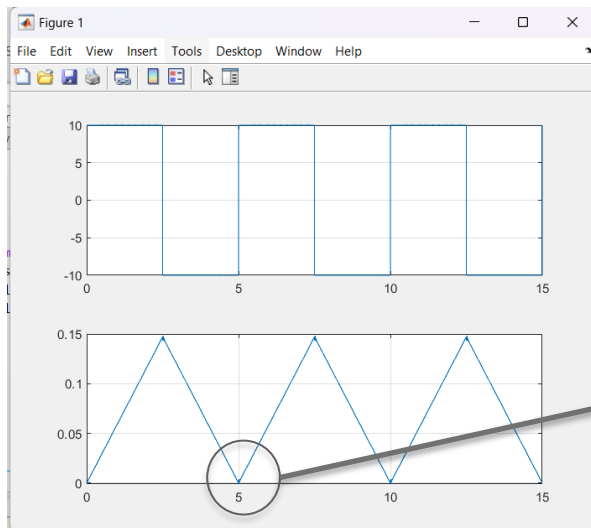
- а) построить частотную характеристику по экспериментальным данным;
- б) определить параметры двухмассовой механической системы;
- в) собрать модель с идентифицированными параметрами;
- г) промоделировать с входным воздействием из исходного файла;
- д) посчитать среднеквадратичную ошибку между скоростью первой массы с модели и скоростью первой массы из исходного файла.

Идентификация параметров

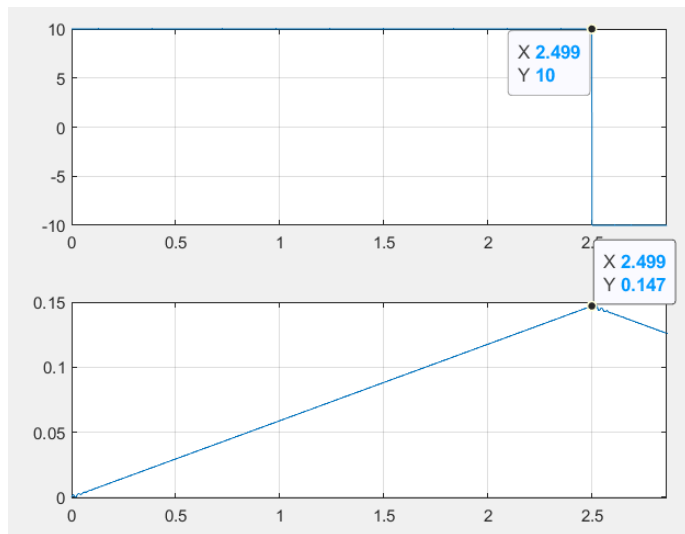
По временной характеристике



```
u = sim_res.out_var.signals.values(:, 1);  
w1 = sim_res.out_var.signals.values(:, 2);  
w2 = sim_res.out_var.signals.values(:, 3);  
t = sim_res.out_var.time;  
ax1 = subplot(2,1,1);  
plot(t, u);  
grid on  
ax2 = subplot(2,1,2);  
plot(t, w1);  
grid on  
linkaxes([ax1, ax2], 'x')
```



По временной характеристике

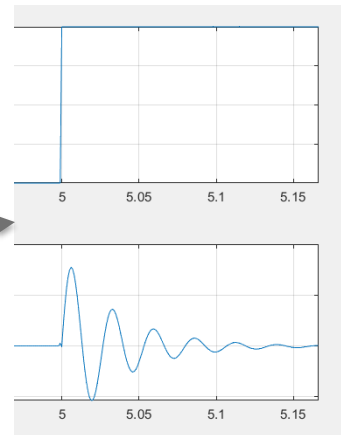
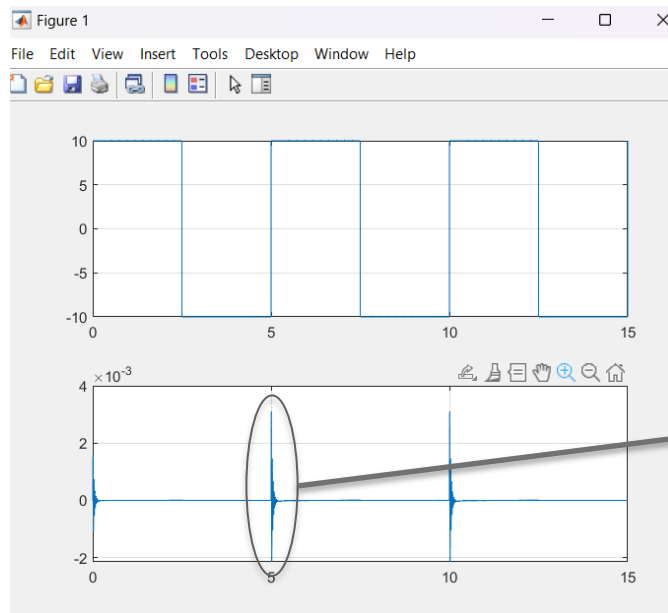


Коэффициент усиления рассчитывается как отношение коэффициента наклона прямой разгона к амплитуде входного сигнала:

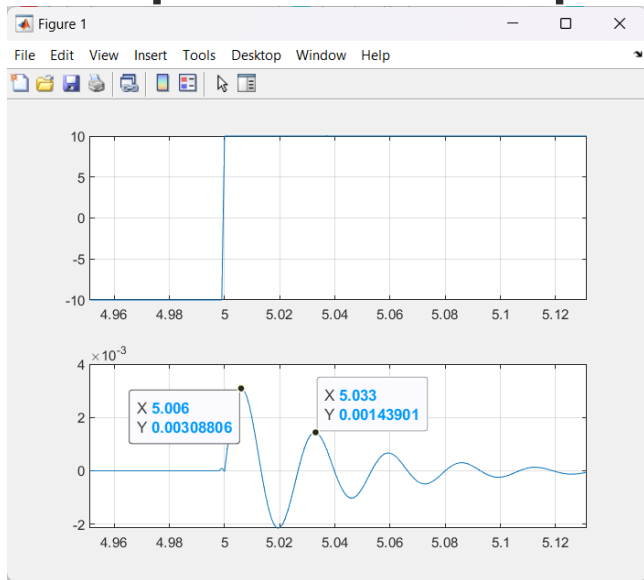
$$K_{\omega} = \left(\frac{0.147}{2.499} \right) / 10$$

По временной характеристике

```
u = sim_res.out_var.signals.values(:, 1);  
w1 = sim_res.out_var.signals.values(:, 2);  
w2 = sim_res.out_var.signals.values(:, 3);  
t = sim_res.out_var.time;  
w1_osc = detrend(w1, 1, u == -10);  
ax1 = subplot(2,1,1);  
plot(t, u);  
grid on  
ax2 = subplot(2,1,2);  
plot(t, w1_osc);  
grid on  
linkaxes([ax1, ax2], 'x')
```



По временной характеристике



Постоянная времени колебательного звена определяется через период колебаний:

$$T_2 = \frac{5.033 - 5.006}{2\pi}$$

Коэффициент демпфирования колебательного звена определяется через коэффициент затухания:

$$\xi_2 = -\frac{\ln\left(\frac{0.001439}{0.003088}\right)}{2\pi}$$

Дополнительное задание 2



Исходные данные: файл, содержащий записи момента и скорости первой массы с периодом дискретизации 1 мс и значение коэффициента жесткости K_{12} .

Задания:

- а) определить параметры двухмассовой механической системы;
- б) собрать модель с идентифицированными параметрами;
- в) промоделировать с входным воздействием из исходного файла;
- г) посчитать среднеквадратичную ошибку между скоростью первой массы с модели и скоростью первой массы из исходного файла.

**Спасибо
за внимание!**

it's **MO** *re than a*
UNIVERSITY

amamatov@itmo.ru