

ІІТМО

Электрический привод

Практика 5. Лабораторная работа

«Исследование электропривода с ДПТ

независимого возбуждения»

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

Задание 1 «Исследование статических характеристик электропривода с ДПТ НВ»

Исходные данные:



R_a - активное сопротивление обмотки якоря

L_a - индуктивность обмотки якоря

Ψ_{nom} - номинальное потокоцепление

U_{nom} - номинальное напряжение

M_{nom} - номинальный момент

J - момент инерции вала

Задание 1 «Исследование статических характеристик электропривода с ДПТ НВ»

Механическая характеристика



$$\omega = \frac{U}{\Psi} - \frac{r}{\Psi^2} M = \omega_0 - M / h$$

- а) Построить семейство механических характеристик $\omega(M)$ при регулировании напряжения питания: с $U = -U_{nom}, -0.75 \cdot U_{nom} \dots 0.75 \cdot U_{nom}, U_{nom}$
- б) Построить семейство регулировочных характеристик $\omega(U)$ при изменении напряжения питания $U \in [-U_{nom}, U_{nom}]$ и следующих моментах нагрузки: $M = -M_{start}, -0.75 \cdot M_{start} \dots 0.75 \cdot M_{start}, M_{start}, -M_{nom}, M_{nom}$

Задание 1 «Исследование статических характеристик электропривода с ДПТ НВ»



в) Построить семейство механических характеристик $\omega(M)$ при регулировании магнитного потока: $\Psi = -\Psi_{nom}, -0.75 \cdot \Psi_{nom} \dots 0.75 \cdot \Psi_{nom}, \Psi_{nom}$

г) Построить семейство регулировочных характеристик $\omega(\Psi)$ при изменении потокосцепления $\Psi \in [-\Psi_{nom}, \Psi_{nom}]$ и следующих моментах нагрузки: $M = -M_{start}, -0.75 \cdot M_{start} \dots 0.75 \cdot M_{start}, M_{start}, -M_{nom}, M_{nom}$

д) Построить семейство механических характеристик $\omega(M)$ при регулировании сопротивления якоря: $r = R_a, 1.25 \cdot R_a \dots 3 \cdot R_a$

е) Построить семейство регулировочных характеристик $\omega(r)$ при изменении сопротивления якоря $r \in [R_a, 3 \cdot R_a]$ и следующих моментах нагрузки: $M = -M_{start}, -0.75 \cdot M_{start} \dots 0.75 \cdot M_{start}, M_{start}, -M_{nom}, M_{nom}$

Задание 1 «Исследование статических характеристик электропривода с ДПТ НВ»

$$\omega = \frac{U}{\Psi} - \frac{r}{\Psi^2} M = \omega_0 - M / h$$



Чтобы построить кривую механической характеристики фиксируем регулируемый параметр (напряжение, потокосцепление или сопротивление) на каком-либо значении и варьируем значение момента.

Чтобы построить кривую регулировочной характеристики фиксируем значение момента на каком-либо значении и варьируем регулируемый параметр (напряжение, потокосцепление или сопротивление).

Задание 2 «Исследование динамических характеристик электропривода с ДПТ НВ»

Динамическая модель ДПТ НВ :



$$\begin{cases} L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = U - r \cdot i_a(t) - \Psi \cdot \omega(t) \\ J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = \Psi \cdot i_a(t) - M_L \end{cases}$$

а) Рассчитать передаточную функцию от **напряжения якоря** к **скорости вращения двигателя**.

б) Получить аналитическое выражение для корней характеристического уравнения.

Задание 2 «Исследование динамических характеристик электропривода с ДПТ НВ»

При каком условии переходные процессы по скорости будут иметь колебательный характер?



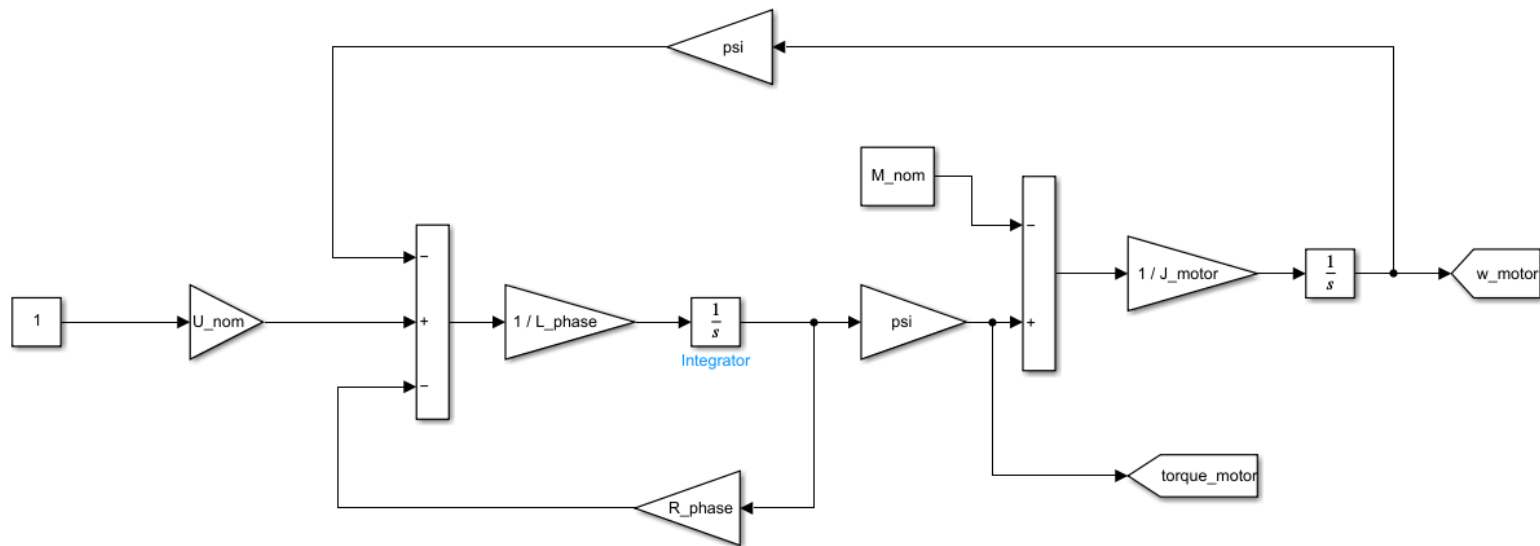
Как можно изменить характер переходных процессов в двигателе?

в) Рассчитать корни характеристического уравнения для вашего двигателя.

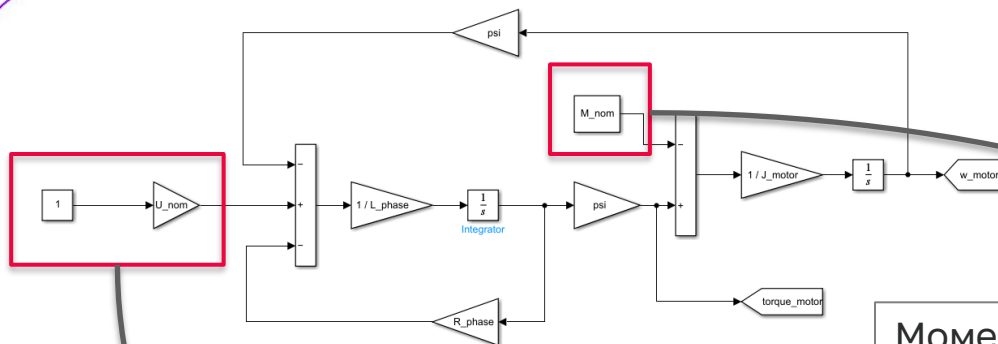
г) Построить модели ДПТ НВ в Simulink и Simscape

д) Построить графики скорости и момента двигателя при скачке управляющего воздействия (напряжения) и при скачке момента нагрузки

Модель Simulink



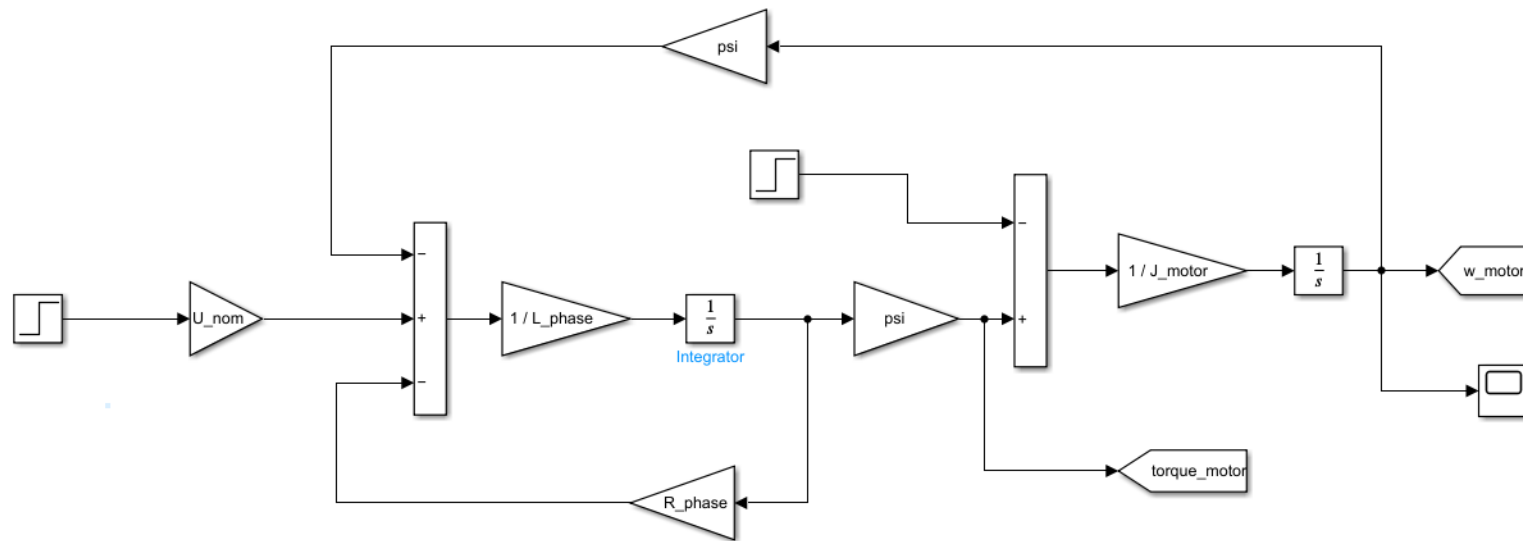
Модель Simulink



Момент нагрузки двигателя. В этой модели делаю его равным номинальному.

Источник питания реализуем как идеальный усилитель управляющего сигнала, т.е. предполагаем, что мы можем регулировать входное напряжение.

Модель Simulink. Скачки внешних воздействий



Модель Simulink. Скачки внешних воздействий

Скачок управления

Block Parameters: Step

Step

Output a step.

Main Signal Attributes

Step time:

1

Initial value:

0.5

Final value:

1

Sample time:

0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

☒ Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

Скачок нагрузки

Block Parameters: Step1

Step

Output a step.

Main Signal Attributes

Step time:

2

Initial value:

$0.5 * M_{nom}$

Final value:

M_{nom}

Sample time:

0

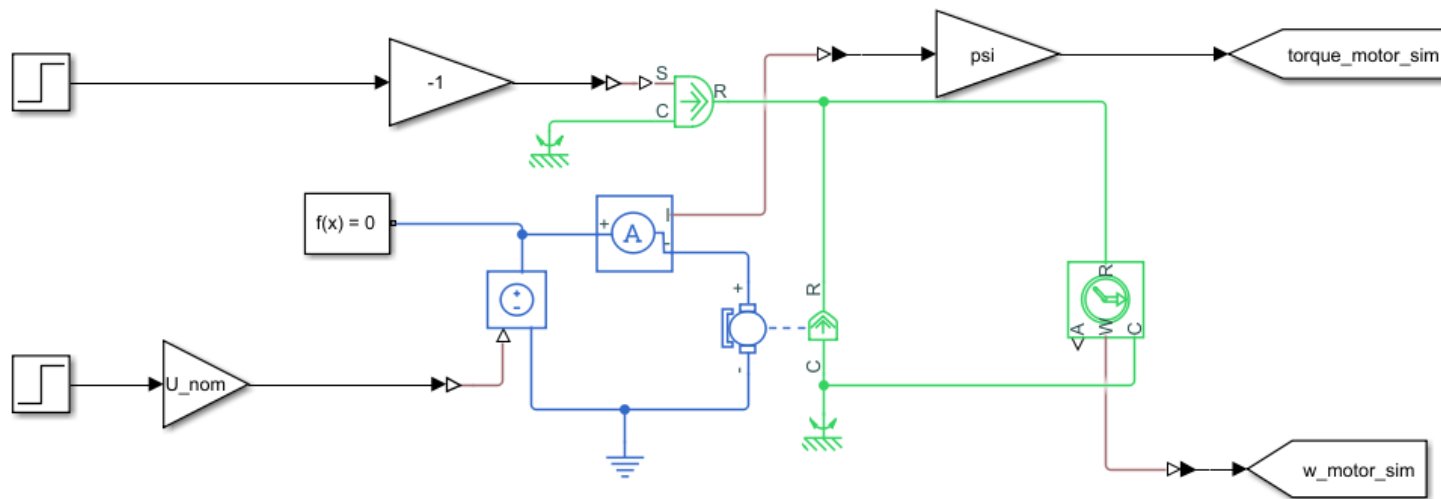
☒ Interpret vector parameters as 1-D

☒ Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

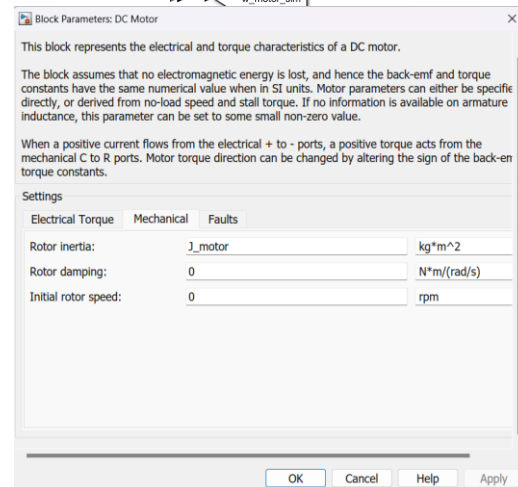
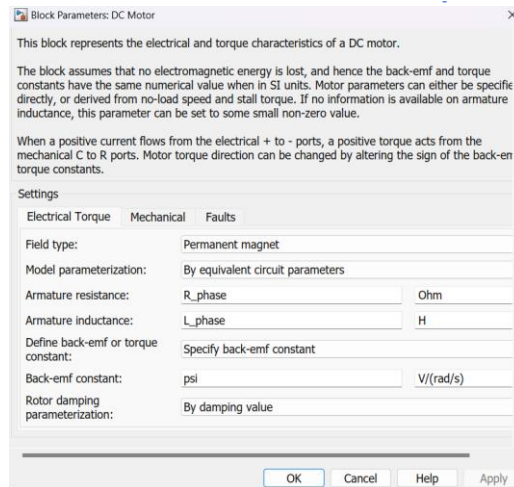
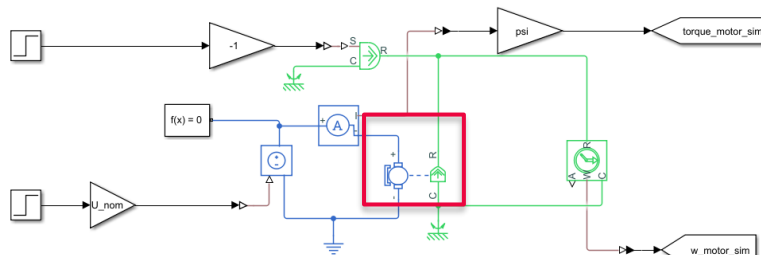
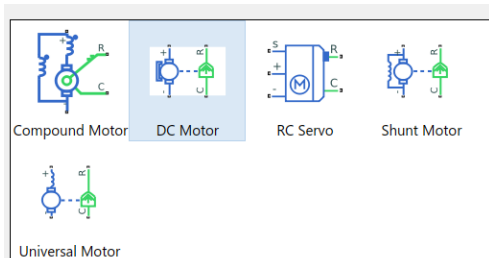
Лучше реализовать двумя отдельными моделированиями

Модель Simscape

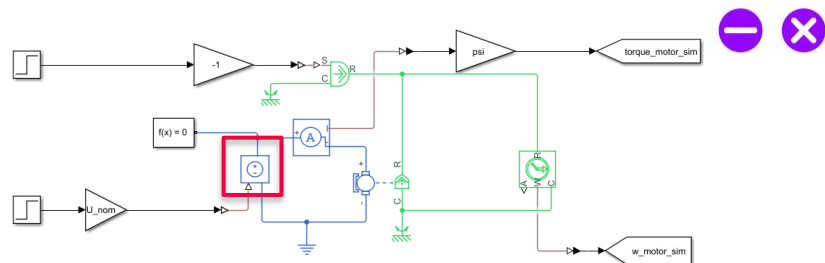
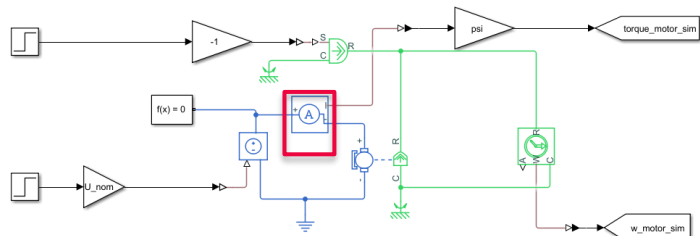


Модель Simscape

- SimScape
 - Foundation Library
 - Utilities
 - Driveline
 - Electrical
 - Connectors & References
 - Control
 - Electromechanical
 - Asynchronous
 - Brushed Motors**
 - Mechanical
 - Mechatronic Actuators
 - Permanent Magnet
 - Reluctance & Stepper
 - Synchronous



Модель Simscape



Current Sensor Voltage Sensor
fl_lib/Electrical/Electrical Sensors/Current Sensor:

The block represents an ideal current sensor, that is a device that converts current measured in any electrical circuit into a voltage signal.

Voltage Source Controlled Current Source
fl_lib/Electrical/Electrical Sources/Controlled Voltage Source:

The block represents an ideal voltage source that is powerful enough to maintain the specified voltage at its output regardless of the current.

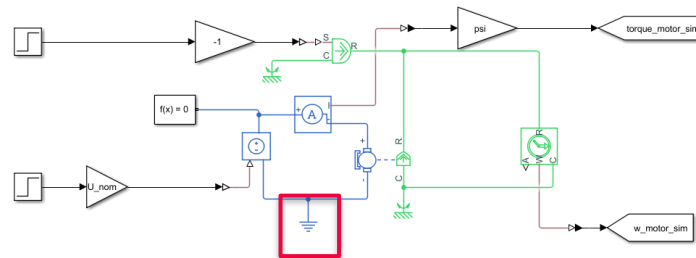
Simcape

- Foundation Library
 - Electrical
 - Electrical Elements
 - Electrical Sensors
 - Electrical Sources

Capacitor Diode Electrical Reference Gyator

fl_lib/Electrical/Electrical Elements/Electrical Reference:

Infinite Resistance: Electrical reference port. A model must contain at least one electrical reference port (electrical ground).



Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»

а) Синтезировать одноконтурную систему управления с ПИД-регулятором



$$\left\{ \begin{array}{l} L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = U - r \cdot i_a(t) - \Psi \cdot \omega(t) \\ J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = \Psi \cdot i_a(t) - M_L \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = K_U \cdot u - r \cdot i_a(t) - \Psi \cdot \omega(t) \\ J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = \Psi \cdot i_a(t) - M_L \end{array} \right.$$

K_U

- коэффициент усиления управляющего сигнала, для ДПТ НВ равен напряжению источника питания (номинальному напряжению)

$u \in [-1; 1]$

- управляющий сигнал - выходной сигнал регулятора

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»

Уравнение «реального» ПИД регулятора:



$$u(s) = K_p \cdot \varepsilon(s) + \frac{K_i}{s} \cdot \varepsilon(s) + \frac{K_d \cdot s}{T_\delta s + 1} \cdot \varepsilon(s)$$

K_p, K_i, K_d - настраиваемые коэффициенты регулятора

T_δ - малая постоянная времени, определяющая запаздывание «реального» дифференцирования. Принять равной 0.1 мс

$\varepsilon(s) = \omega_z(s) - \omega(s)$ - ошибка регулирования

Настроить коэффициенты можно подбором, встроенными средствами MATLAB, методом Циглера-Николса (<https://microtechnics.ru/nastrojka-pid-regulyatora-metod-cziglera-nikolsa/>)

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»

б) Синтезировать двухконтурную систему управления



Настройка контура тока:

Настраиваем на апериодическое звено (т.н. «линейный оптимум»).
Используем ПИ-регулятор

$$u(s) = K_p \cdot \varepsilon(s) + \frac{K_i}{s} \cdot \varepsilon(s)$$

$$\frac{u(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_i \left(\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1 \right)}{s}$$

$$\varepsilon(s) = i_{a_z}(s) - i_a(s)$$

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»

$$L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = K_U \cdot u - r \cdot i_a(t) - \Psi \cdot \omega(t)$$



обратную ЭДС считаем внешним возмущением

$$L_a \cdot s \cdot i_a(s) = K_U \cdot u(s) - r \cdot i_a(s)$$

Передаточная функция от управляющего сигнала к току якоря:

$$\frac{i_a(s)}{u(s)} = \frac{K_U}{L_a \cdot s + r} = \frac{K_U / r}{L_a / r \cdot s + 1} = \frac{K_U / r}{T_e \cdot s + 1}$$

T_e - электромагнитная
постоянная времени

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования:



$$W_{ol}(s) = \frac{K_i \left(\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1 \right)}{s} \cdot \frac{K_U / r}{T_e \cdot s + 1}$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура регулирования:

$$W_{ol-g}(s) = \frac{1}{T_T s} \quad T_T \text{ - желаемая постоянная времени контура тока } T_T < T_e$$

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»

Настройка контура скорости:



Передаточная функция от задания по току якоря к скорости вращения:

$$J \cdot s \cdot \omega(s) = \Psi \cdot i_a(s)$$

$$\frac{\omega(s)}{i_a(s)} = \frac{\Psi}{J \cdot s}$$

$$\frac{\omega(s)}{i_{a_z}(s)} = \frac{\Psi}{J \cdot s \cdot (T_T \cdot s + 1)}$$

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»



Настраиваем на технический оптимум. Используем П-регулятор

$$i_{a_z}(s) = K_p \cdot \varepsilon_\omega(s)$$

$$\frac{i_{a_z}(s)}{\varepsilon_\omega(s)} = K_p$$

$$\varepsilon_\omega(s) = \omega_{z_1}(s) - \omega(s)$$

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования:

$$W_{ol}(s) = \frac{K_p}{s} \cdot \frac{\Psi/J}{T_T \cdot s + 1}$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура регулирования:

$$W_{ol_g}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1)} \quad T_\mu = T_T$$

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»

в) Промоделировать полученные системы управления при: скачке задания по скорости; скачке момента нагрузки. Построить графики: задания по скорости, скорости двигателя, ошибки по скорости, момента двигателя.



г) Оценить порядок астатизма полученных систем управления по заданию и по возмущению (моменту нагрузки).

д) Дополнить двухконтурную систему управления скоростью дополнительным контуром регулирования с И-регулятором, промоделировать полученную СУ, оценить порядки астатизма.

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»

Передаточная функция от задания по скорости к скорости вращения:



$$\frac{\omega(s)}{\omega_{z_1}(s)} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1}$$



Можно упрощенно принять

$$\frac{\omega(s)}{\omega_{z_1}(s)} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1}$$

Задание 3 «Синтезировать систему регулирования скорости ДПТ НВ»



Настраиваем на технический оптимум. Используем И-регулятор:

$$\omega_{z_1}(s) = \frac{K_i}{s} \cdot \varepsilon_{\omega_2}(s) \quad \varepsilon_{\omega_2}(s) = \omega_{z_2}(s) - \omega(s)$$

$$\frac{\omega_{z_1}(s)}{\varepsilon_{\omega_2}(s)} = \frac{K_i}{s}$$

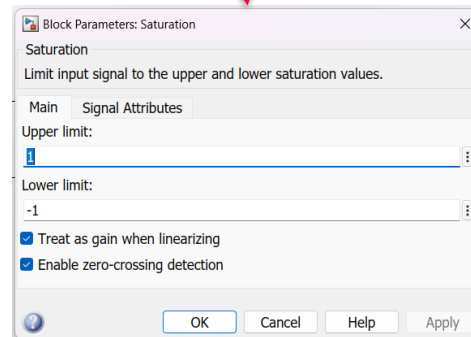
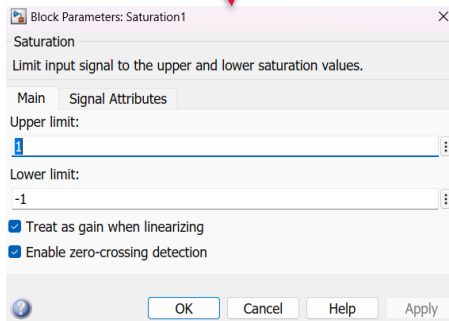
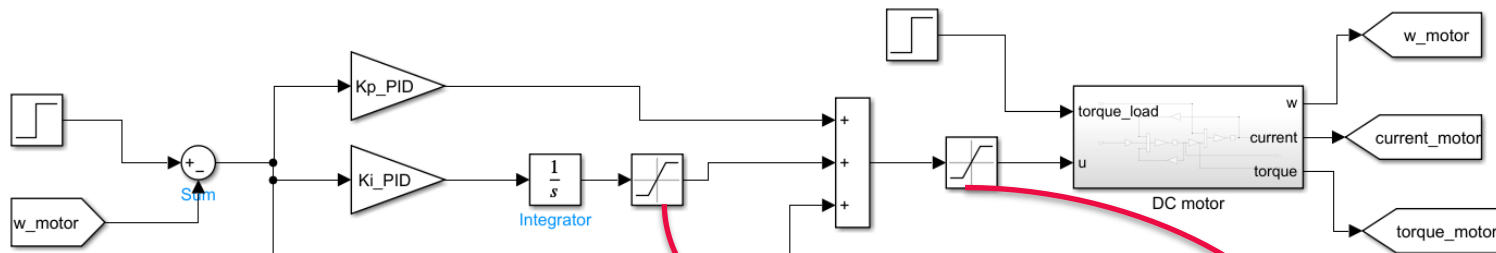
Передаточная функция разомкнутого контура регулирования:

$$W_{ol}(s) = \frac{K_i}{s} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1}$$

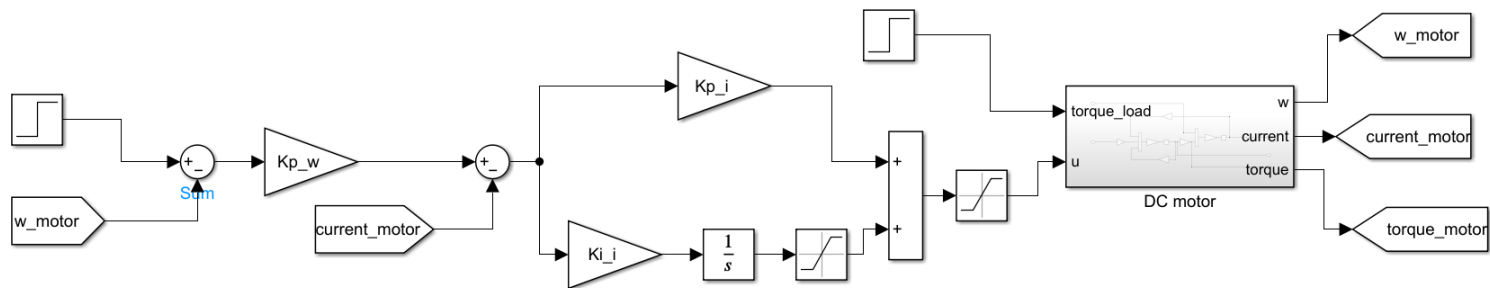
Желаемая передаточная функция разомкнутого контура регулирования:

$$W_{ol_g}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot s \cdot (T_{\mu 1} \cdot s + 1)} \quad T_{\mu 1} = 2 \cdot T_{\mu}$$

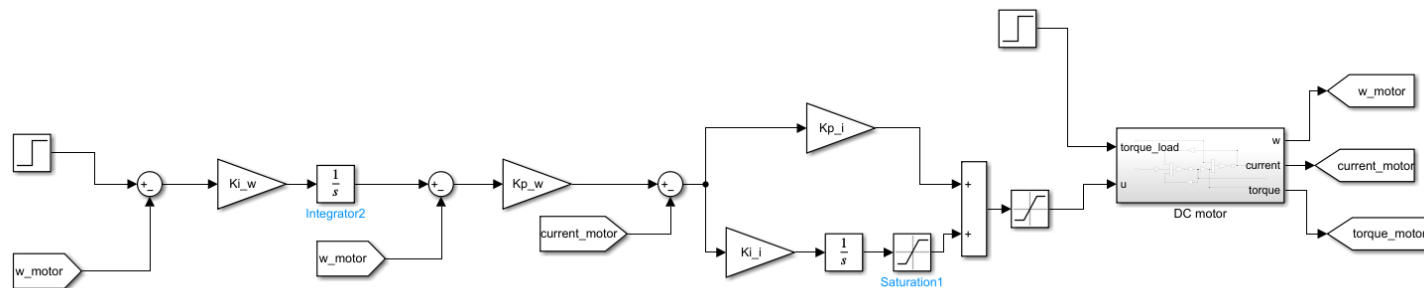
Структура системы управления с ПИД - регулятором



Структура двухконтурной СУ



Структура двухконтурной СУ с дополнительным контуром



Дополнительное задание 1 «Моделирование системы управления с ШИП»



Ввести в модели ДПТ широтно-импульсный преобразователь по мостовой схеме с симметричным управлением.



Теория:

Электрический привод. Усольцев А.А. стр.84

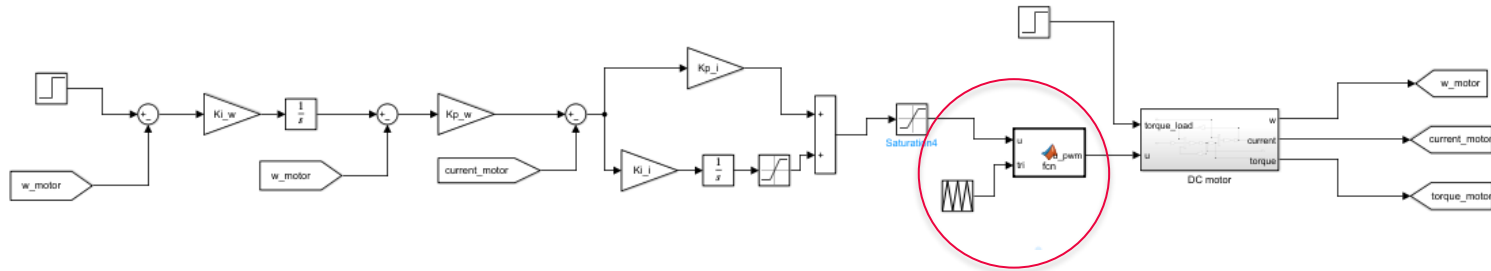
Системы управления электроприводов. Анучин А.С. Глава 2

Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors. Sang-Hoon Kim. Глава 2

Дополнительное задание 1 «Моделирование системы управления с ШИП»

Реализация для модели Simulink:

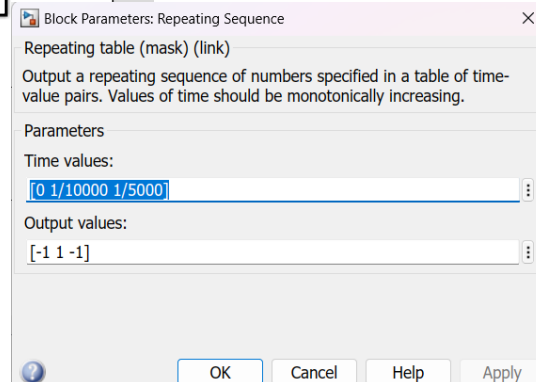
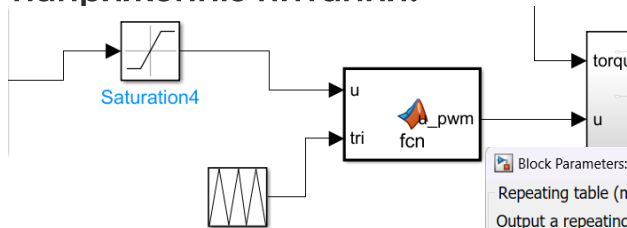
Модель двигателя и СУ не изменяется. Добавляется блок формирования управляющего напряжения между выходом регулятора тока и моделью ДПТ НВ



Дополнительное задание 1 «Моделирование системы управления с ШИП»

Реализация для модели Simulink:

Управляющий сигнал сравнивается с опорным пилообразным сигналом и формируются импульсы управляющего напряжения амплитудой 1 или -1. Затем в модели двигателя управляющий сигнал усиливается на коэффициент равный напряжению питания.



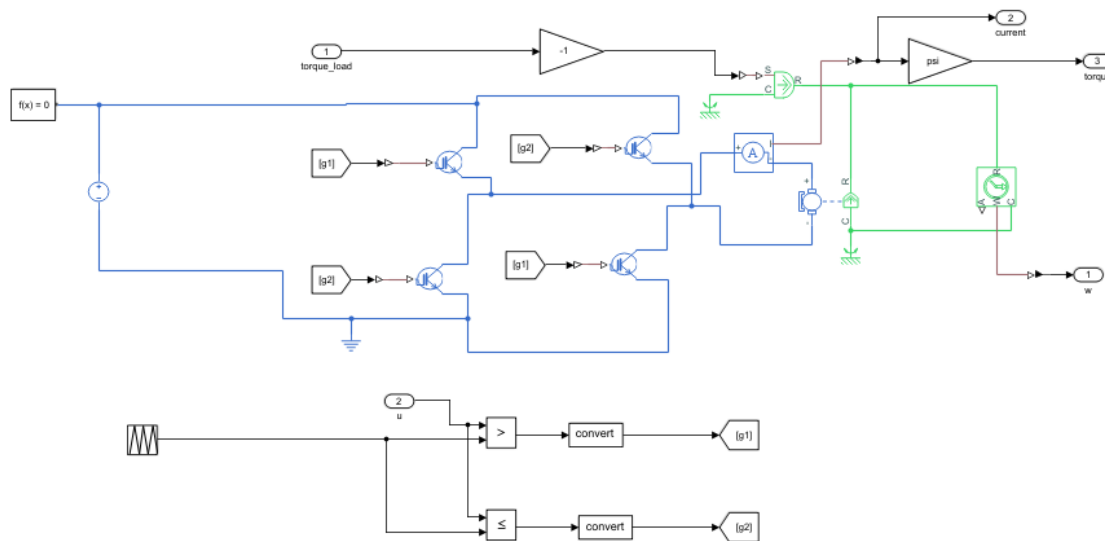
MATLAB Function

```
function u_pwm = fcn(u, tri)
if u >= tri
    u_pwm = 1;
else
    u_pwm = -1;
end
```

Дополнительное задание 1 «Моделирование системы управления с ШИП»

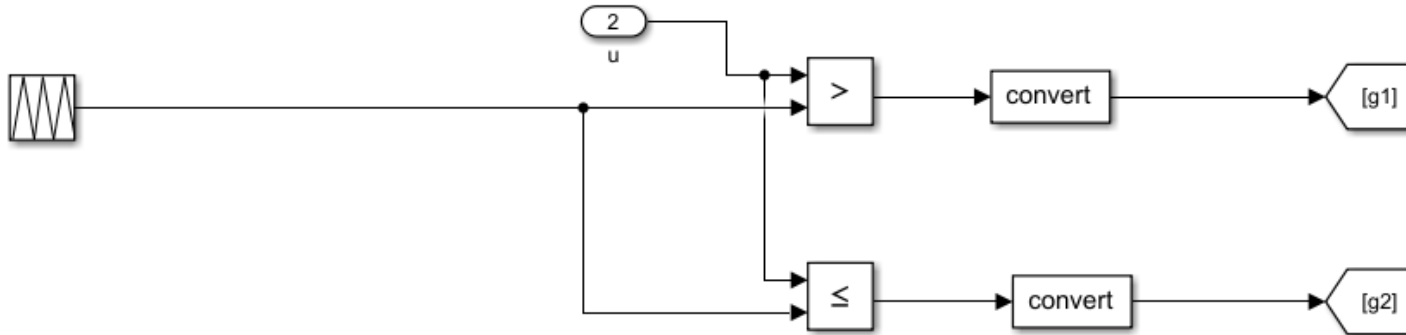
Реализация для модели Simscape:

В модель двигателя добавляется мостовой ШИП типа Н-мост на MOSFET или IGBT транзисторах и блок формирования управления для ключей



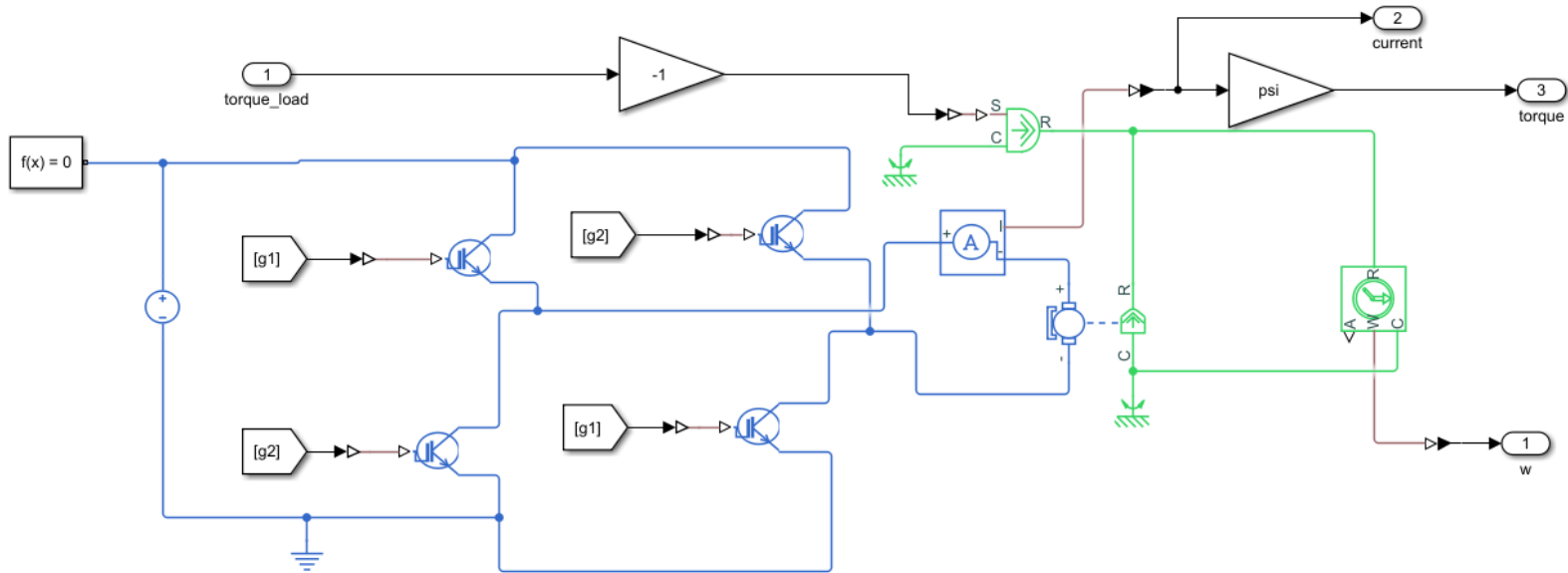
Дополнительное задание 1 «Моделирование системы управления с ШИП»

Блок формирования управления для ключей:



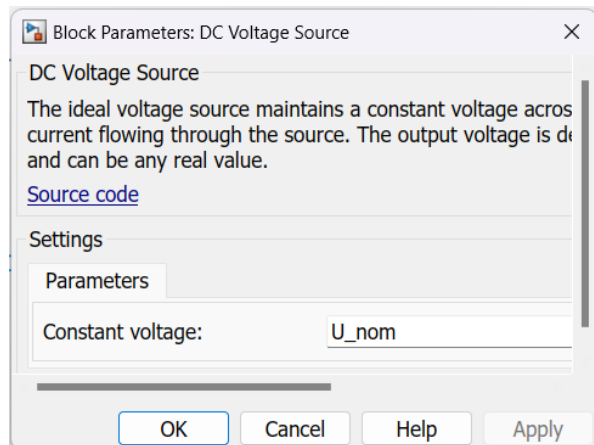
Дополнительное задание 1 «Моделирование системы управления с ШИП»

Двигатель и усилитель:

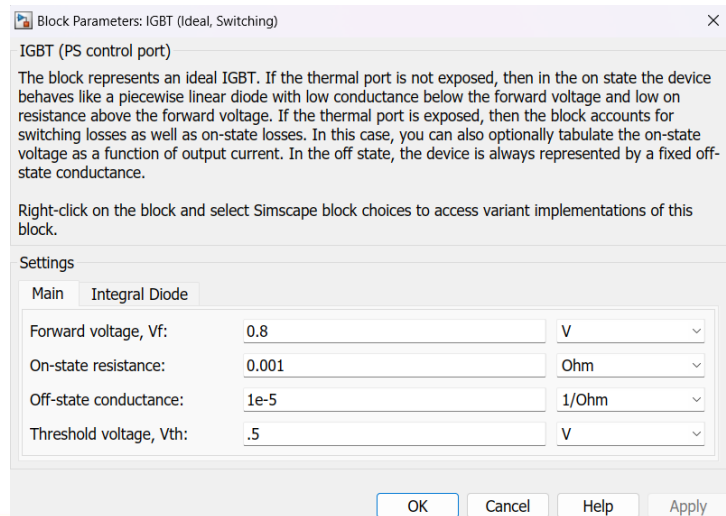
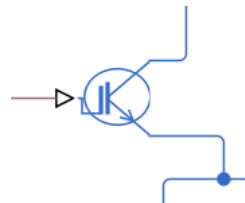


Дополнительное задание 1 «Моделирование системы управления с ШИП»

Источник:



Силовой ключ:



Дополнительное задание 2 «Идентификация параметров двигателя с использованием МНК»

Произвести экспериментальную оценку электрических параметров ДПТ (сопротивление, индуктивность, потокосцепление) с использованием метода наименьших квадратов.



Рассматривается дифференциальное уравнение, описывающее работу электрической части ДПТ НВ

$$L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = U - r \cdot i_a(t) - \Psi \cdot \omega(t)$$


Идентификация выполняется без СУ. В качестве тестового сигнала используется меандр напряжения. Данные регистрируются с периодом $T_d = 0.0001$ с.

Дополнительное задание 2 «Идентификация параметров двигателя с использованием МНК»


Принцип оценки параметров методом МНК



$$\frac{dy}{dt} = K_1 x_1 + K_2 x_2 + K_3 x_3$$


$$\frac{d}{dt} = s$$

$$sy = K_1 x_1 + K_2 x_2 + K_3 x_3$$


$$s = \frac{2 \cdot (1 - z^{-1})}{T_d \cdot (1 + z^{-1})}$$

$$y_n - y_{n-1} = K_1 \cdot \frac{T_d}{2} \cdot (x_{1n} + x_{1n-1}) + K_2 \cdot \frac{T_d}{2} \cdot (x_{2n} + x_{2n-1}) + K_3 \cdot \frac{T_d}{2} \cdot (x_{3n} + x_{3n-1})$$

Дополнительное задание 2 «Идентификация параметров двигателя с использованием МНК»

Принцип оценки параметров методом МНК



$$y_n - y_{n-1} = K_1 \cdot \frac{T_d}{2} \cdot (x_{1n} + x_{1n-1}) + K_2 \cdot \frac{T_d}{2} \cdot (x_{2n} + x_{2n-1}) + K_3 \cdot \frac{T_d}{2} \cdot (x_{3n} + x_{3n-1})$$



$$\hat{y}_n = K_1 \cdot \hat{x}_{1n} + K_2 \cdot \hat{x}_{2n} + K_3 \cdot \hat{x}_{3n}$$



$$\mathbf{Y}_{n \times 1} = \mathbf{X}_{n \times 3} \cdot \mathbf{K}_{3 \times 1}$$



$$\mathbf{K} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}$$

**Спасибо
за внимание!**

it^{'s}**MO** *re than a*
UNIVERSITY

amamatov@itmo.ru