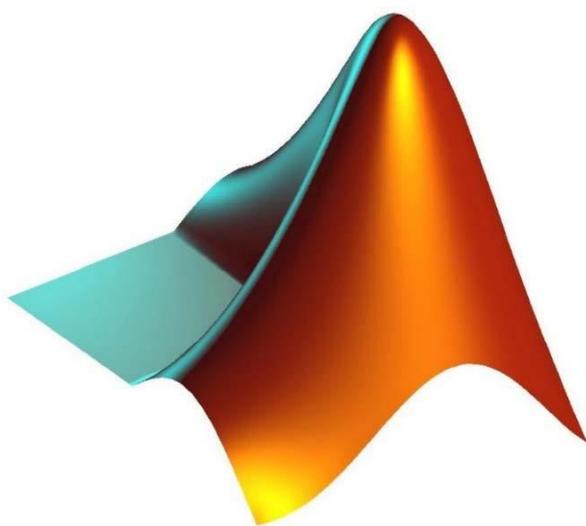


Владимирский государственный университет

С. И. ЛИХОДЕЕВ

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Практикум



Владимир 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

С. И. ЛИХОДЕЕВ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Практикум

Электронное издание



Владимир 2021

ISBN 978-5-9984-1355-1

© ВлГУ, 2021

© Лиходеев С. И., 2021

УДК 681.5
ББК 32.81

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
зам. начальника отдела измерительной техники
ЗАО НПП «Автоматика»
В. М. Дерябин

Кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры информационных систем и программной инженерии
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
С. Ю. Кириллова

Лиходеев, С. И. Информационные технологии в технических системах [Электронный ресурс] : практикум / С. И. Лиходеев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 133 с. – ISBN 978-5-9984-1355-1. – Электрон. дан. (8,41 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Представлено шесть практических занятий по основным разделам курса «Математическое моделирование объектов и систем управления», которые выполняются в среде MATLAB.

Предназначен для студентов бакалавриата, магистрантов направлений подготовки 27.03.04, 27.04.04 «Управление в технических системах». Может быть полезен при подготовке выпускных квалификационных работ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 9. Ил. 158. Библиогр.: 10 назв.

ISBN 978-5-9984-1355-1

© ВлГУ, 2021
© Лиходеев С. И., 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Практическое занятие 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ | 5 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 36 |
| Практическое занятие 2 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩИМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ | 36 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 60 |
| Практическое занятие 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В РЕАКТОРЕ | 61 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 66 |
| Практическое занятие 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В РЕАКТОРЕ | 67 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 79 |
| Практическое занятие 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 80 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 104 |
| Практическое занятие 6 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ И ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ | 104 |
| <i>Контрольные вопросы</i> | 130 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 131 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 132 |

ВВЕДЕНИЕ

Система MATLAB предлагается разработчиками (корпорация MathWorks, Inc.) как лидирующий на рынке, в первую очередь на предприятиях военно-промышленного комплекса, в энергетике, аэрокосмической отрасли и автомобилестроении, язык программирования высокого уровня для технических вычислений, расширяемый большим числом пакетов прикладных программ. Она вобрала в себя не только передовой опыт развития и компьютерной реализации численных методов, накопленный за последние три десятилетия, но и весь опыт становления математики за всю историю человечества [1].

Популярности системы MATLAB способствуют ее матричная ориентация и мощное главное расширение Simulink. MATLAB и Simulink предоставляют пользователю удобные и простые средства, в том числе визуального объектно-ориентированного программирования, для моделирования линейных и нелинейных динамических систем, а также множество других пакетов расширения системы.

Начинающий пользователь MATLAB может в процессе работы совершенствовать свои знания как в области моделирования и численных методов, так и в области программирования и визуализации данных.

Практическое занятие 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Автоматизация производственных процессов является одним из важнейших направлений технического прогресса, совершенствование технологии, увеличение производительности труда, а также повышения качества выпускаемой продукции относится к первостепенным задачам технологического процесса. Решить эти задачи возможно при внедрении систем автоматического управления и регулирования как отдельных объектов и процессов, так и производством в целом.

Рассмотрим функциональную схему системы автоматического регулирования температуры, представленной на рисунке 1.1 [1].

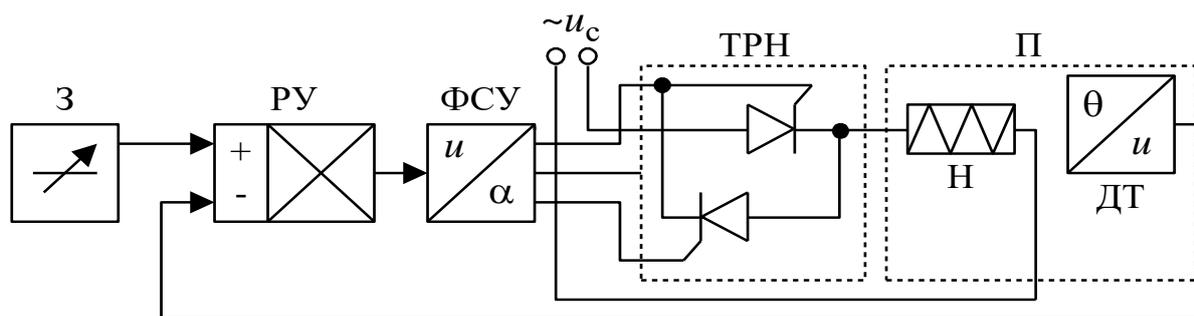


Рис. 1.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования температуры

Принцип действия состоит в следующем, необходимо поддерживать температуру объекта на заданном уровне. Устройством для измерения температуры выступает датчик температуры (ДТ), который расположен в печи (П), значения температуры поступают от ДТ в регулирующее устройство (РУ). В самом РУ формируется управляющее воздействие, за счёт заложенного алгоритма управления в регуляторе.

Далее с РУ сигнал поступает на исполнительное устройство, исполнительным устройством является тиристорный регулятор напряжения (ТРН), управление которым происходит фазосдвигающим устройством (ФСУ), задача которого формировать такие углы включения тиристоров, чтобы напряжение, подаваемое на нагреватель, поддержи-

вало заданную температуру. Требуемая температура задаётся при помощи задатчика (3). Структурная схема системы автоматического регулирования температуры представлена на рисунке 1.2 [1].

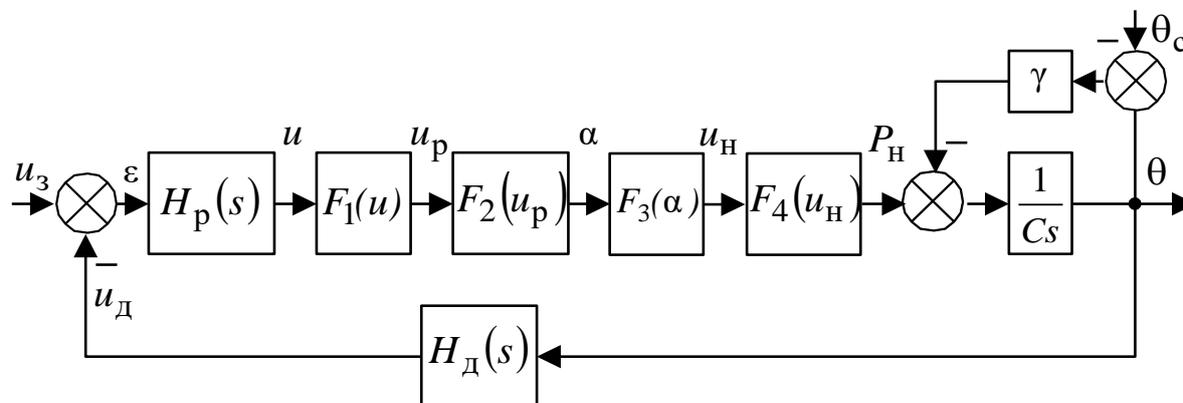


Рис. 1.2. Структурная схема системы автоматического регулирования температуры

Передаточная функция (ПФ) РУ:

$$H_p(s) = \frac{K_p * (T_p s + 1)}{T_p s}$$

F_2 – нелинейная характеристика фазосдвигающего устройства (ФСУ):

$$\alpha = F_2(u_p) = \frac{\pi}{1 + k_0 * u_p}$$

k_0 – коэффициент пропорциональности;

F_3 – зависимость действующего значения выходного напряжения тиристорного регулятора от угла включения тиристоров определяется по следующей формуле:

$$F_3(\alpha) = u_H = U_c \sqrt{\frac{1}{\pi} * (\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2})}$$

U_c - действующее значение напряжения питающей сети, 220 В;

Рассмотрим моделирование системы в среде Matlab [2]. Параметры схемы представлены в таблице.

| $u_3, В$ | k_p | $T_p, с$ | $k_d, В/°С$ | $T_d, с$ | $k_0, 1/В$ | $R_H, Ом$ | $C, Дж /°С$ | $\gamma, Вт/°С$ | $\theta_c, °С$ |
|----------|-------|----------|-------------|----------|------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|
| 5 | 0,9 | 5 | 0,05 | 4 | 0,2 | 25 | 200 | 5 | 25 |

Рассмотрим описание объекта управления. Его статические и динамические характеристики

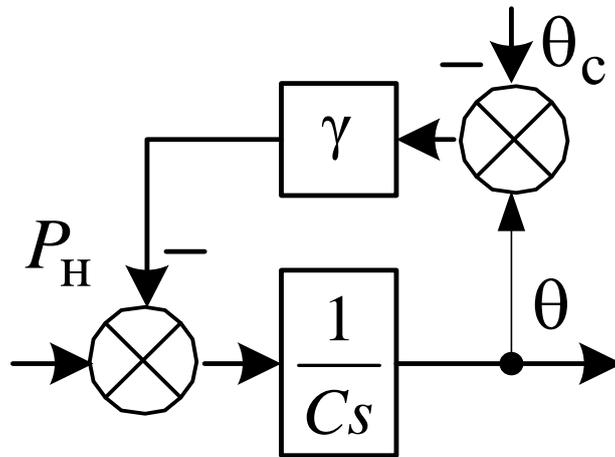


Рис. 1.3. Структурная схема объекта управления

Рассмотрим объект управления, и его статические и динамические характеристики, структурная схема объекта управления представлена на рисунке 1.3 [1]. Объектом управления является печь с нагревательным элементом, за управление которым отвечает тиристорный выпрямитель. Тепловое сопротивление изоляции печи моделируется при помощи блока усиления с коэффициентом γ и сумматоров. C – теплоемкость печи.

Ниже представлены виртуальная модель объекта управления, статические и динамические характеристики.

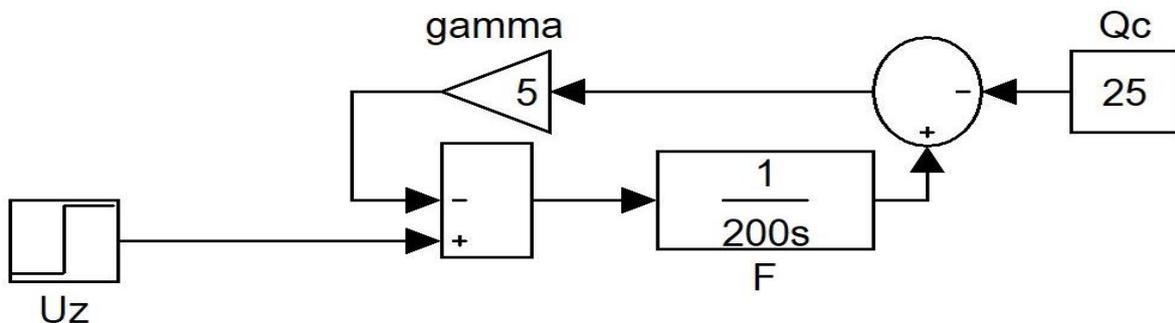


Рис. 1.4. Виртуальная модель объекта управления

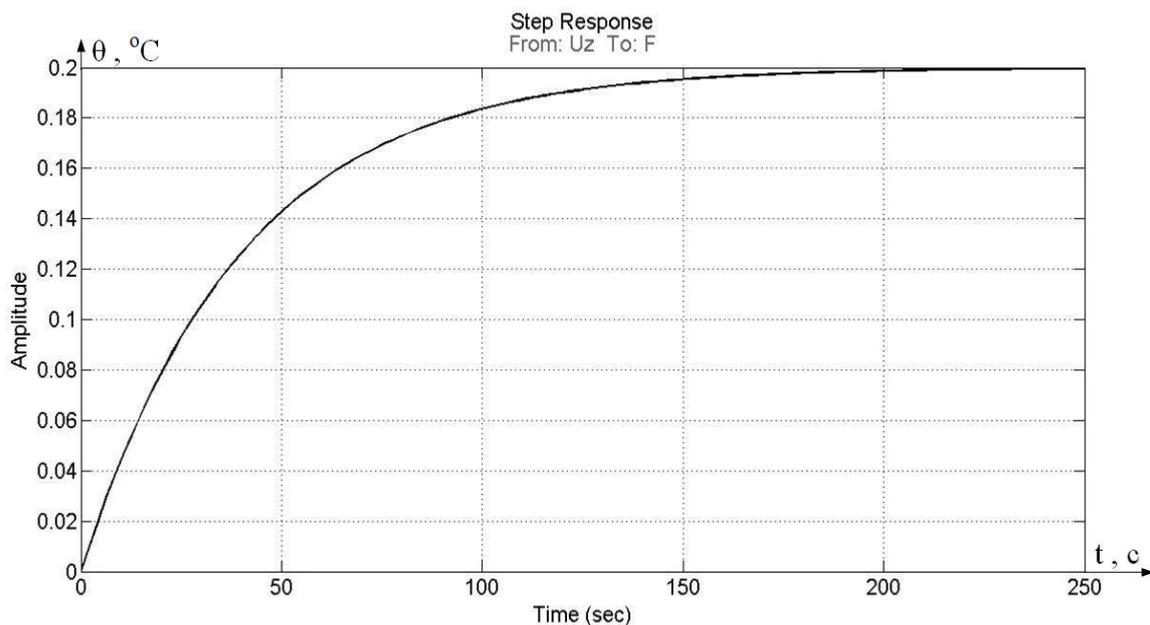


Рис. 1.5. Переходная характеристика объекта управления

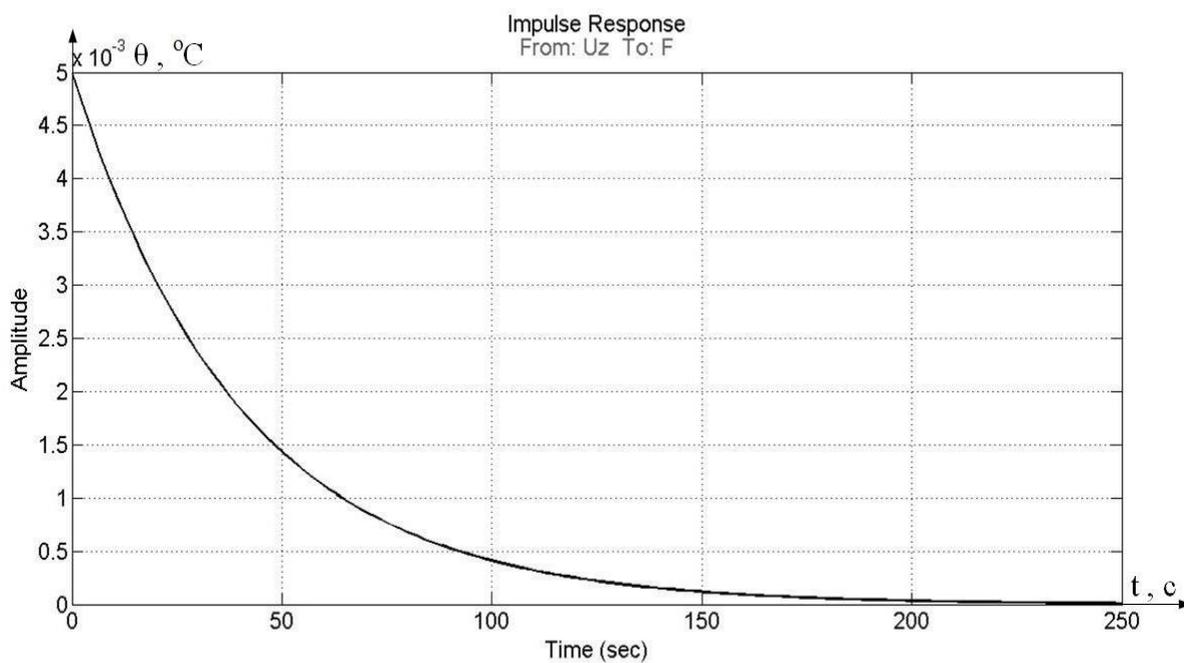


Рис. 1.6. Импульсная переходная характеристика объекта управления

Произведём расчёт статистических характеристик объекта управления, для этого построим виртуальную модель, которая представлена на рисунке 1.7, а также напишем программы для взаимодействия с моделью.

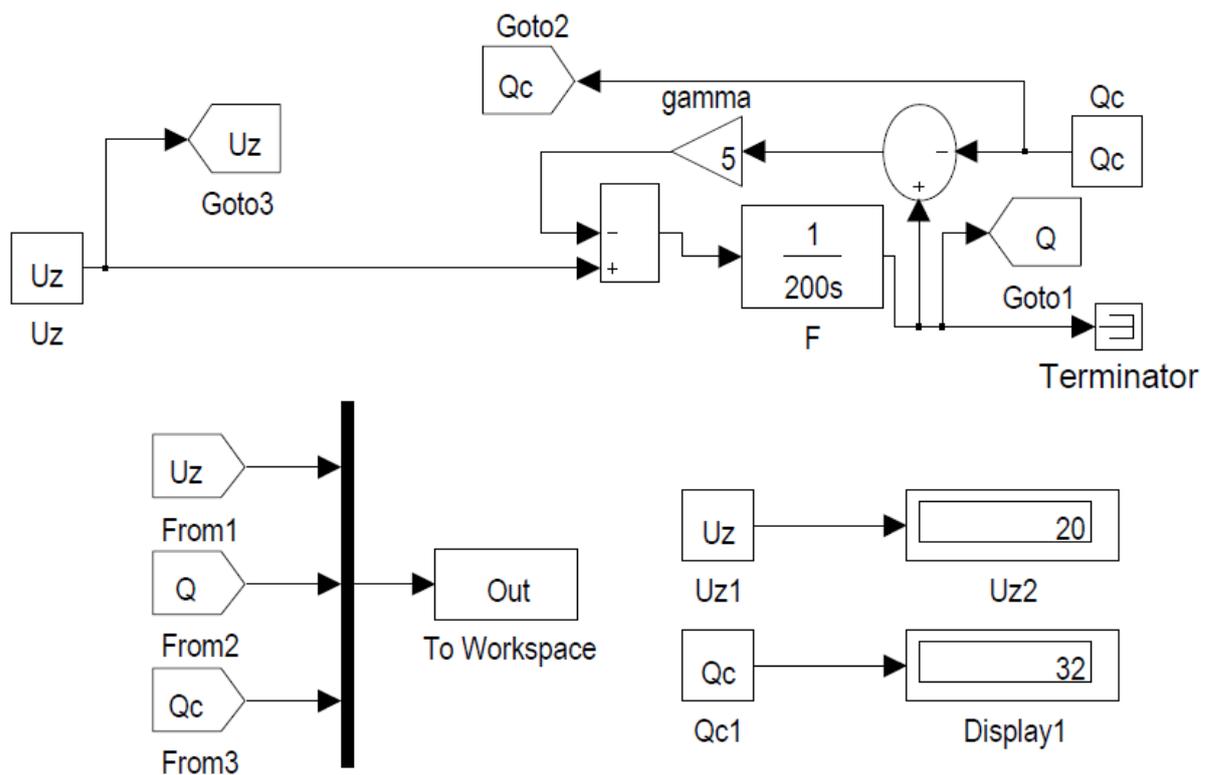


Рис. 1.7. Виртуальная модель для расчёта статистических характеристик

Листинг программы для построения зависимости температуры от напряжения задания при постоянной температуре внешней среды приведен ниже:

```

for k1=0:2:6;
Qc=-40+12*k1; % температура внешней среды;
for k=1:1:20;
Uz=1*k; % напряжение задания;
sim('temperatur'); % команда обращения к модели;
A(k,1)=Out(1); % формирование массива величины Uz;
A(k,2)=Out(2); % формирование массива величины  $\theta$ ;
A(k,3)=Out(3); % формирование массива величины  $\theta_c$ ;
end
plot(A(1:k,1),A(1:k,2),'k'); % построение графиков;

```

hold on % - обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно, что позволяет добавлять последующие графики к уже существующим;

end

grid on % добавляет сетку к текущему графику;

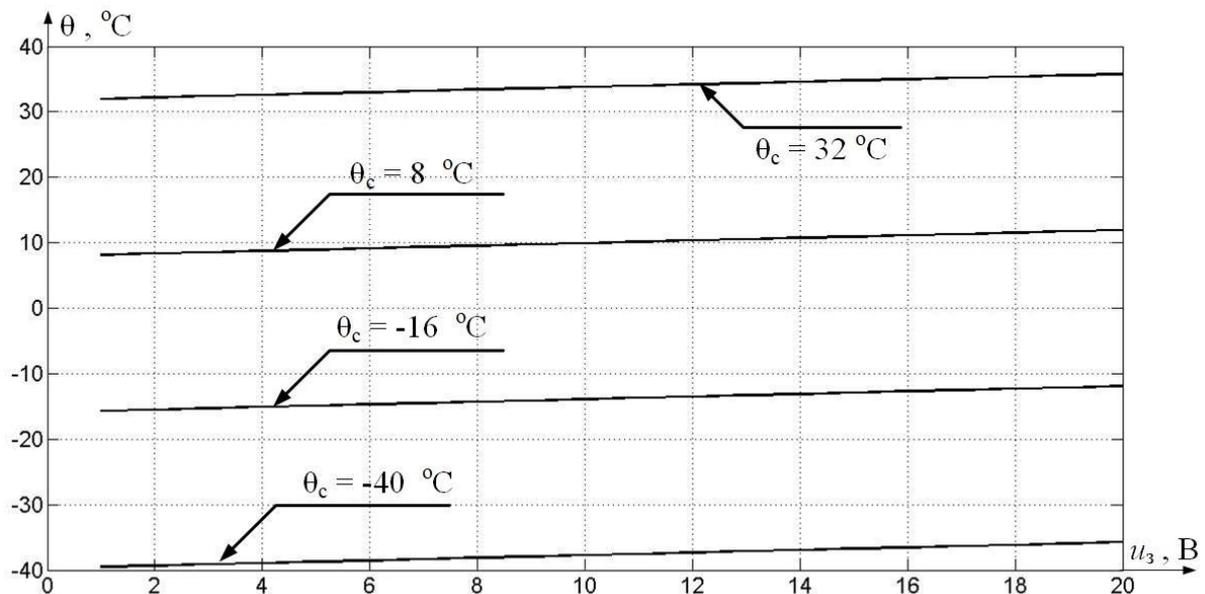


Рис. 1.8. Зависимость температуры от напряжения задания при постоянной температуре внешней среды

Листинг программы для построения зависимости температуры от температуры внешней среды при постоянном напряжении задания приведен ниже:

```
for k1=1:1:3;  
  Uz=4*k1; % напряжение задания;  
  for k=1:1:40;  
    Qc=-40+2*k; % температура внешней среды;  
    sim('temperatur'); % команда обращения к модели;  
    A(k,1)=Out(1); % формирование массива величины  $U_z$ ;  
    A(k,2)=Out(2); % формирование массива величины  $\theta$ ;  
    A(k,3)=Out(3); % формирование массива величины  $\theta_c$ ;  
  end  
  plot(A(1:k,3),A(1:k,2),'k'); % построение графиков;
```

hold on % - обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно, что позволяет добавлять последующие графики к уже существующим;

end

grid on % добавляет сетку к текущему графику;

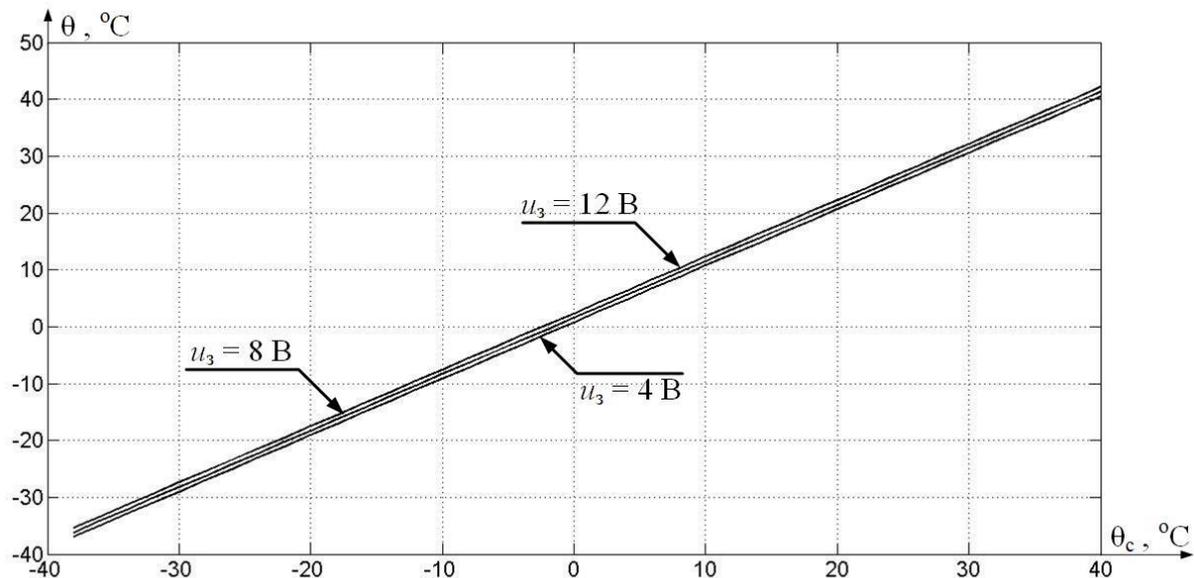


Рис. 1.9. Зависимость температуры от температуры внешней среды при постоянном напряжении задания

Передаточная функция датчика:

$$H_d(s) = \frac{k_d}{T_d s + 1}$$

В исследуемой схеме регулирующим устройством выступает ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$H_p(s) = \frac{K_p(T_p s + 1)}{T_p s}$$

В рассматриваемой схеме исполнительным устройством выступает тиристорный выпрямитель, который подает напряжение на нагреватель в соответствии с управляющим воздействием, который вырабатывает регулятор.

Управление величиной выпрямленного напряжения происходит с использованием изменением момента отпирания тиристоров.

На управляющий электрод тиристора периодически подаются импульсы напряжения U_y , которые могут сдвигаться во времени по отношению к моменту появления положительной полуволны коллекторного напряжения U_k . В результате меняется момент отпирания тиристора, начиная с которого и до конца положительной полуволны коллекторного напряжения тиристор находится в открытом состоянии. Этот сдвиг обозначается α и называется углом управления. Такой метод управления называется импульсно-фазовым. [3]

Устройство, обеспечивающее нужный угол открывания тиристоров, выступает фазосдвигающим устройством (ФСУ).

Модель исполнительного устройства представлена на рисунке 1.10.

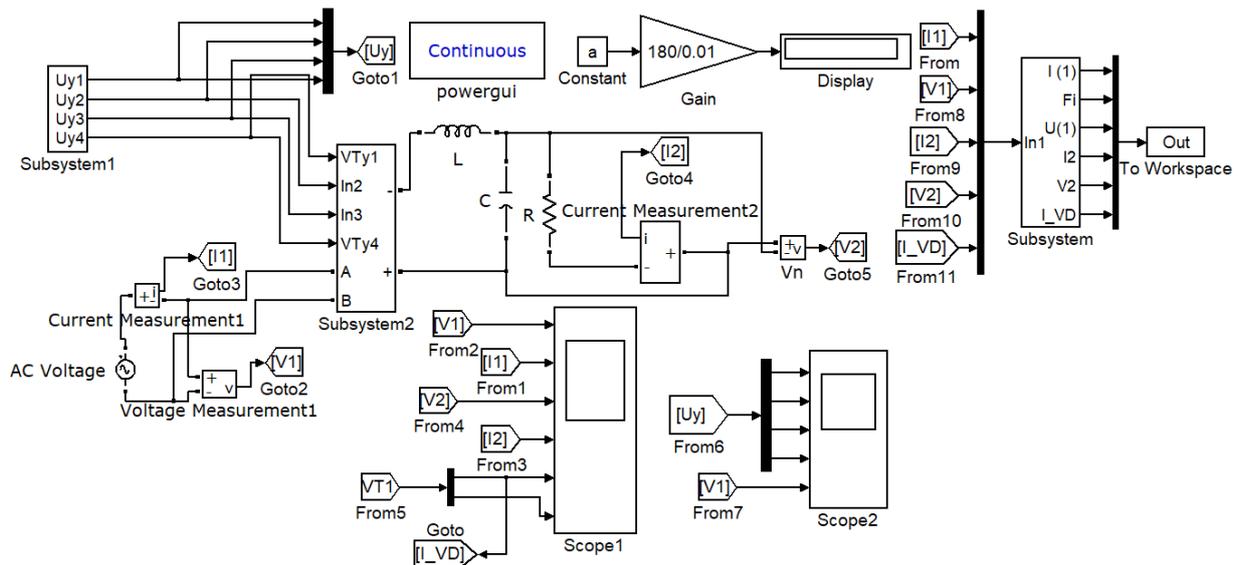


Рис. 1.10. Виртуальная модель исполнительного устройства

Листинг программы приведен ниже:

```

for k=0:1:8;
a=0.01*k/9; % угол управления;
sim('R35s2') % команда обращения к модели;
A(k+1,1)=Out(1); % формирование массива величины тока I1;
A(k+1,2)=Out(2); % формирование массива величины фаз Fi;
A(k+1,3)=Out(3); % формирование массива величины напряже-
ния U1;

```

```

A(k+1,4)=Out(4); % формирование массива величины тока I2;
A(k+1,5)=Out(5); % формирование массива величины напряже-
ния U2;
A(k+1,6)=Out(6); % формирование массива величины тока вен-
тильного диода I_VD;
A(k+1,7)=a*180/0.01; % формирование массива данных угла
управления переведённого из радиан в секунду в градусы;
end
plot(A(1:k,7),A(1:k,5),'k') % построение графиков;
hold on; % - обеспечивает продолжение вывода графиков в теку-
щее окно, что позволяет добавлять последующие графики к уже суще-
ствующим;
grid on % добавляет сетку к текущему графику;

```

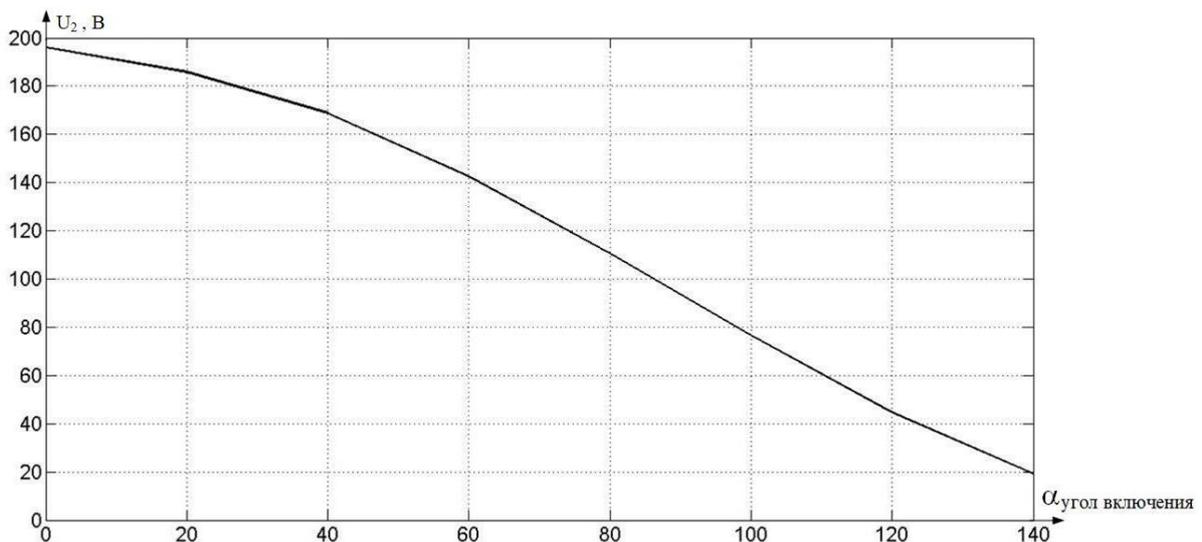


Рис. 1.11. Регулировочная характеристика исполнительного устройства

Рассмотрим нелинейности автоматической системы и их статические характеристики

$F_1(u)$ – нелинейность, отражающая ограничение выходного сигнала регулирующего устройства;

$$F_1(u) = u_p = \begin{cases} u & \text{при } 0 \leq u \leq u_{pm}; \\ 0 & \text{при } u \leq 0; \\ u_{pm} & \text{при } u \geq u_{pm}; \end{cases}$$

u_p – выходной сигнал регулирующего устройства;
 $u_{pм}$ – максимальное значение выходного сигнала регулирующего устройства; $u_{pм} = 10$ В

Статическая характеристика нелинейности имеет вид:

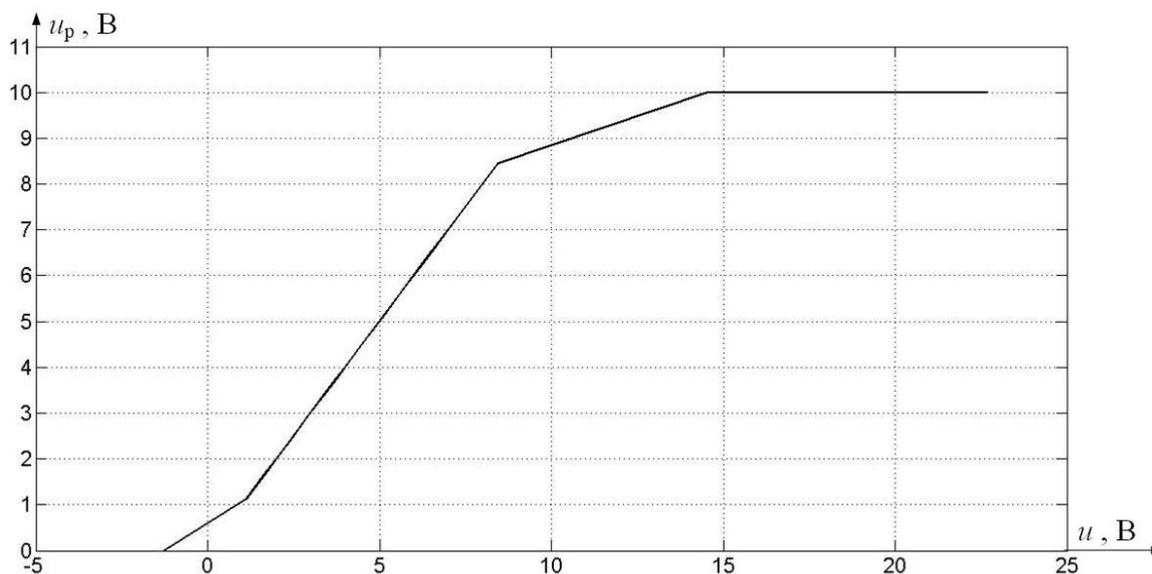


Рис. 1.12. Статическая характеристика нелинейности $F_1(u)$

$F_2(u_p)$ – нелинейная характеристика фазосдвигающего устройства (ФСУ);

$$\alpha = F_2(u_p) = \frac{\pi}{1 + k_0 u_p};$$

k_0 – коэффициент пропорциональности;

Статическая характеристика нелинейности имеет вид:

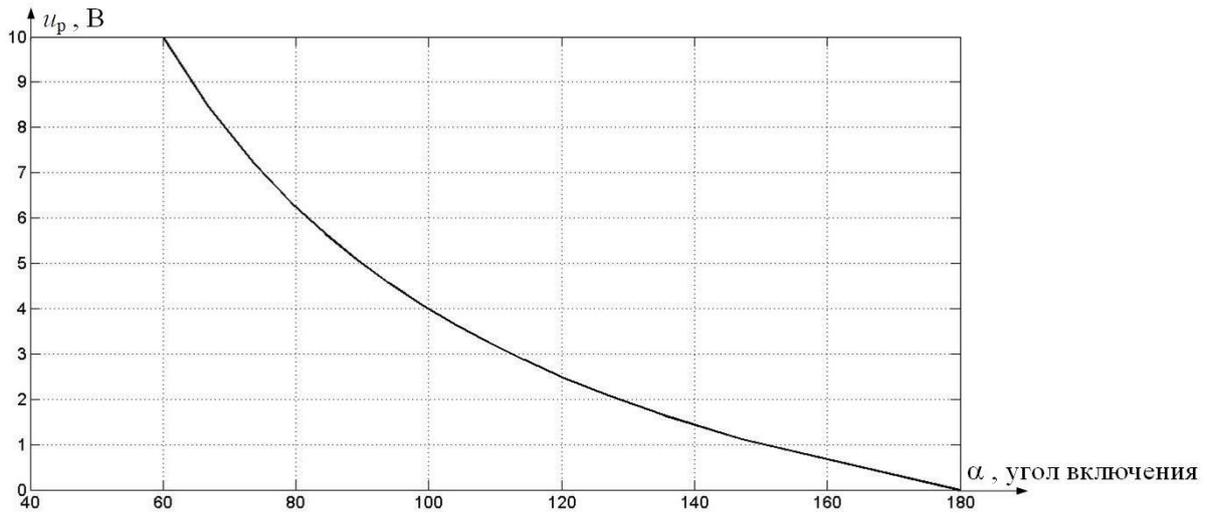


Рис. 1.13. Статическая характеристика нелинейности $F_2(u)$

$F_3(\alpha)$ – зависимость действующего значения выходного напряжения тиристорного регулятора от угла включения тиристоров;

$$F_3(\alpha) = u_H = U_H \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)};$$

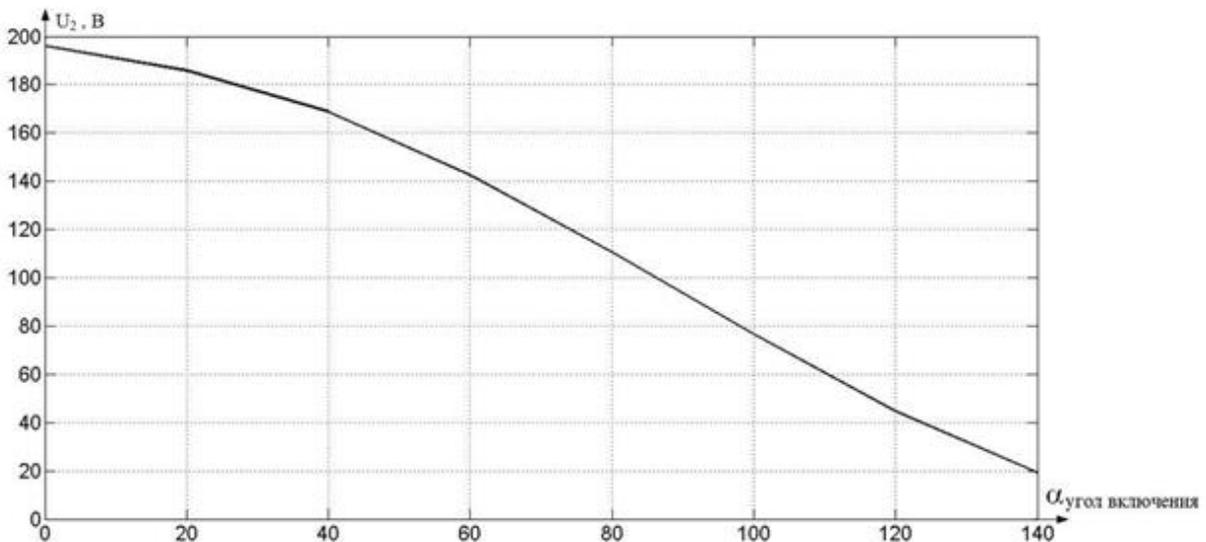


Рис. 1.14. Статическая характеристика нелинейности $F_3(u)$

$F_4(u_H)$ – нелинейная зависимость мощности электротеплового преобразователя (нагревателя) от напряжения;

$$F_4(u_H) = P_H = \frac{u_H^2}{R_H};$$

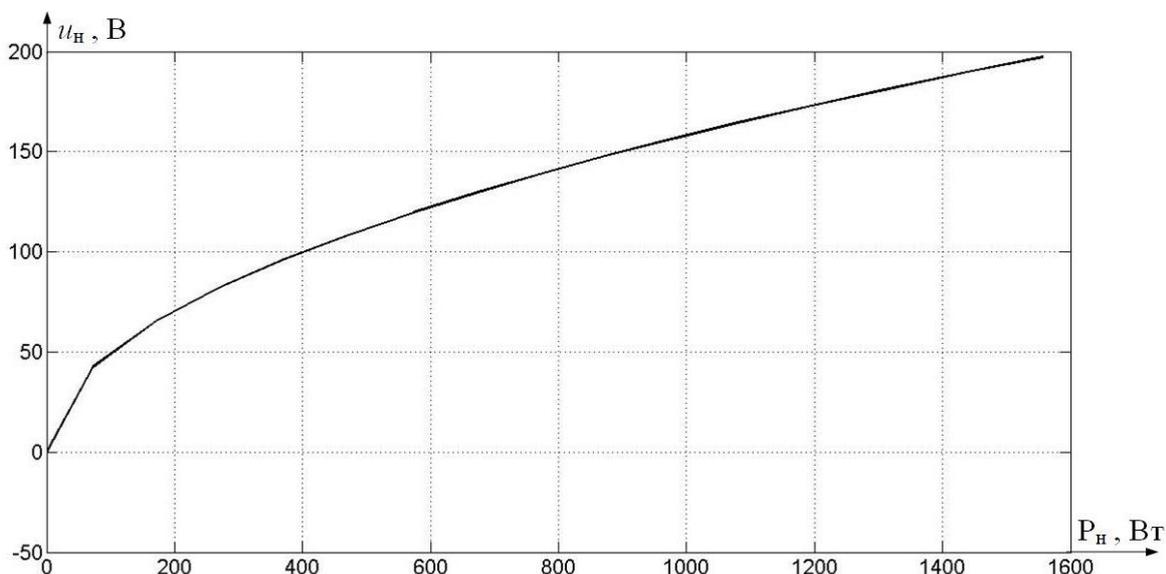


Рис. 1.15. Статическая характеристика нелинейности $F_4(u)$

После рассмотрения всех элементов системы автоматического регулирования температуры, перейдём к построению виртуальной модели, для этого воспользуемся пакетом прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab [2].

Модель автоматического регулирования температуры представлена на рисунке 1.16.

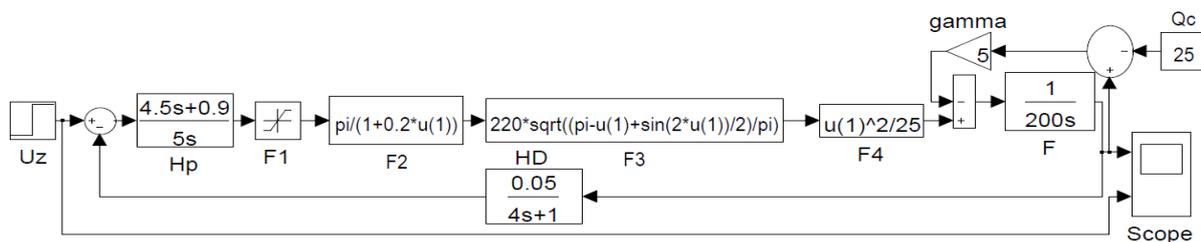


Рис. 1.16. Виртуальная модель системы автоматического регулирования температуры

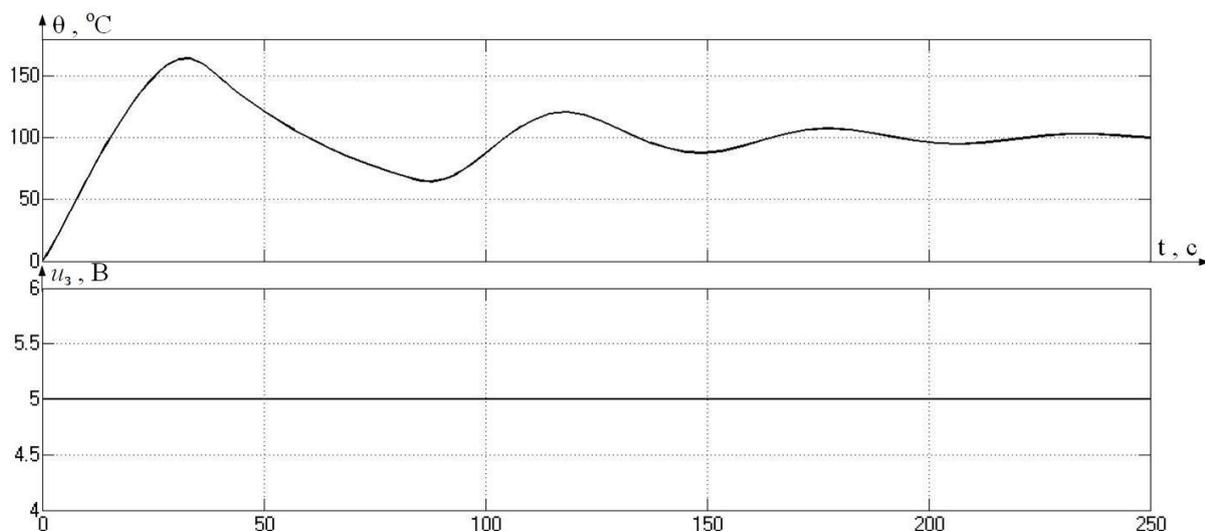


Рис. 1.17. Характеристика температура при $u_3 = 5 \text{ В}$

Исходя из полученных характеристики, можно сделать вывод, что данная модель с заданными параметрами, не может быть использована для дальнейшего её исследования т.к. перерегулирования составляет около 70%, а время регулирования 206 секунд. Поэтому необходимо произвести настройку параметров ПИ – регулятора, для этого воспользуемся блоком *Signal Constraint* [2].

Задача блока *Signal Constraint* заключается в следующем, что на базе заданных ограничений автоматически генерировать задачу конечномерной оптимизации так, чтобы точка экстремума в пространстве настраиваемых параметров соответствовала выполнению всех требований, предъявляемых к качеству процесса.

Подготовленная модель к настройке ПИ – регулятора представлена на рисунке 1.18.

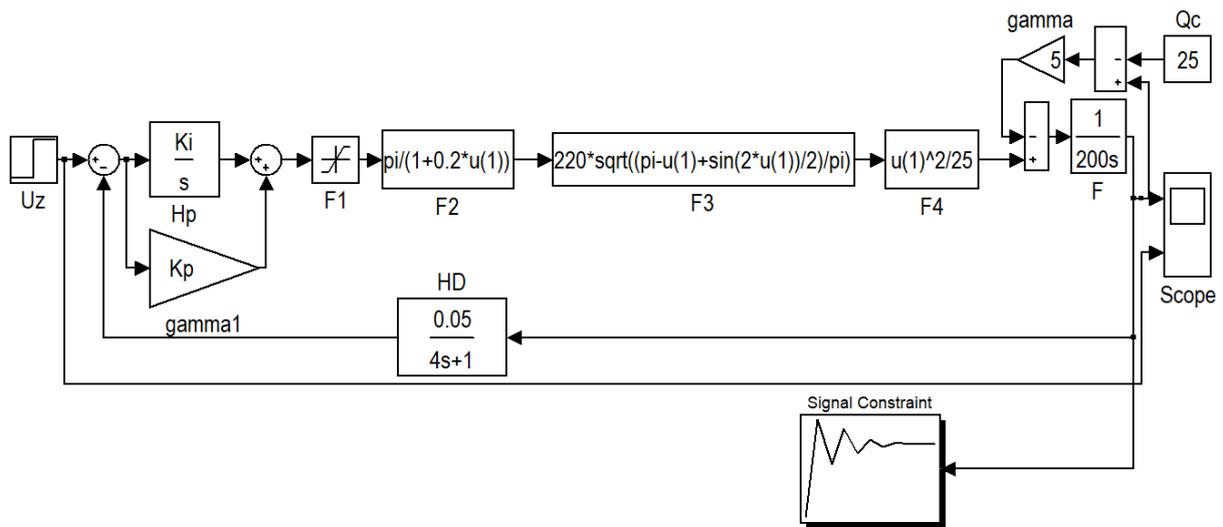


Рис. 1.18. Подготовленная модель к настройке ПИ – регулятора

Для начала зададим начальные значения K_i и K_p (рис. 1.18).

$K_i = 1$; $K_p = 1$. Далее необходимо настроить сам коридор, в пределах которого, должен находиться сигнал блока в соответствии с требованиями задачи. Это можно сделать, передвигая линии, являющиеся границами коридора, либо задать точные значения при помощи диалоговой панели.

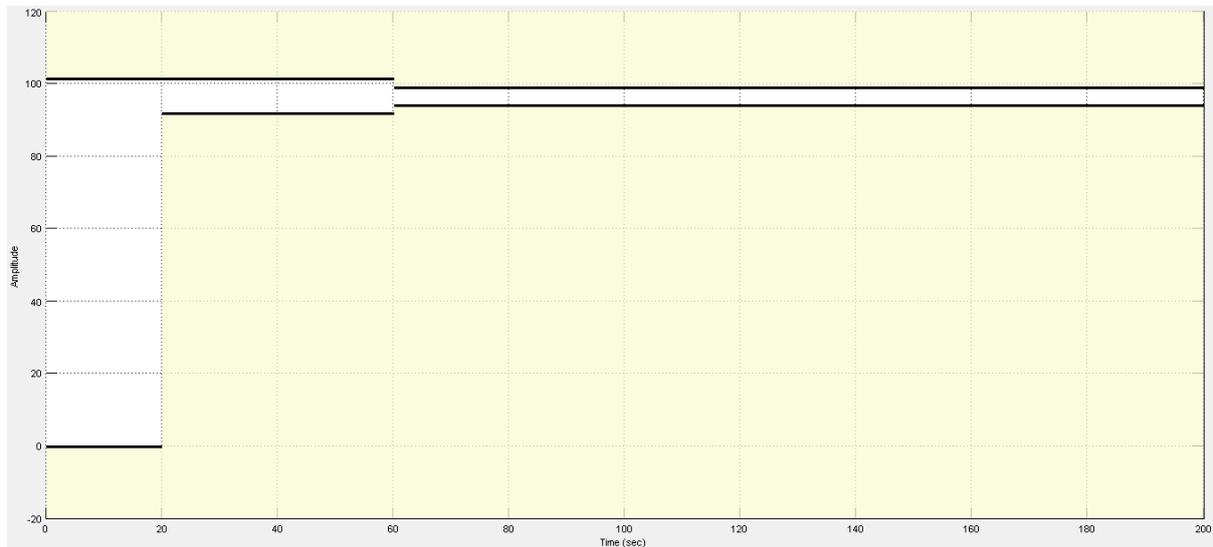


Рис. 1.19. Окно *Signal Constraint*

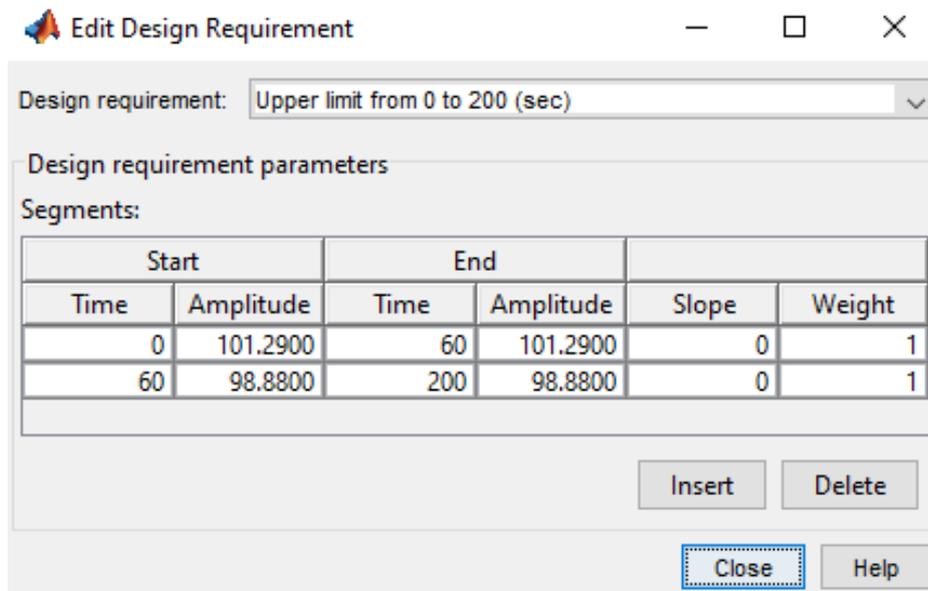


Рис.1.20. Окно ввода верхних границ канала

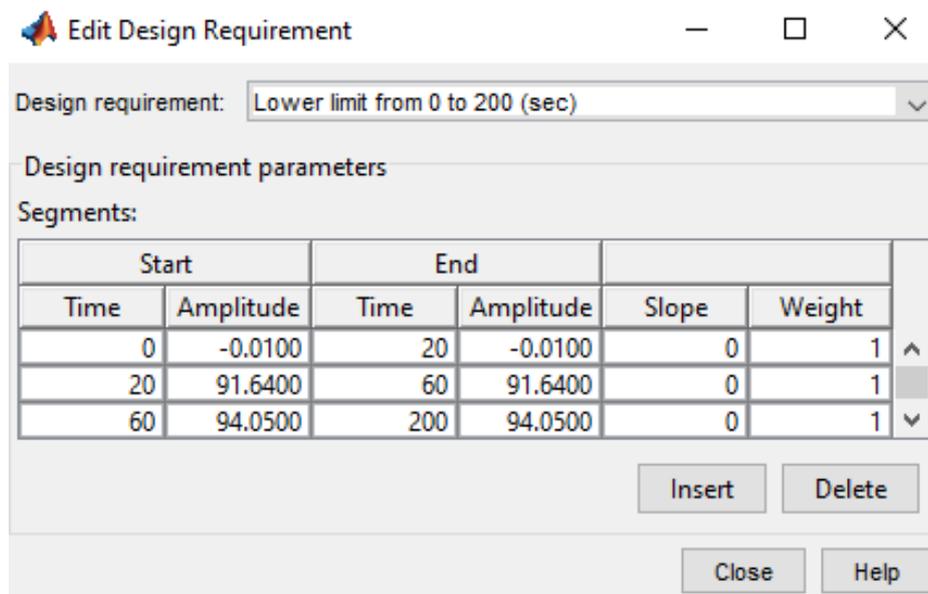


Рис. 1.21. Окно ввода нижних границ канала

Добавим коэффициенты регулятора, которые нужно настроить.

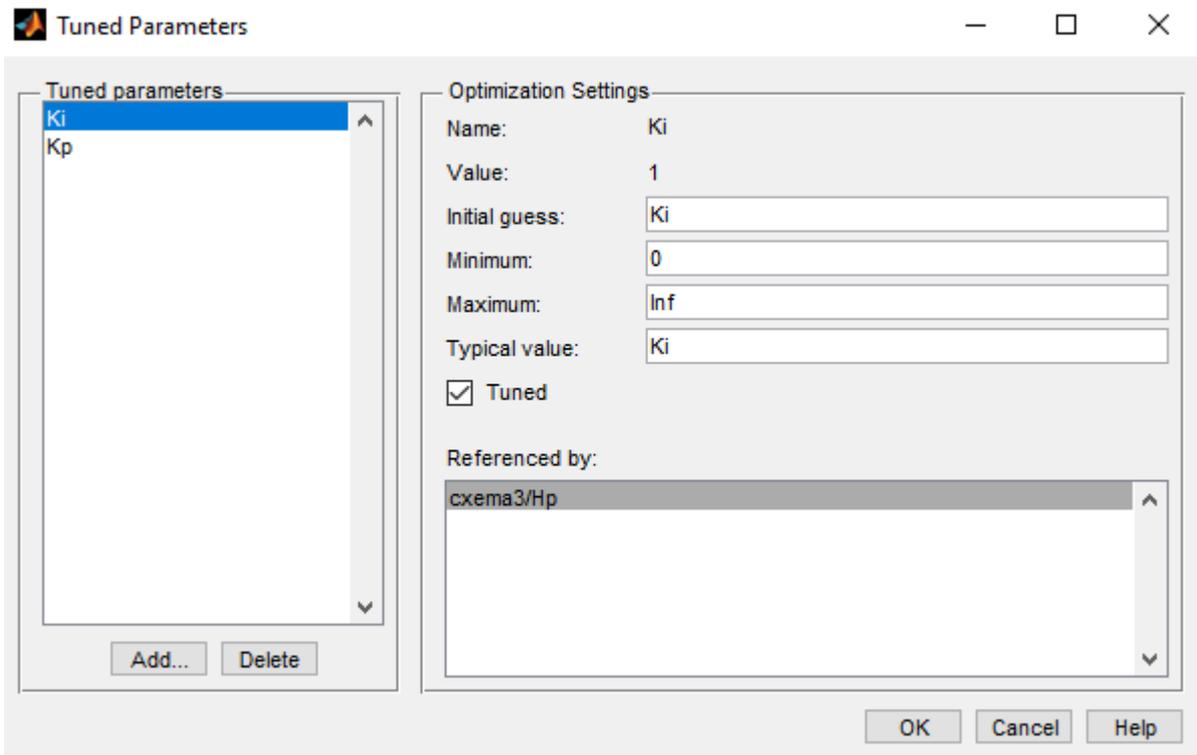


Рис. 1.22. Окно настройки оптимизации

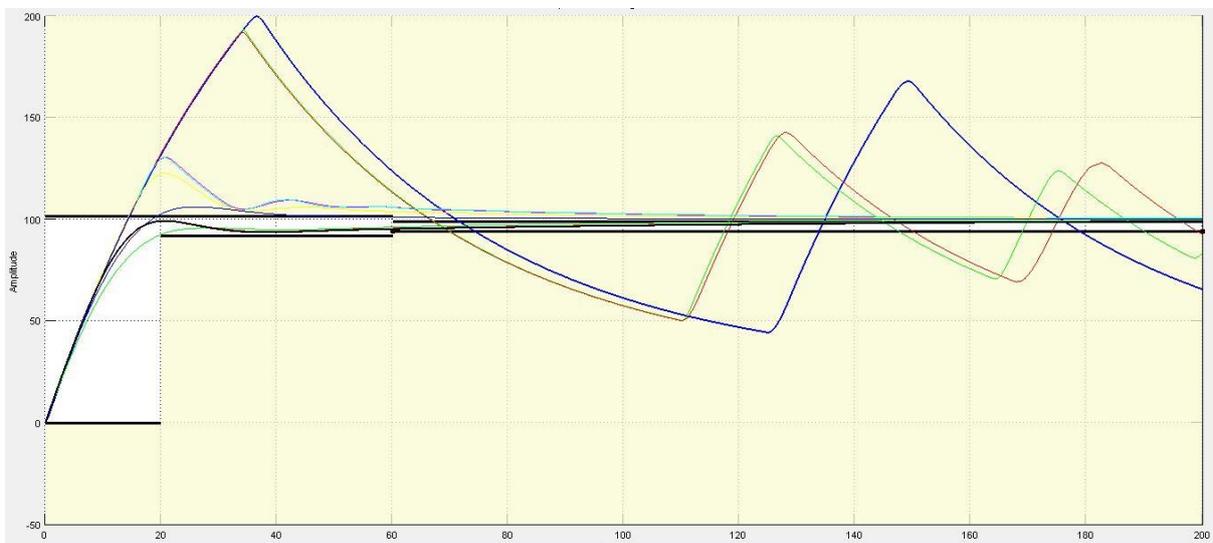


Рис. 1.23. Процесс расчёта ПИ – регулятора

После процесса оптимизации значения ПИ – регулятора стали следующие: $K_i = 0,0285$; $K_p = 2,4381$.

На рис. 1.24 представлена модель после настройки ПИ – регулятора.

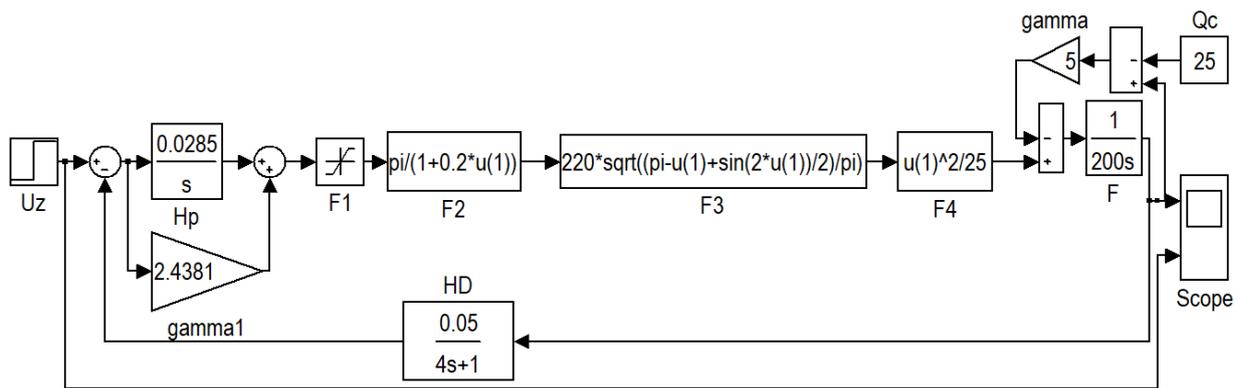


Рис. 1.24. Настроенная виртуальная модель

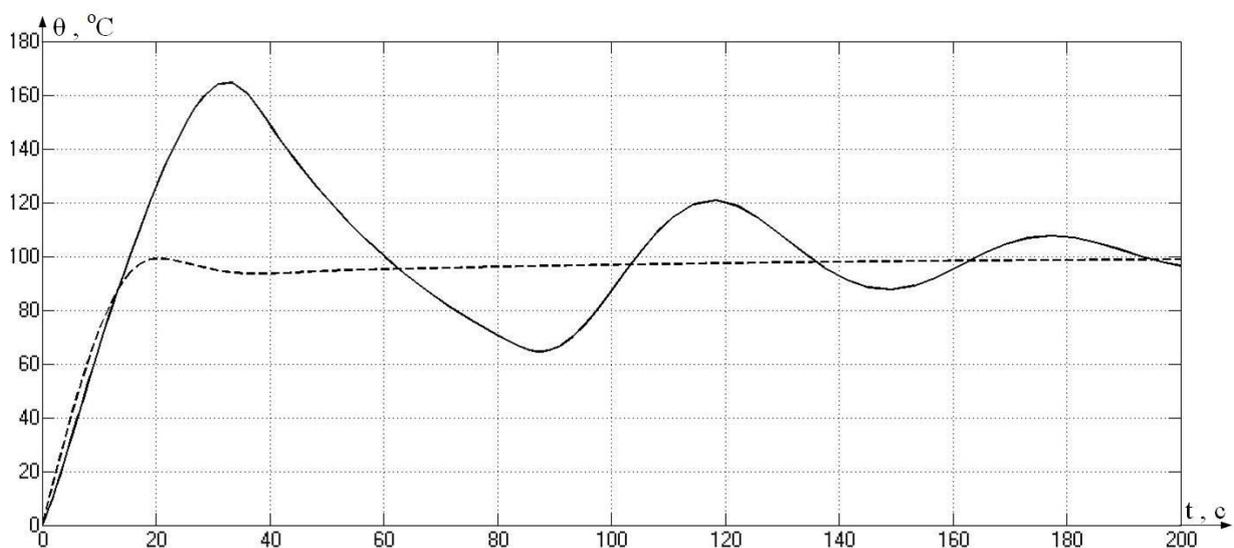


Рис. 1.25. Характеристики температуры до и после настройки ПИ – регулятора

После настройки ПИ – регулятора, редактируем виртуальную модель для расчёт статистических характеристики, а также напишем программу для построения зависимости температуры от напряжения задания при постоянной температуре внешней среды и для построения зависимости температуры от температуры внешней среды при постоянном напряжении задания.

На рисунке 1.26 представлена виртуальная модель для расчёта статистических характеристик.

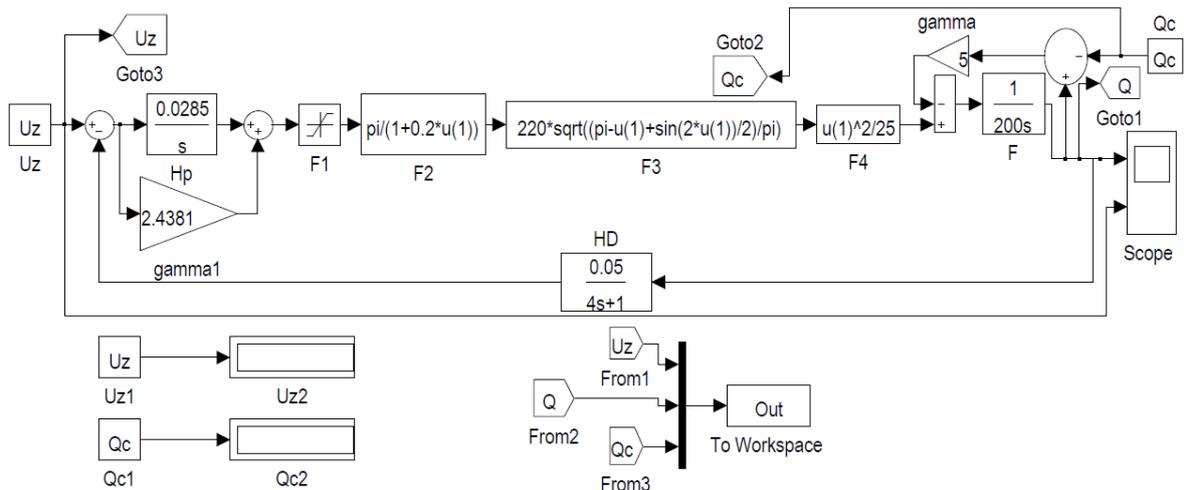


Рис. 1.26. Виртуальная модель для расчёта статистических характеристик

Листинг программы для построения зависимости температуры от напряжения задания при постоянной температуре внешней среды приведен ниже:

```

for k1=0:2:6;
    Qc=-40+12*k1; % температура внешней среды;
    for k=1:1:20;
        Uz=1*k; % напряжение задания;
        sim('temperatur'); % команда обращения к модели;
        A(k,1)=Out(1); % формирование массива данных величины Uz;
        A(k,2)=Out(2); % формирование массива данных величины  $\theta$ ;
        A(k,3)=Out(3); % формирование массива данных величины  $\theta_c$ ;
    end
    plot(A(1:k,1),A(1:k,2),'k'); % построение графиков;
    hold on % - обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее
    % окно, что позволяет добавлять последующие графики к уже существующим;
end
grid on % добавляет сетку к текущему графику;

```

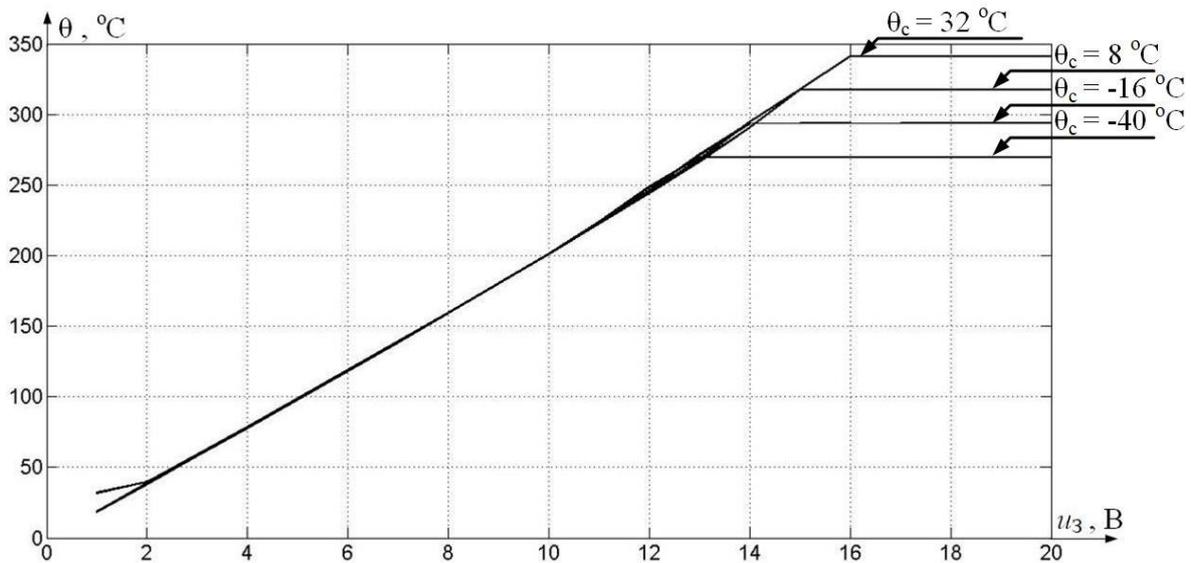


Рис. 1.27. Зависимость температуры от напряжения задания при постоянной температуре внешней среды

По зависимости температуры от напряжения задания при постоянной температуре внешней среды можно сделать вывод, что при увеличении напряжения задания, температура на выходе растёт до своего максимума, значение этого максимума зависит от температуры внешней среды, чем выше температуры внешней среды, тем будет больше максимальное значение выходной температуры.

Листинг программы для построения зависимости температуры от температуры внешней среды при постоянном напряжении задания приведен ниже:

```

for k1=1:1:3;
    Uz=4*k1; % напряжение задания;
    for k=1:1:40;
        Qc=-40+2*k; % температура внешней среды;
        sim('temperatur'); % команда обращения к модели;
        A(k,1)=Out(1); % формирование массива данных величины Uz;
        A(k,2)=Out(2); % формирование массива данных величины  $\theta$ ;
        A(k,3)=Out(3); % формирование массива данных величины  $\theta_c$ ;
    end
    plot(A(1:k,3),A(1:k,2),'k'); % построение графиков;

```

hold on % - обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно, что позволяет добавлять последующие графики к уже существующим;

end

grid on % добавляет сетку к текущему графику;

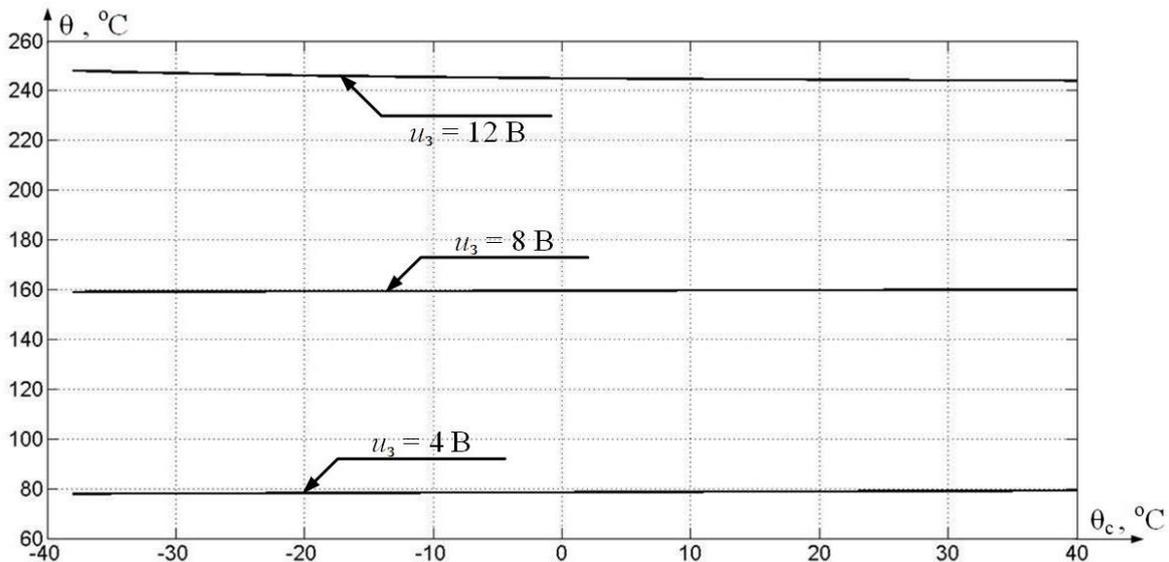


Рис. 1.28. Зависимость температуры от температуры внешней среды при постоянном напряжении задания

По зависимости температуры от температуры внешней среды при постоянном напряжении задания, можно сказать, что выходная температура сильно зависит от напряжения задания, а температура внешней среды практически не влияет.

Для получения динамических характеристик, проведем линейный анализ системы.

На рисунке 1.29 представлена виртуальная модель системы автоматического регулирования температуры.

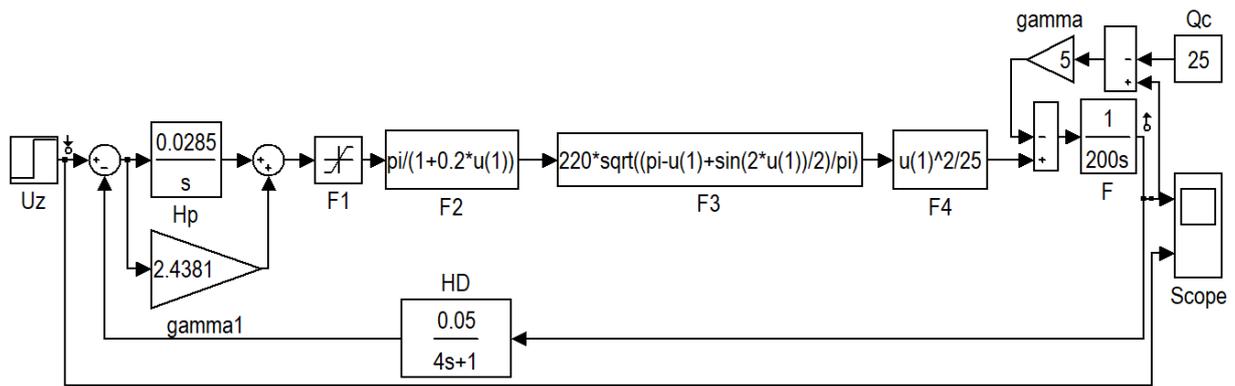


Рис. 1.29. Виртуальная модель системы автоматического регулирования температуры

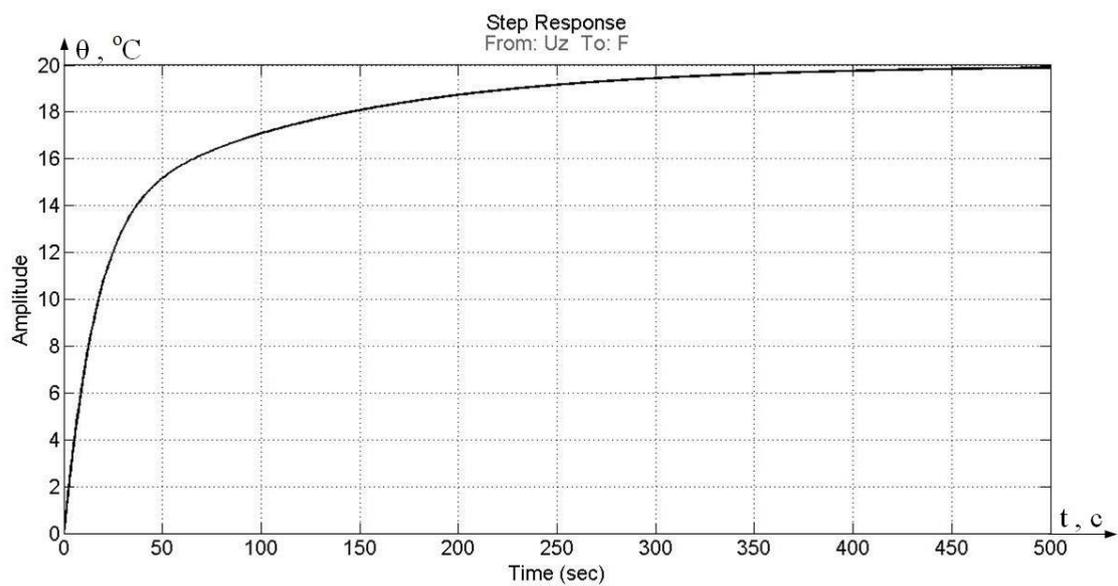


Рис. 1.30. Переходная характеристика системы автоматического регулирования температуры

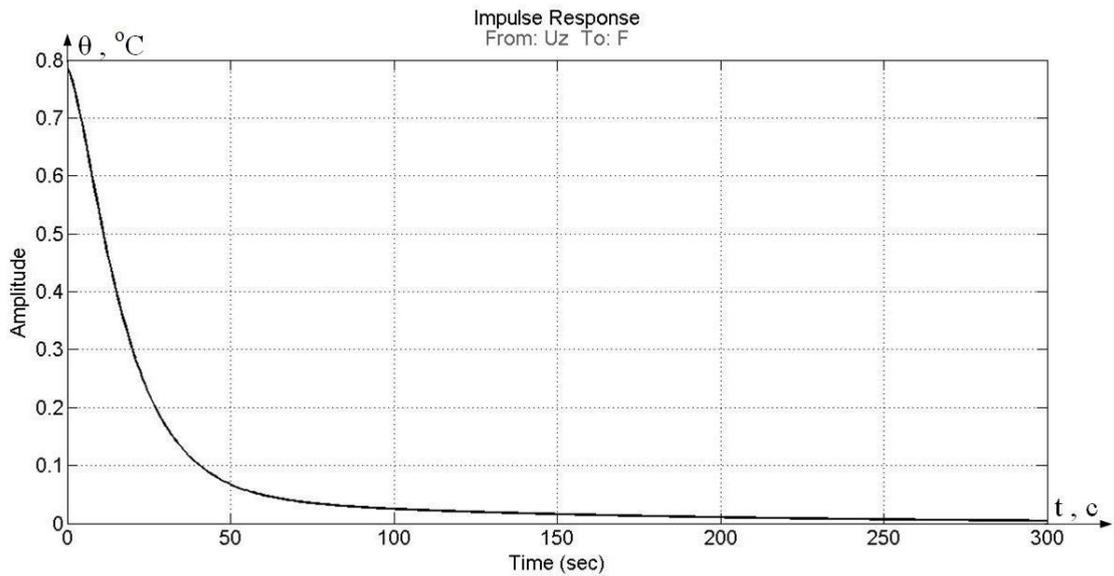


Рис. 1.31. Импульсная переходная характеристика системы автоматического регулирования температуры

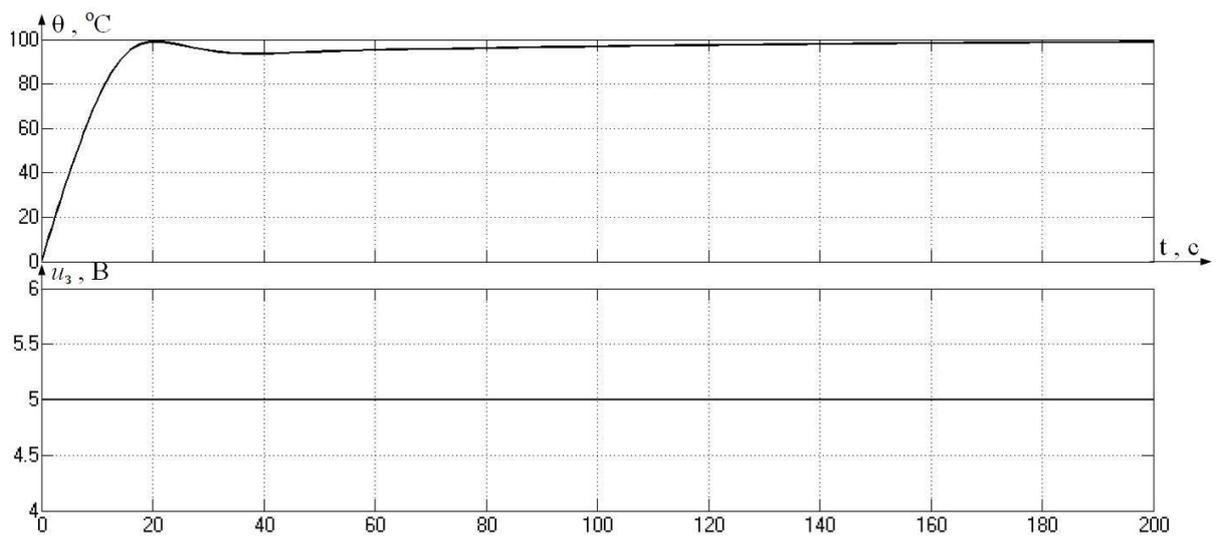


Рис. 1.32. Характеристика изменения температуры при $u_3 = 5$ В

Исследуем, как будет меняться выходная величина, при разных постоянных значениях температуры внешней среды и напряжения задания.

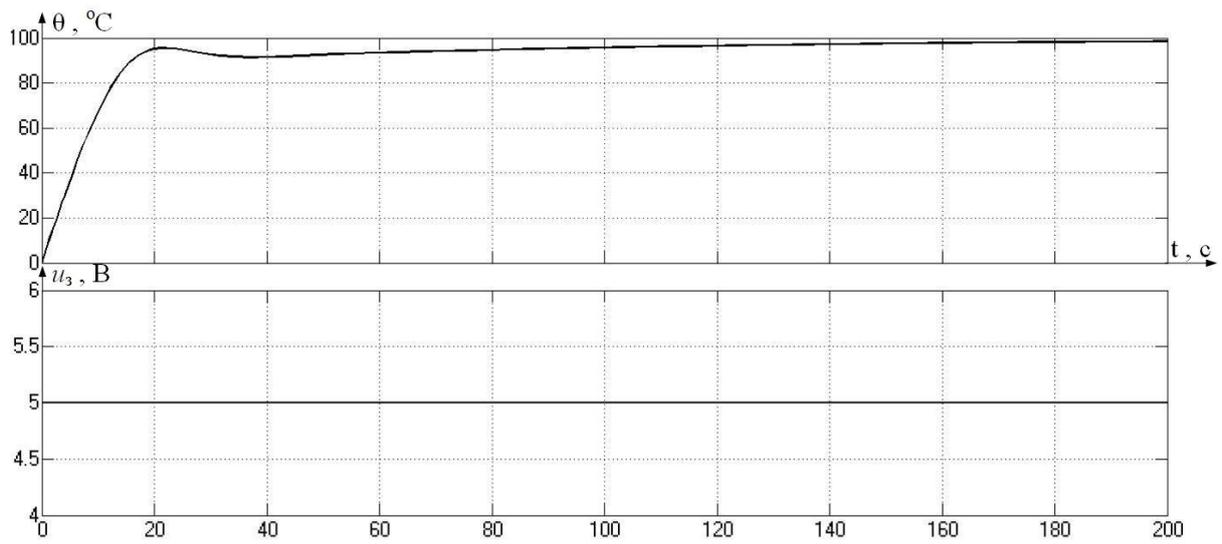


Рис. 1.33. Характеристика температуры при $Q_c = 0$ °C и $u_3 = 5$ В

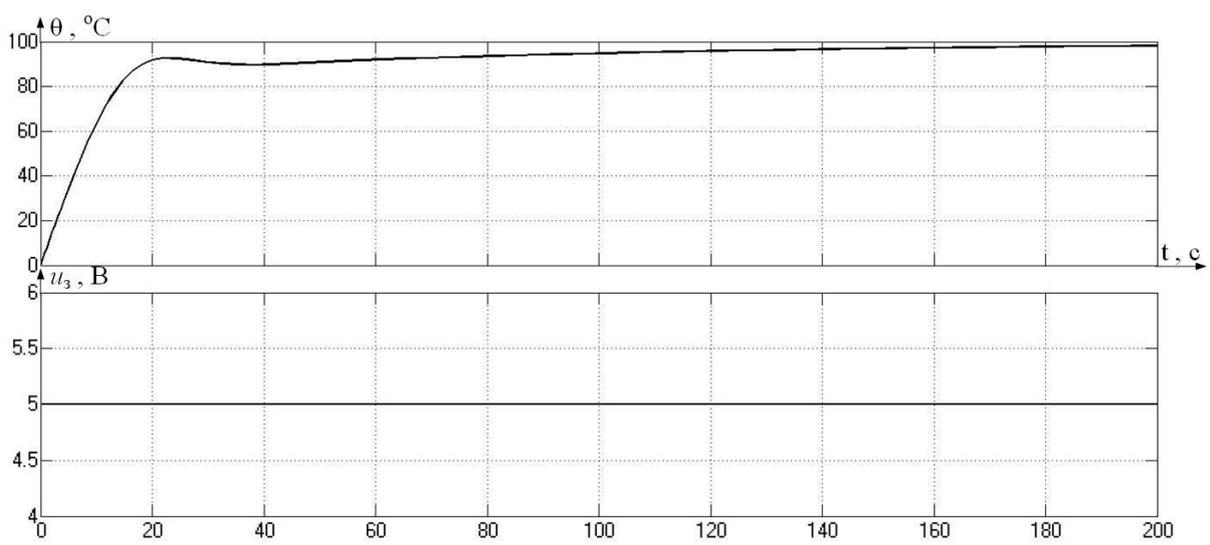


Рис. 1.34. Характеристика температуры при $Q_c = -20$ °C и $u_3 = 5$ В

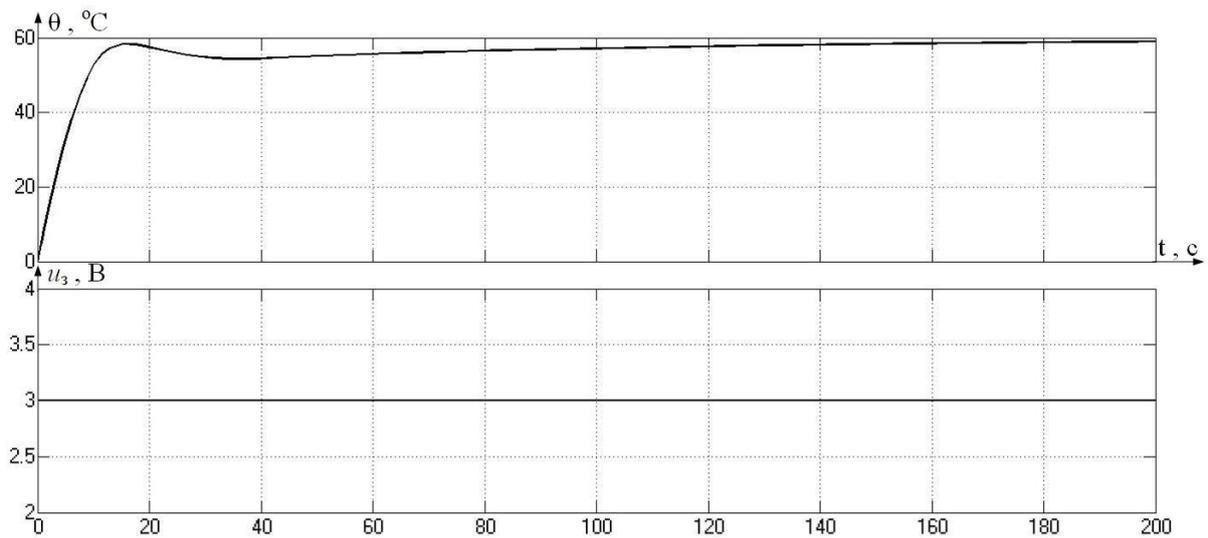


Рис. 1.35. Характеристика температуры при $Q_c = 25$ °C и $u_3 = 3$ В

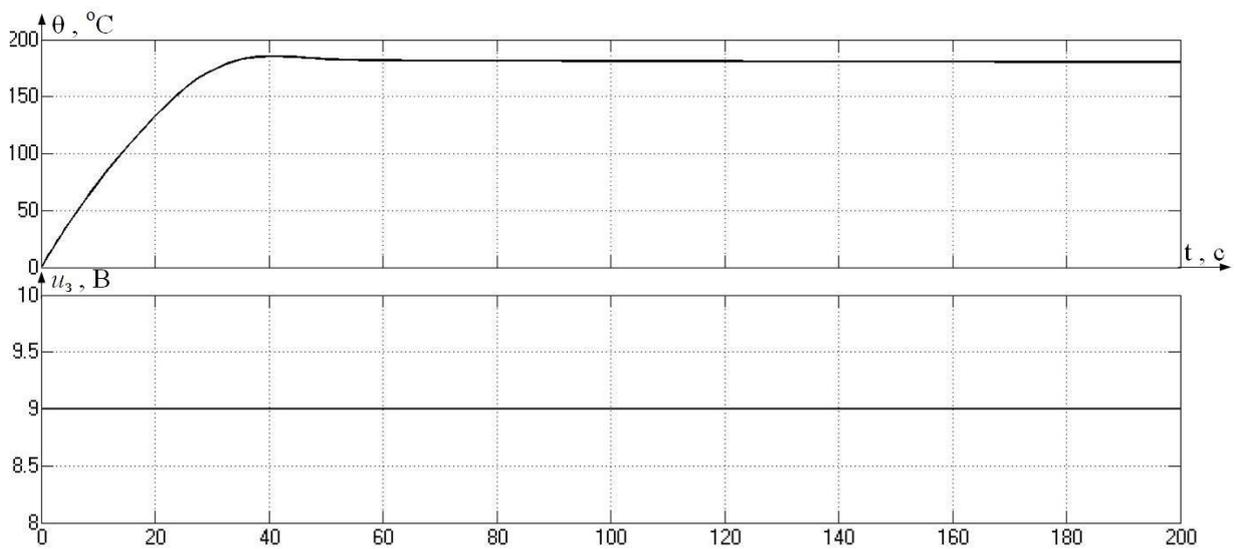


Рис. 1.36. Характеристика температуры при $Q_c = 25$ °C и $u_3 = 9$ В

Рассмотрим определение передаточных функций. Для получения передаточной функции по задающему воздействию, необходимо установить входную точку со стороны напряжения задания, а выходную точку со стороны температуры.

На рисунке 1.37 представлена виртуальная модель для получения передаточной функции по задающему воздействию.

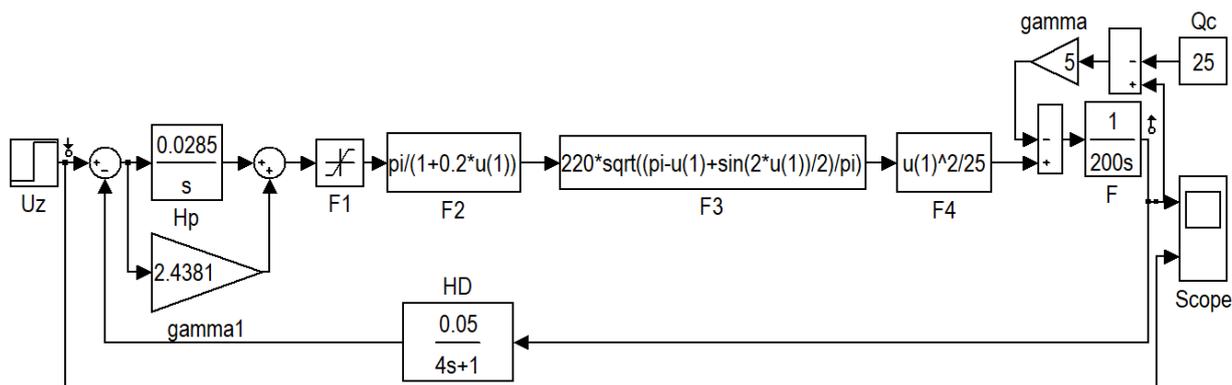


Рис. 1.37. Виртуальная модель системы для получения передаточной функции по задающему воздействию

Передаточная функция по задающему воздействию:

$$H_{u_3}^{\theta}(s) = \frac{0,7867 * s^2 + 0,2059 * s + 0,002299}{s^3 + 0,275 * s^2 + 0,01608 * s + 0,000115}$$

Для получения передаточной функции разомкнутой системы, необходимо разомкнуть систему и установить входную точку со стороны напряжения задания, а выходную точку со стороны обратной связи после датчика.

На рисунке 1.38 представлена виртуальная модель для получения передаточной функции разомкнутой системы.

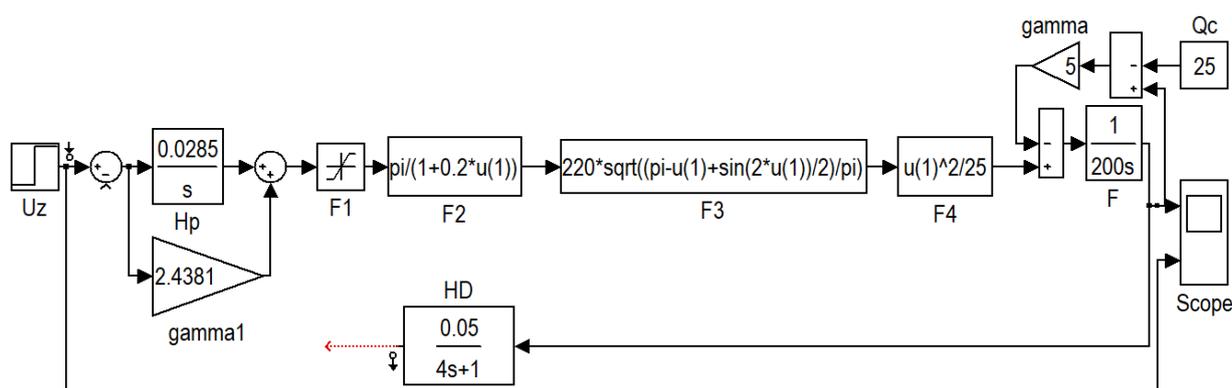


Рис. 1.38. Виртуальная модель для получения передаточной функции разомкнутой системы

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$H_{u_3}^{u_d}(s) = \frac{0,009834 * s + 0,000115}{s^3 + 0,275 * s^2 + 0,00625 * s}$$

Для получения передаточной функции по ошибке, необходимо установить входную точку со стороны напряжения задания, а выходную точку после элемента сравнения.

На рисунке 1.39 представлена виртуальная модель для получения передаточной функции по ошибке.

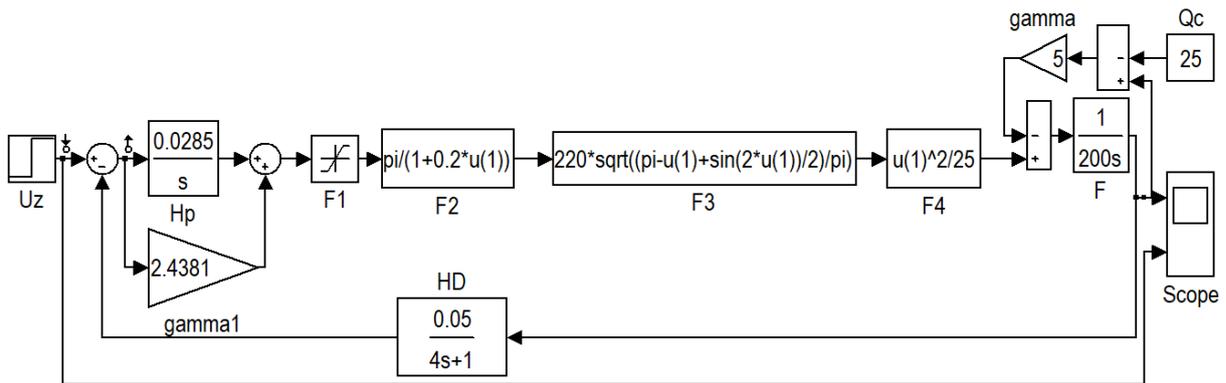


Рис. 1.39. Виртуальная модель для получения передаточной функции по ошибке

Передаточная функция по ошибке:

$$H_{u_3}^{\varepsilon}(s) = \frac{s^3 + 0,275 * s^2 + 0,00625 * s}{s^3 + 0,275 * s^2 + 0,01608 * s + 0,000115}$$

Для получения передаточной функции по возмущающему воздействию, необходимо установить входную точку со стороны температуры внешней среды, а выходную точку со стороны температуры.

На рисунке 1.40 представлена виртуальная модель для получения передаточной функции по возмущающему воздействию.

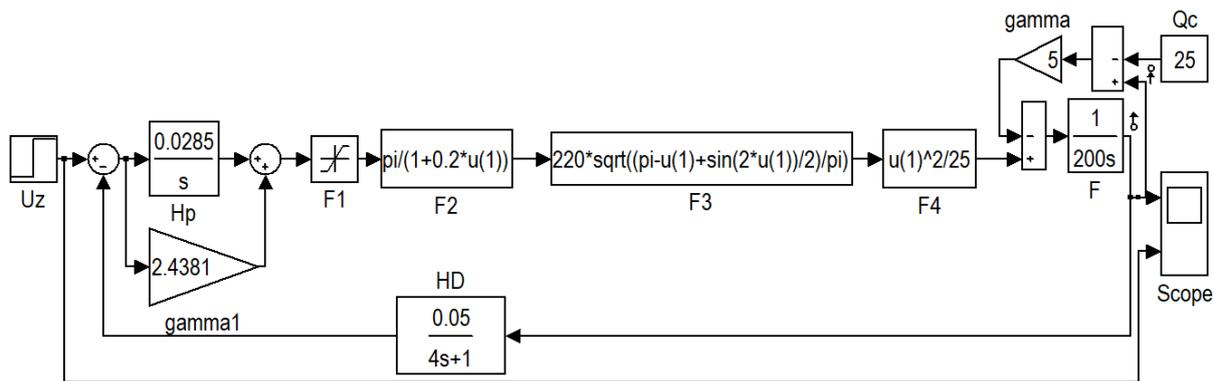


Рис. 1.40. Виртуальная модель для получения передаточной функции по возмущающему воздействию

Передаточная функция по возмущающему воздействию:

$$H_{\theta_c}^{\theta}(s) = \frac{0,025 * s^2 + 0,00625 * s}{s^3 + 0,275 * s^2 + 0,01608 * s + 0,000115}$$

Рассмотрим исследование устойчивости замкнутой системы по критерию Найквиста [4].

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$H_{u_3}^{u_d}(s) = \frac{0,009834 * s + 0,000115}{s^3 + 0,275 * s^2 + 0,00625 * s}$$

Составим характеристическое уравнение и найдём его корни:

$$A(s) = s^3 + 0,275 * s^2 + 0,00625 * s$$

Корни характеристического уравнения:

$$s_1=0$$

$$s_2=-0,2500$$

$$s_3=-0,0250$$

Система содержит интегрирующее звено.

В таких астатических системах [4] для удобства оценки устойчивости АФЧХ разомкнутой системы дополняют дугой бесконечного ра-

диуса, начинающейся на положительной вещественной полуоси комплексной плоскости. Формулировка критерия устойчивости при этом не изменяется.

Для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы годограф разомкнутой системы не охватывала точку с координатами $(-1; j0)$. [4]

На рисунке 1.41 представлен годограф разомкнутой системы, по которому можно сделать вывод, что замкнутая система устойчива, т.к. годограф не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$.

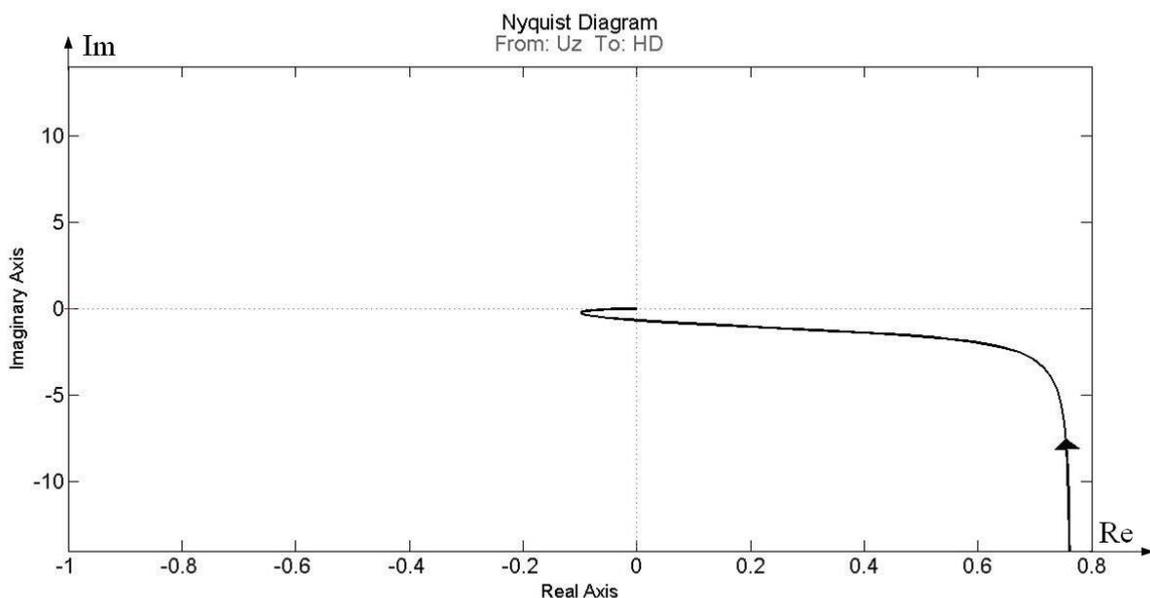


Рис. 1.41. Годограф разомкнутой системы

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$H_{u_3}^{\theta}(s) = \frac{0,7867 * s^2 + 0,2059 * s + 0,002299}{s^3 + 0,275 * s^2 + 0,01608 * s + 0,000115}$$

Составим характеристическое уравнение:

$$A(s) = s^3 + 0,275 * s^2 + 0,01608 * s + 0,000115$$

Найдем корни:

```
>> A=[1 0.275 0.01608 0.000115];
```

```
>> roots(A)
```

```
ans =
```

```
-0.1959
```

-0.0708

-0.0083

Замкнутая система устойчива.

Произведём исследование системы при действии различных сигналов, как со стороны температуры внешней среды, так и со стороны напряжения задания.

Для начала будем подавать случайную температуру внешней среды в диапазоне $-25 \dots 25$ °C.

На рисунке 1.42 представлена виртуальная модель для исследования процессов системы при подаче случайной температуры внешней среды.

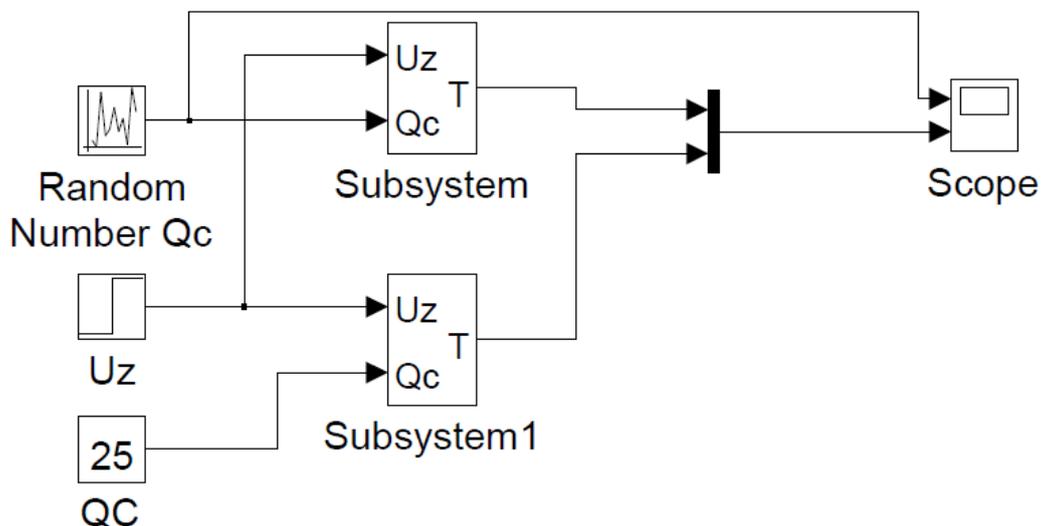


Рис. 1.42 Виртуальная модель для исследования процессов системы при подаче случайной температуры внешней среды

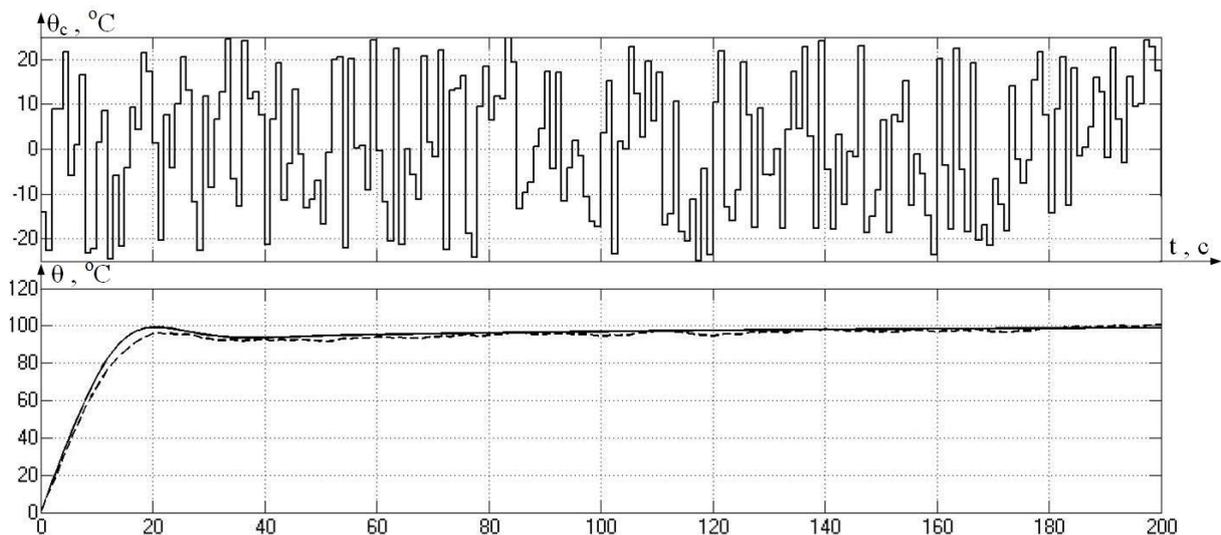


Рис. 1.43. Характеристика влияния внешней среды на величину регулируемой температуры

Рассмотрим, как напряжение питающей сети будет влиять на процесс регулирования температуры.

Для исследования будем использовать напряжения питающей сети 200, 220 и 250 вольт.

На рисунке 1.44 представлена виртуальная модель для исследования процессов системы при подаче различного напряжения питающей сети.

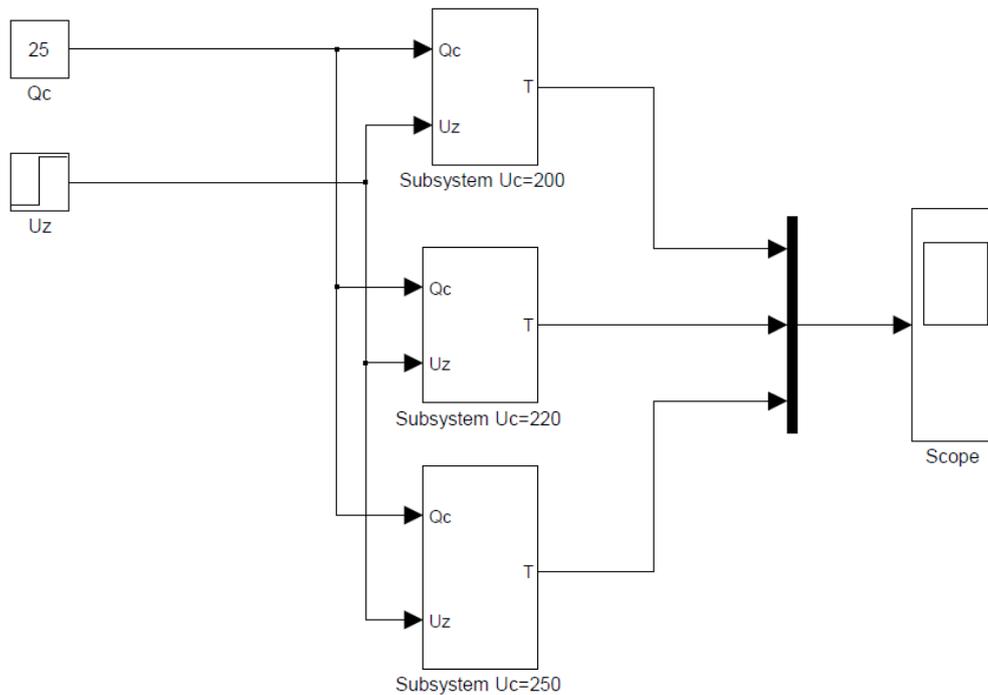


Рис. 1.44. Виртуальная модель для исследования процессов системы при изменении напряжения питающей сети

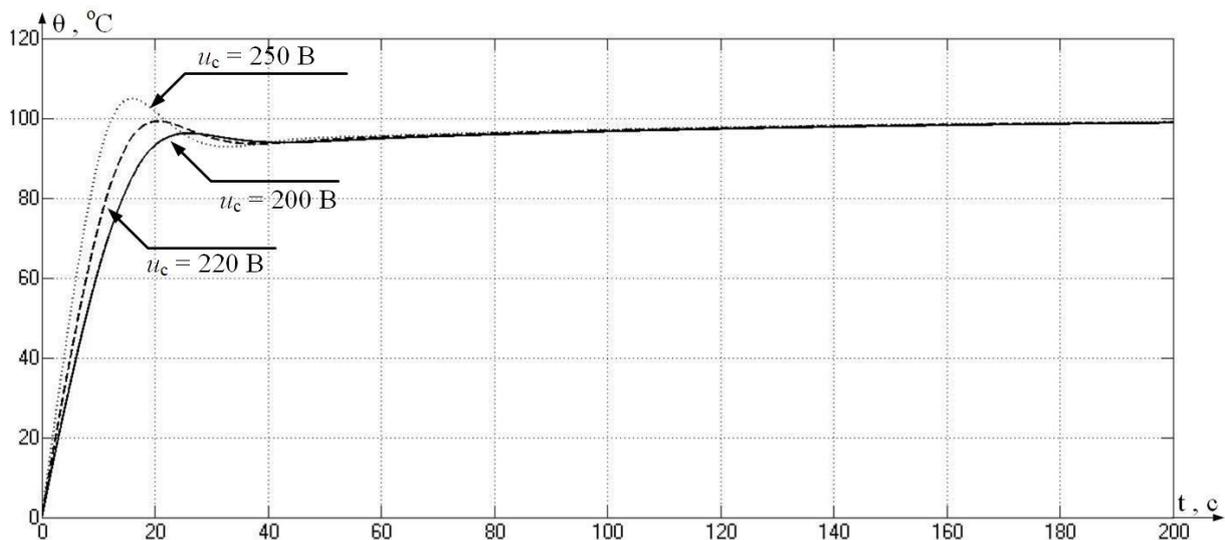


Рис. 1.45. Характеристики температур при подачи различных напряжений питающей сети

Исходя из полученной характеристик, можно сделать вывод, что при увеличении напряжения питающей сети, увеличивается величина перерегулирования, но далее выходные сигналы начинают совпадать.

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры использования системы автоматического регулирования температуры в промышленности.
2. Как изменится быстродействие системы при изменении напряжения питающей сети?
3. Как изменятся свойства системы, если учитывать запаздывание в датчике температуры?

Практическое занятие 2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩИМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Следящая система является устройством, которое устанавливает положение объекта в соответствии с произвольно изменяющимся сигналом, обладающим весьма незначительной мощностью. Ее действие зависит от разности между действительным положением объекта и его желаемым положением. На рисунке 2.1 приведена функциональная схема следящего электропривода, на которой отображены основные элементы и узлы. [1]

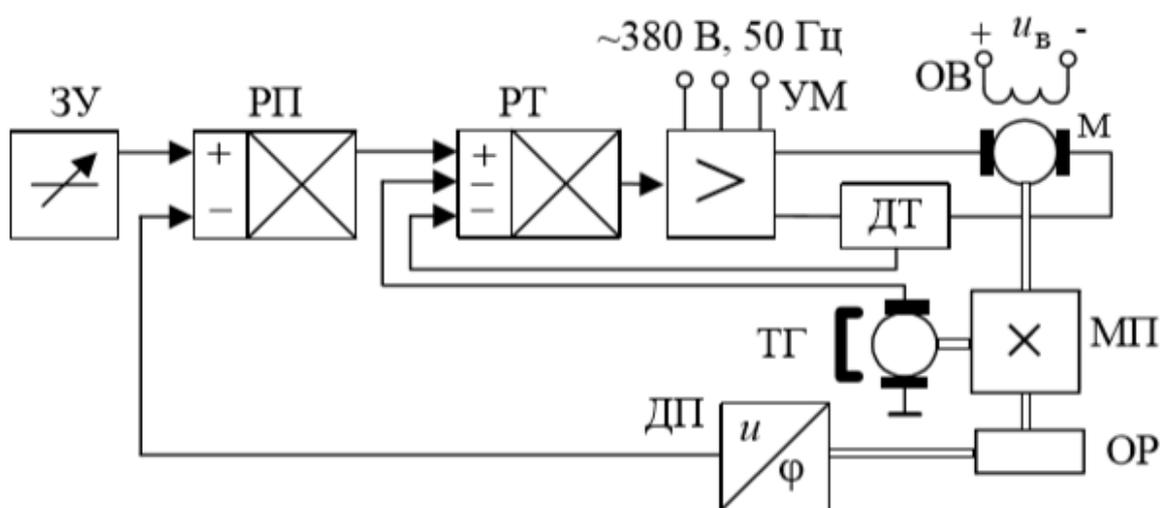


Рис. 2.1. Функциональная схема следящего электропривода

На схеме рис.2.1 обозначено:
 ЗУ – задающее устройство;
 РП – регулятор положения;
 РТ – регулятор тока;
 УМ – усилитель мощности;
 М – двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ОВ – обмотка возбуждения, u_v - напряжение питания обмотки возбуждения);
 ДТ – датчик тока;
 МП – механическая передача;
 ТГ – тахогенератор;
 ОР – объект регулирования;
 ДП – датчик положения.

Структурная схема следящего электропривода представлена на рис. 2.2.

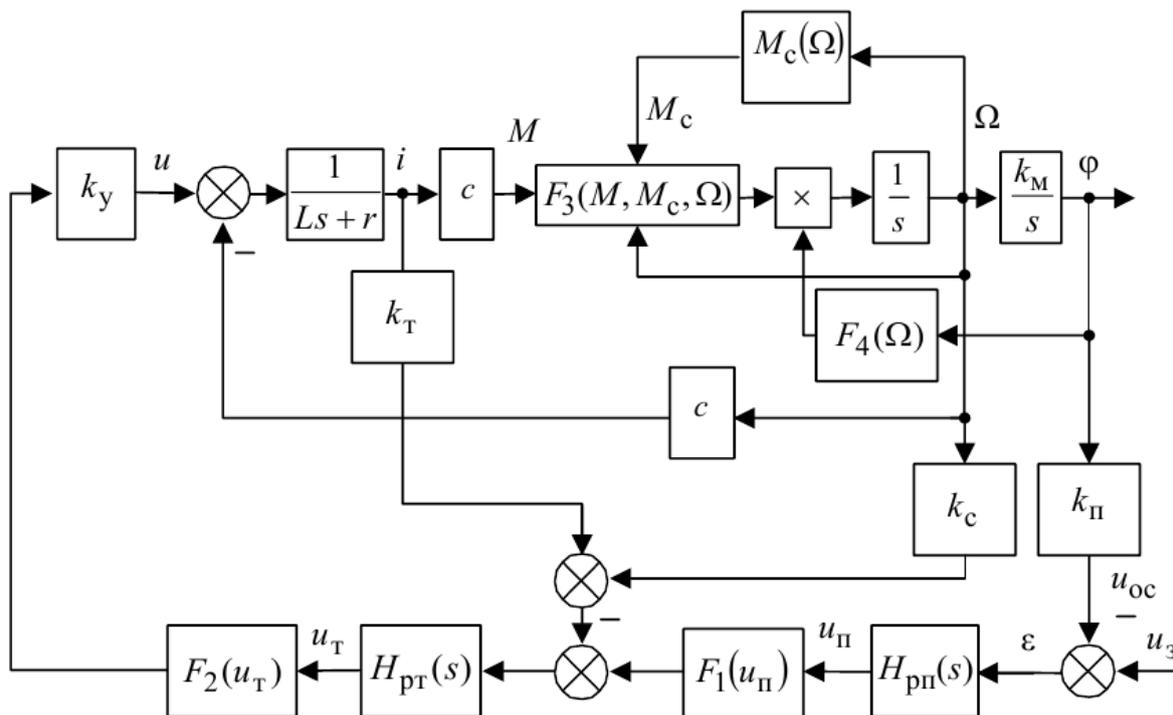


Рис. 2.2. Структурная схема следящего электропривода

$k_{рп}, T_{рп}$ - коэффициент передачи и постоянная времени регулятора положения;
 $u_{п}$ - выходной сигнал регулятора положения;

$F_1(u_{\text{п}})$ - нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора скорости;

$$F_1(u_{\text{п}}) = \begin{cases} u_{\text{п}} & \text{при } |u_{\text{п}}| \leq u_{\text{м}}; \\ -u_{\text{м}} & \text{при } u_{\text{п}} \leq -u_{\text{м}}; \\ +u_{\text{м}} & \text{при } u_{\text{п}} \geq u_{\text{м}}; \end{cases}$$

$u_{\text{м}}$ - максимальное значение выходного сигнала регулятора скорости

$$u_{\text{м}} = 10\text{В};$$

$H_{\text{ПТ}}(s)$ - передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора тока;

$F_2(u_{\text{т}})$ - нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора тока;

$$F_2(u_{\text{т}}) = \begin{cases} u_{\text{п}} & \text{при } |u_{\text{т}}| \leq u_{\text{м}}; \\ -u_{\text{м}} & \text{при } u_{\text{т}} \leq -u_{\text{м}}; \\ +u_{\text{м}} & \text{при } u_{\text{т}} \geq u_{\text{м}}; \end{cases}$$

$k_{\text{у}}$ - коэффициент передачи усилителя мощности;

u - выходное напряжение усилителя мощности;

r, L - активное сопротивление и индуктивность якорной обмотки двигателя;

i - ток якорной обмотки;

c - конструктивная постоянная двигателя;

M - электромагнитный момент двигателя;

$M_{\text{с}}$ - статический момент сопротивления нагрузки;

$k_{\text{т}}$ - коэффициент передачи датчика тока;

$k_{\text{с}}$ - коэффициент передачи датчика скорости;

$k_{\text{п}}$ - коэффициент передачи датчика положения;

$F_3(M, M_{\text{с}}, \Omega)$ - нелинейная характеристика, моделирующая механическое движение объекта регулирования под действием электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления нагрузки;

$$F_3(M, M_{\text{с}}, \Omega) = \begin{cases} M - M_{\text{с}} & \text{при } \Omega \neq 0; \\ 0 & \text{при } |M| < |M_{\text{с}}| < 0 \text{ и } \Omega \neq 0; \end{cases}$$

Ω - угловая скорость вращения вала двигателя;

$M_c(\Omega)$ - - нелинейная зависимость момента сопротивления от скорости;

$$M_c(\Omega) = M_0 \operatorname{sgn} \Omega ;$$

k_M - коэффициент передачи редуктора;

M_0 - значение статического момента нагрузки;

ϕ - угол поворота;

$F_4(\phi)$ - нелинейная зависимость момента инерции нагрузки от угла поворота;

$$F_4(\phi) = \frac{1}{J(1 + \alpha \sin \phi)} ;$$

J - момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя;

α - коэффициент пропорциональности.

Построение математической модели основано на формализации описания системы, которое может быть выполнено различными способами. По функциональной и структурной схемам, приведенным выше разработаем модель следящей системы в среде Matlab (рис 2.3).

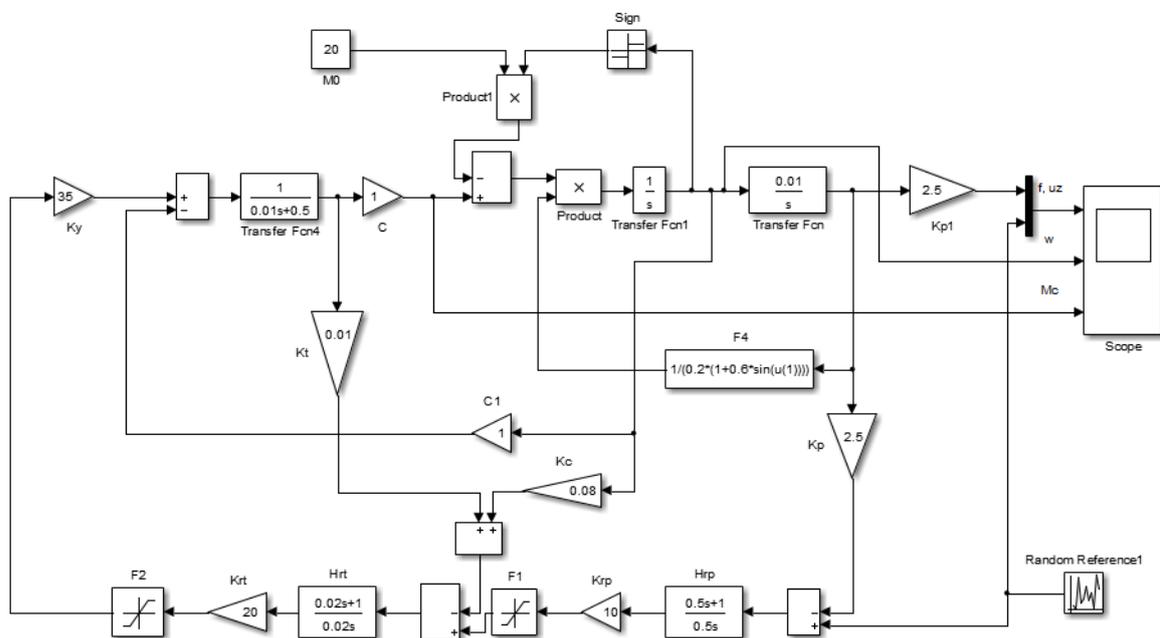


Рис. 2.3. Модель следящей системы в среде Matlab

В данной схеме были реализованы все узлы следящей системы при помощи Simulink [2].

Рассмотрим некоторые блоки модели:

Блок F1 является ограничителем, максимальные значения в нашем случае ± 10 .

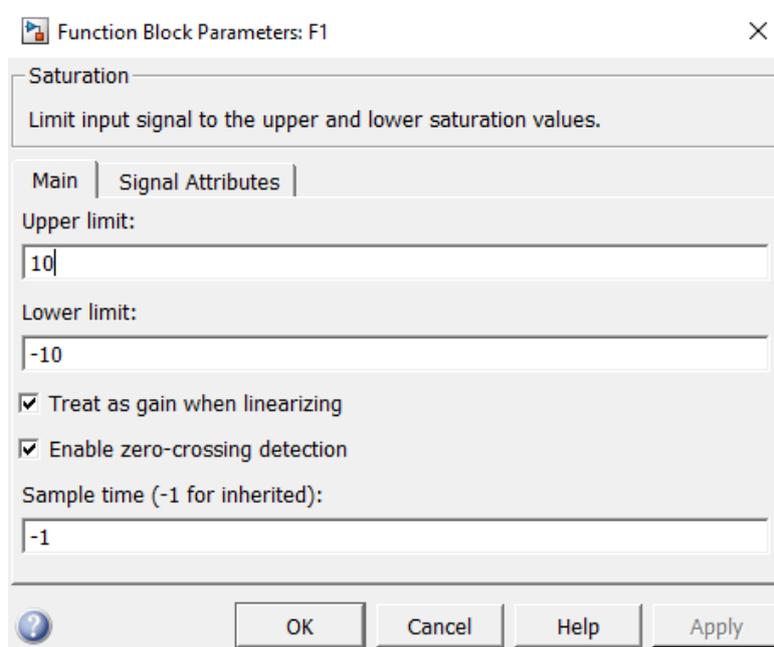


Рис. 2.4. Настройка блока F1

Блок F2 настраиваем аналогичен блоку F1.

Блок Sign:

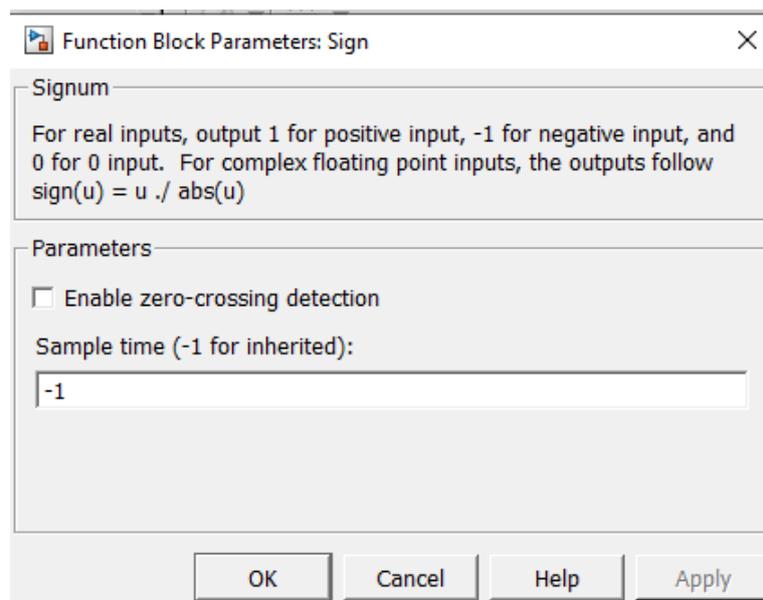


Рис. 2.5. Настройка блока Sign

После запуска моделирования при задании случайного входного сигнала (U_z) были получены следующие характеристики:

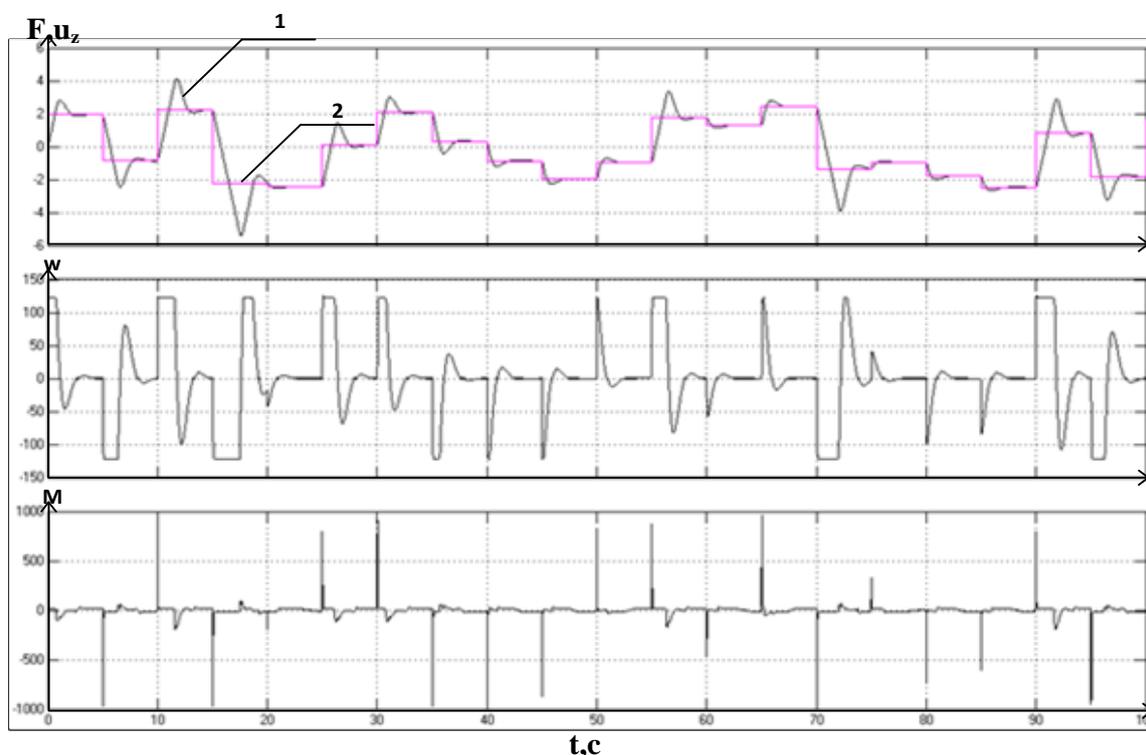


Рис. 2.6. Характеристики системы при случайном задающем воздействии (1- выходной сигнал, 2 – входной сигнал)

Как видно из этих характеристик, при задании случайного воздействия система обрабатывает изменение сигнала с перерегулированием.

Рассмотрим влияние момента сопротивления M_0 (возмущающего воздействия) на выходные характеристики системы.

Установим $M_0=0$ Нм. Построим характеристики:

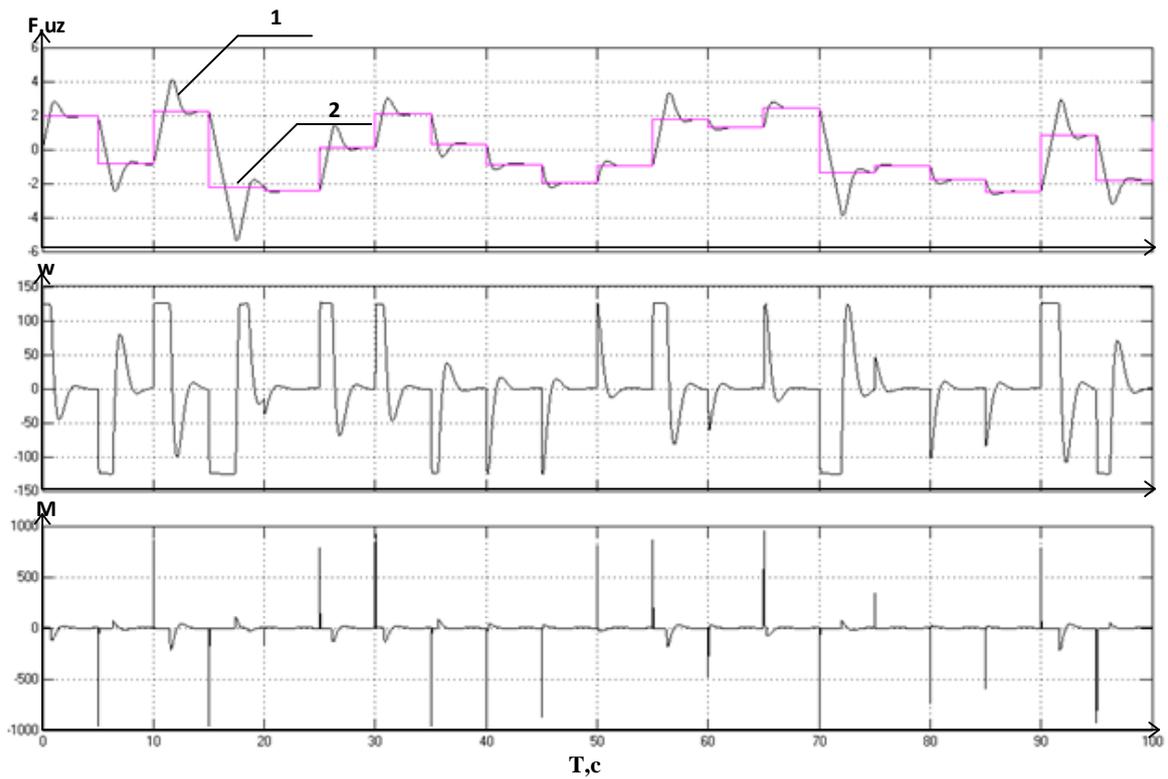


Рис. 2.7. Характеристики системы при случайном задающем воздействии ($M_0=0$ Н/м, 1- выходной сигнал, 2 – входной сигнал)

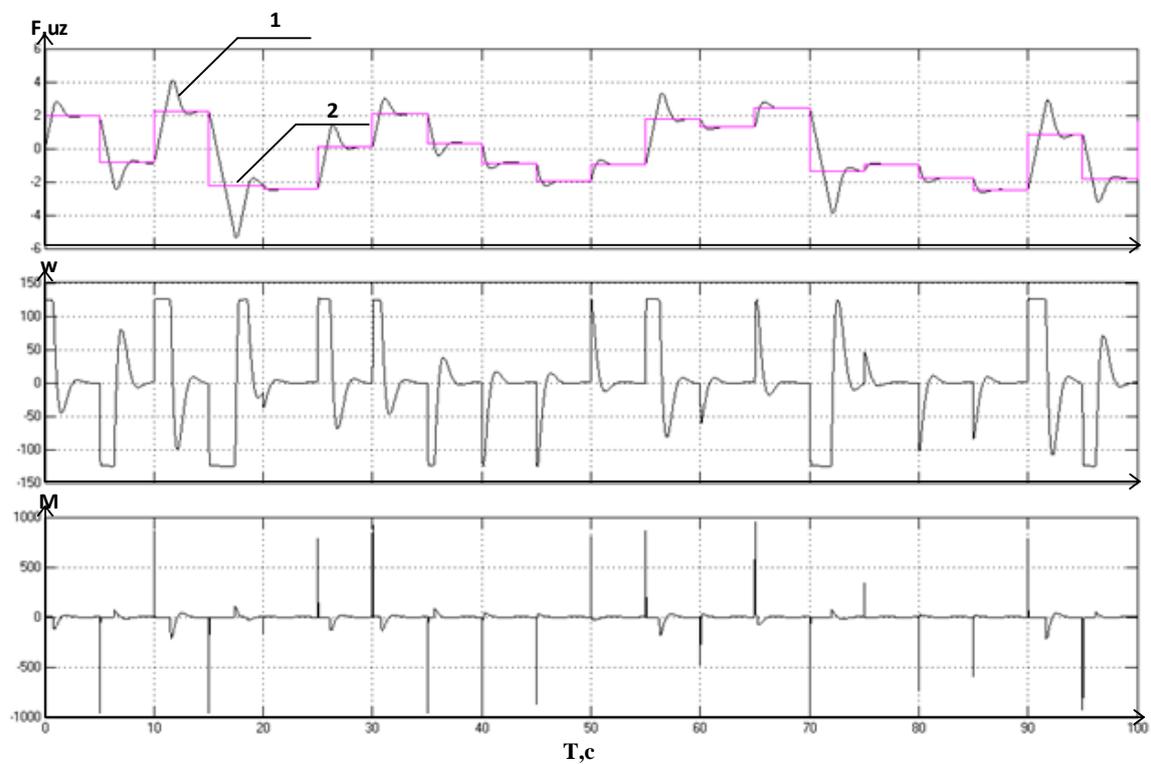


Рис. 2.8. Характеристики системы при случайном задающем воздействии ($M_0=10$ Н/м, 1- выходной сигнал, 2 – входной сигнал)

Проведем исследование системы при изменении возмущающего воздействия случайным образом. С этой целью установим входной сигнал постоянным, а на вход возмущающего воздействия подадим сигнал, изменяющийся случайным образом, как показано на рисунке 2.9:

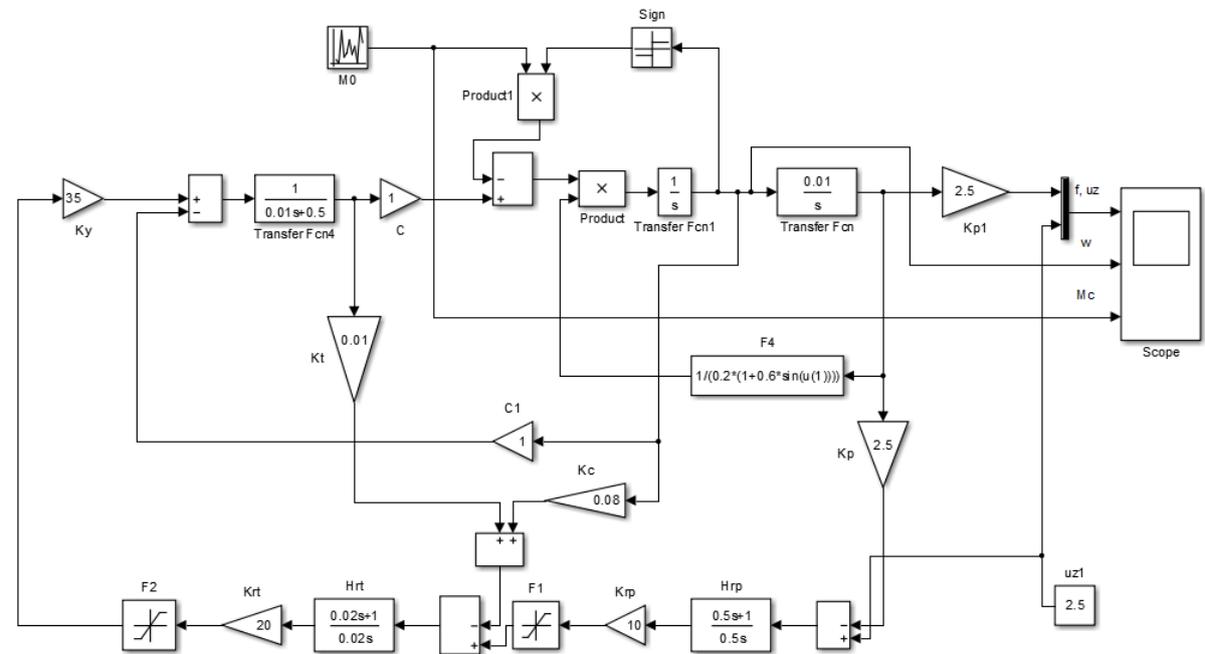


Рис. 2.9. Модель системы при случайно изменяющемся моменте нагрузки

Ниже приведены характеристики системы при случайном моменте сопротивления и постоянном входном сигнале:

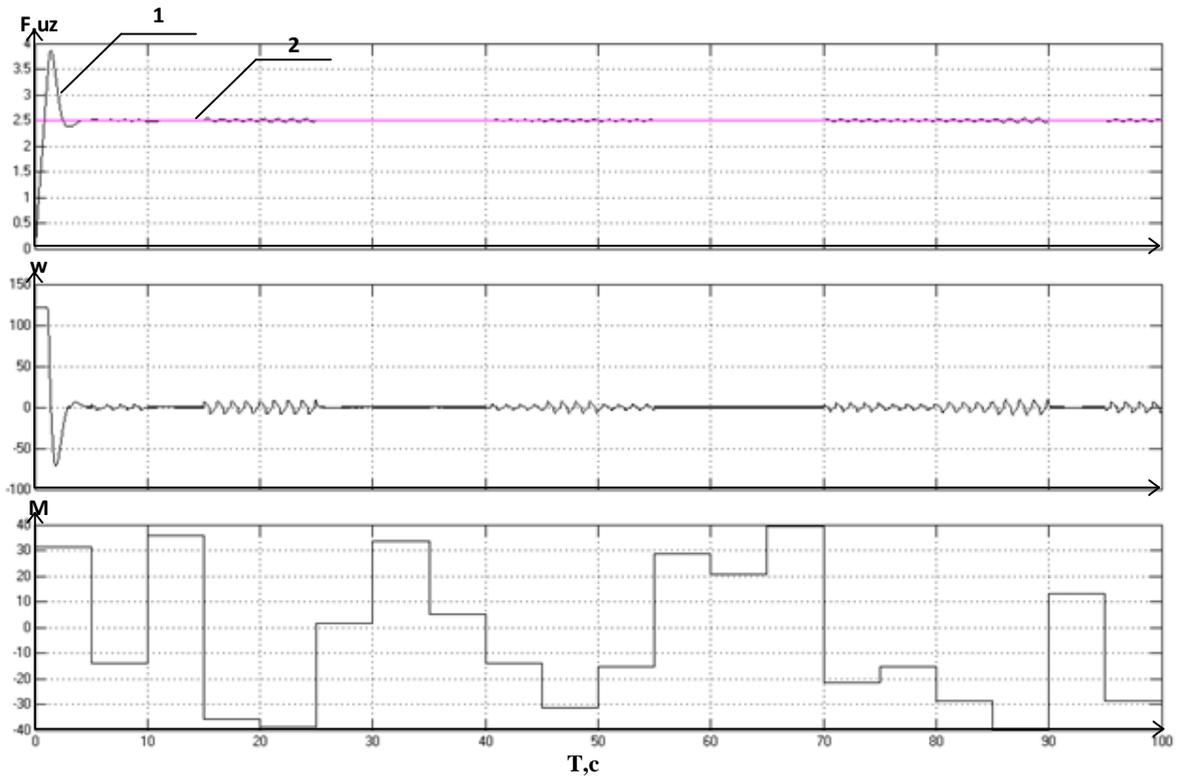


Рис. 2.10. Характеристики системы при случайном моменте сопротивления и постоянном входном сигнале (1- выходной сигнал, 2 – входной сигнал)

Увеличим фрагмент между 10 и 20 секундами (рис. 2.10) по оси y для того, чтобы показать, как система обрабатывает:

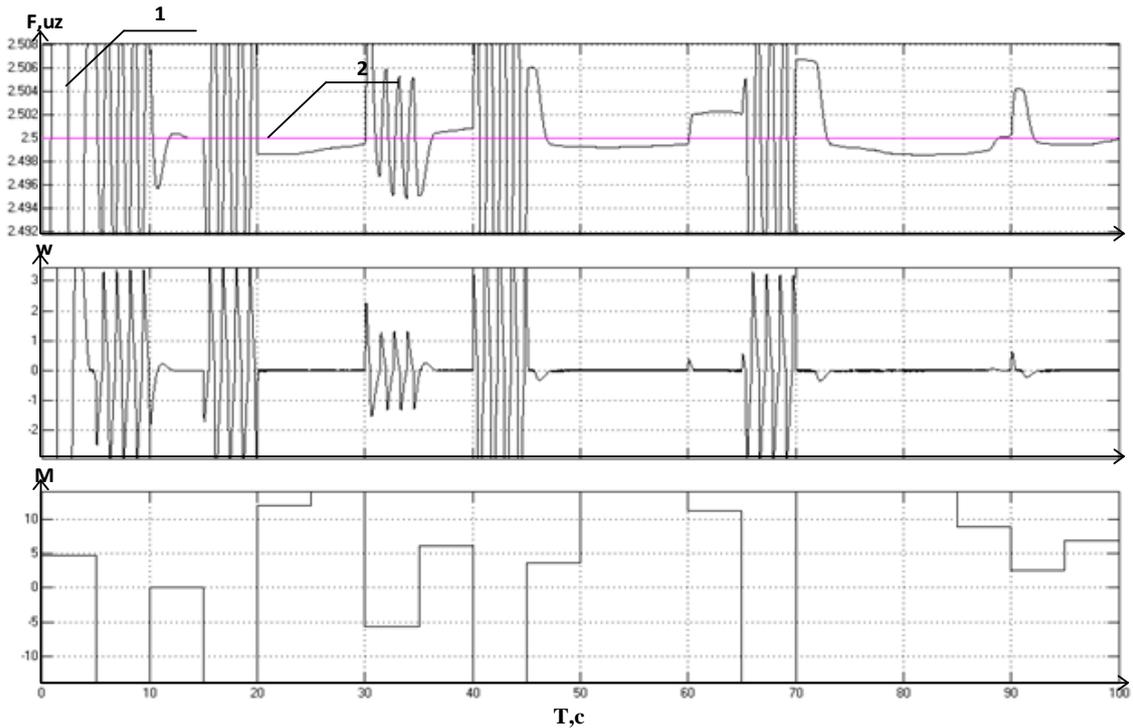


Рис. 2.11. Увеличенные характеристики системы при случайном моменте сопротивления и постоянном входном сигнале (1- выходной сигнал, 2 – входной сигнал)

Рассмотрим расчет логарифмических и частотных характеристик. Для расчета и построения ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы данной модели необходимо разомкнуть обратную связь, для чего схема была преобразована следующим образом, также определили вход и выход:

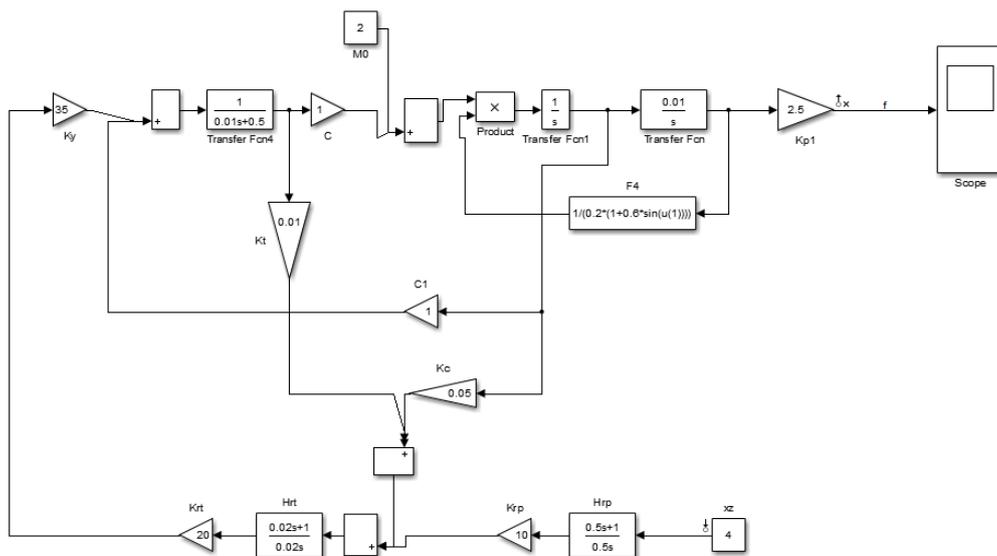


Рис. 2.12. Модель разомкнутой системы

Для построения логарифмических характеристик воспользуемся функцией «Linear Analysis» [2]. В результате выполнения этой команды были получены следующие характеристики:

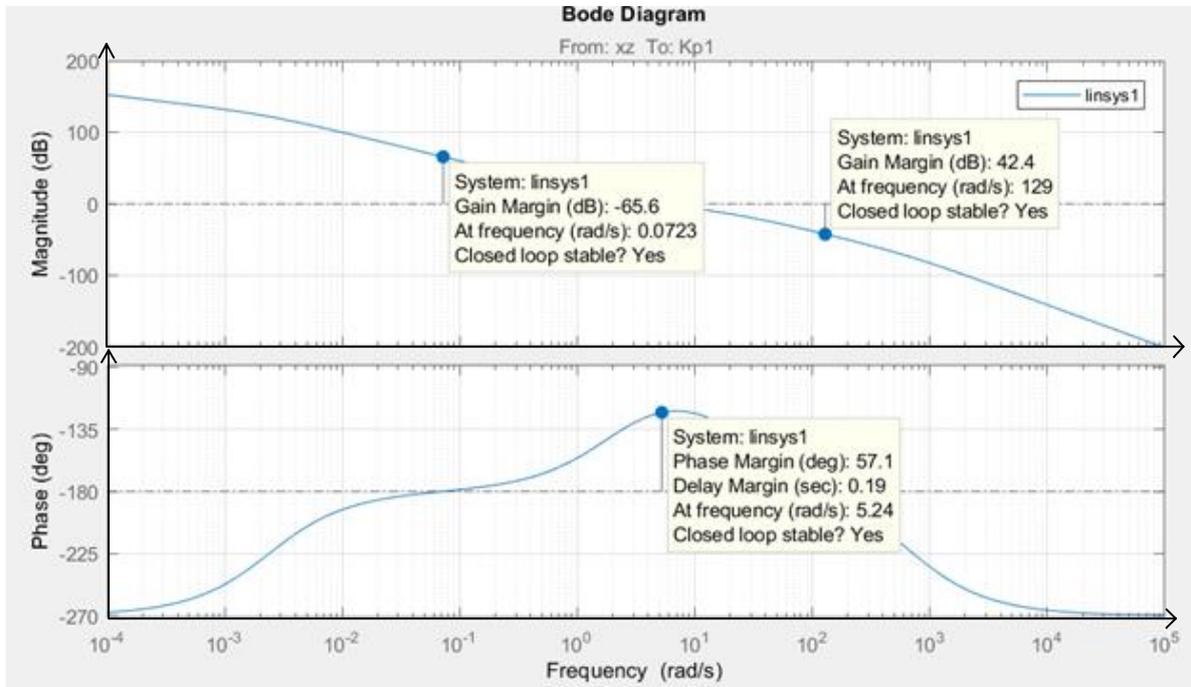


Рис. 2.13. Логарифмические характеристики разомкнутой системы

Рассмотрим моделирование системы при разных формах входного сигнала. Пусть сигнал задания изменяется по линейному закону. При моделировании этого процесса будем использовать следующий закон:

$$u_3(t) = 0,1 t$$

В качестве блока реализующего входное воздействие используем блок «Ramr» и запишем в него приведенную выше функцию:

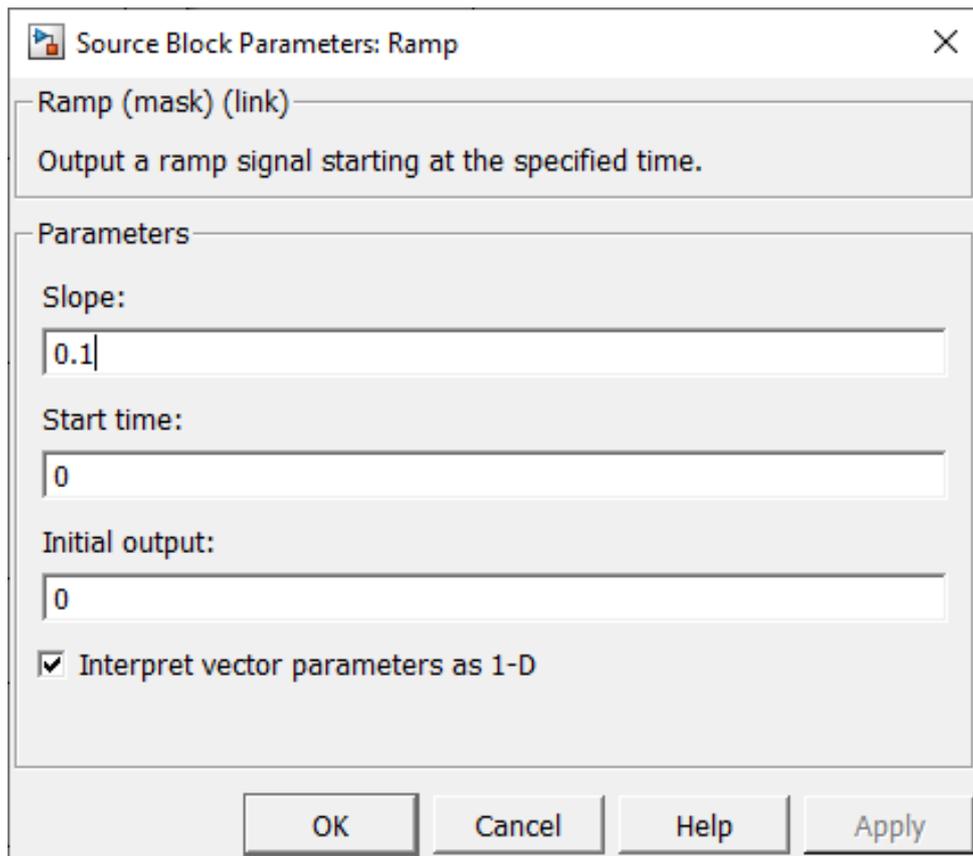


Рис. 2.14. Блок задания линейного воздействия

В результате получим следующую схему:

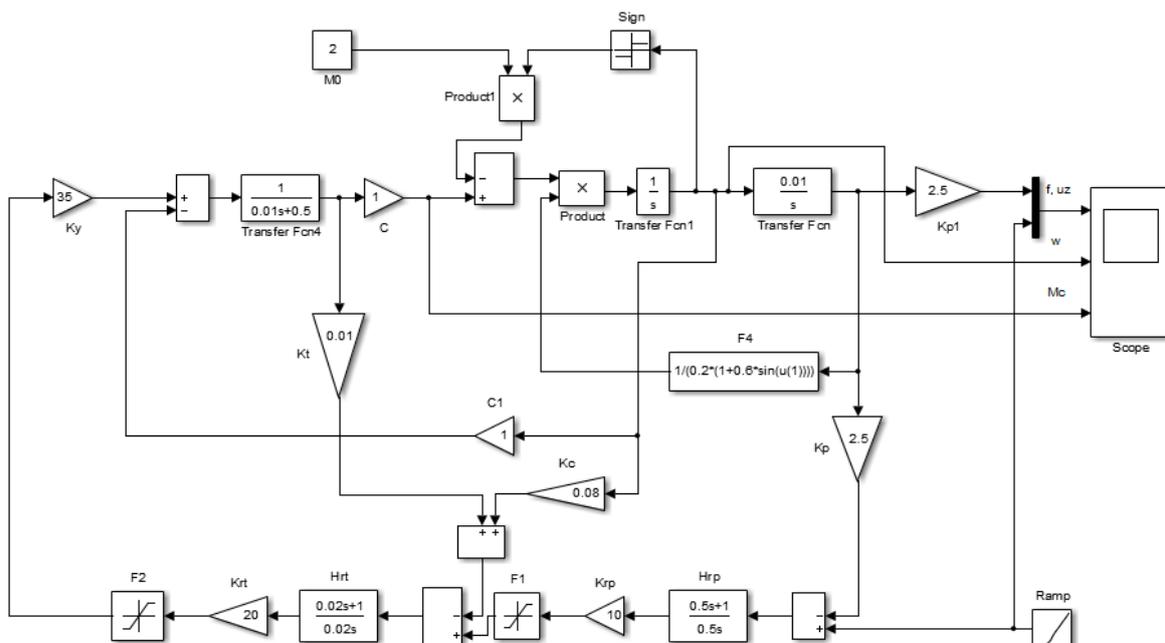


Рис. 2.15. Модель для анализа воздействия линейно возрастающего сигнала

Результат моделирования системы с линейно изменяющимся входным сигналом представлен на рис 2.16:

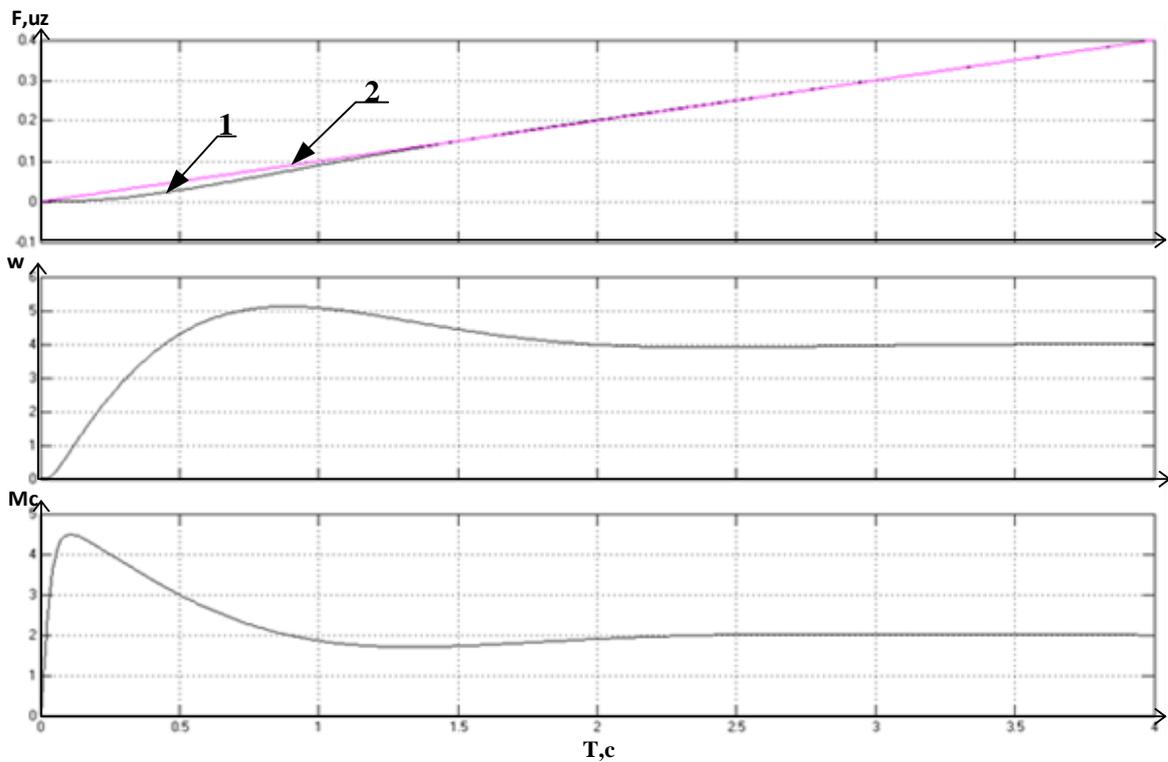


Рис. 2.16. Характеристики системы при сигнале задания, изменяющемся линейно (1- выходной сигнал, 2 – входной сигнал)

Изменим закон, по которому изменяется задающий сигнал:
 $u_3(t) = 0,5 t$

Построим характеристики с измененным задающим сигналом:

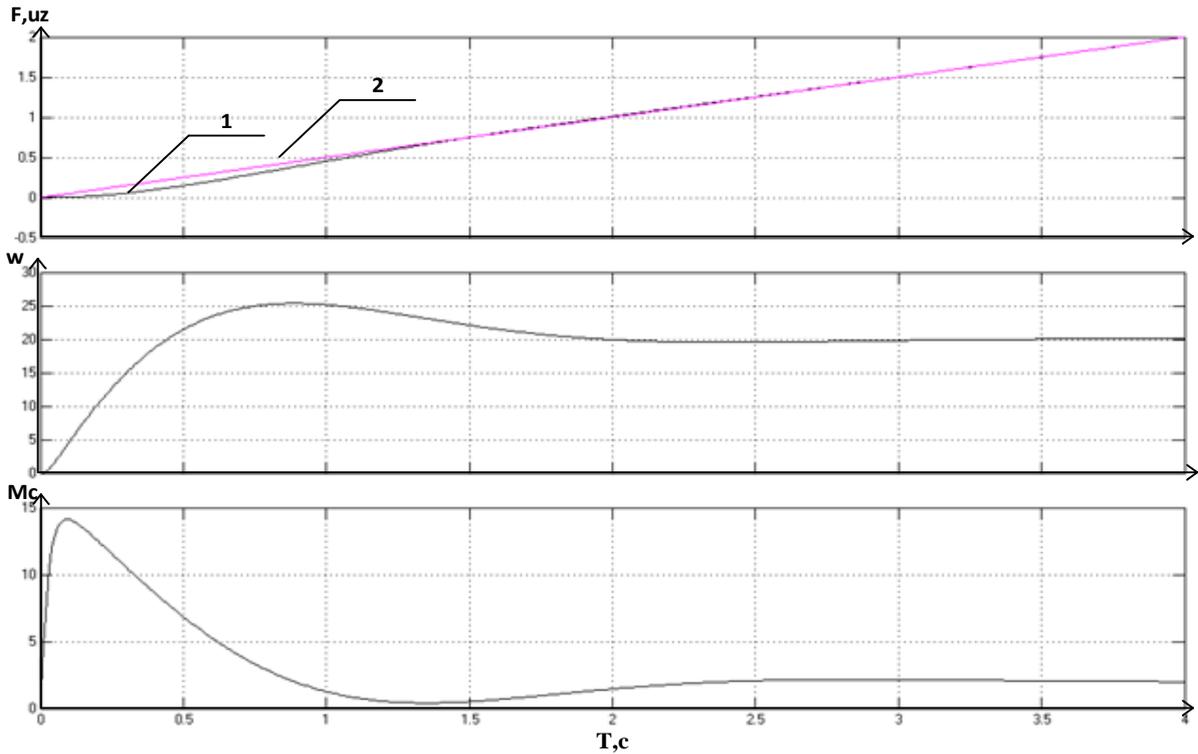


Рис. 2.17. Характеристики системы при сигнале задания, изменяющемся линейно (1- выходной сигнал, 2 – входной сигнал)

Рассмотрим моделирование процессов в системе при сигнале задания, изменяющегося по гармоническому закону. Изменяем блок задания входного сигнала на блок, подающий сигнал, изменяющийся гармонически:

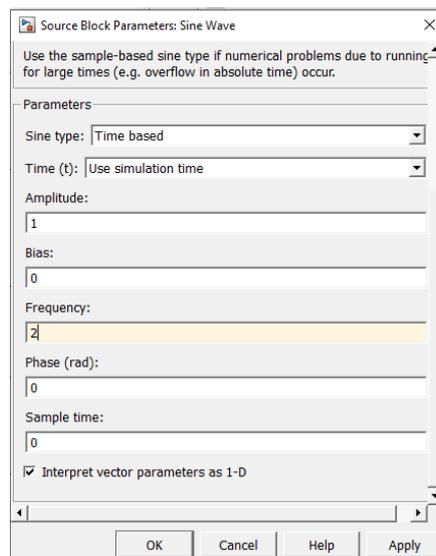


Рис. 2.18. Блок задания входного воздействия, изменяющегося по гармоническому закону

В результате схема выглядит следующим образом:

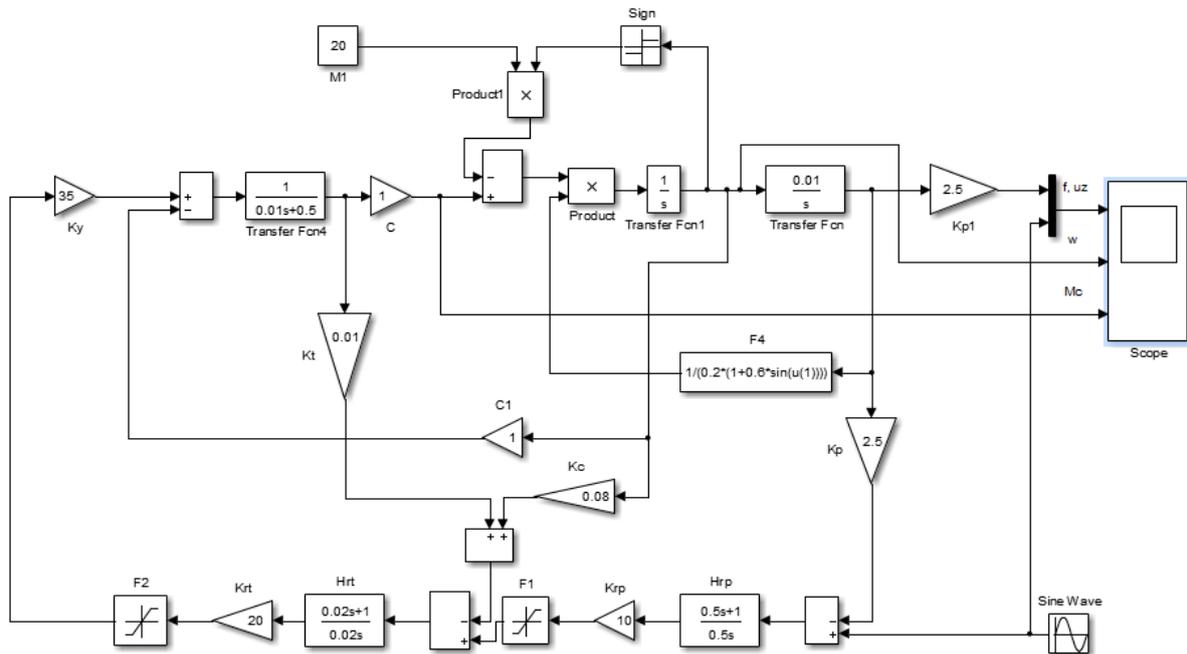


Рис. 2.19. Модель системы с гармоническим задающим воздействием

Результаты моделирования представлены на рис. 2.20.

На рис. 2.20 обозначено: 1- реакция системы, 2- задающее воздействие.

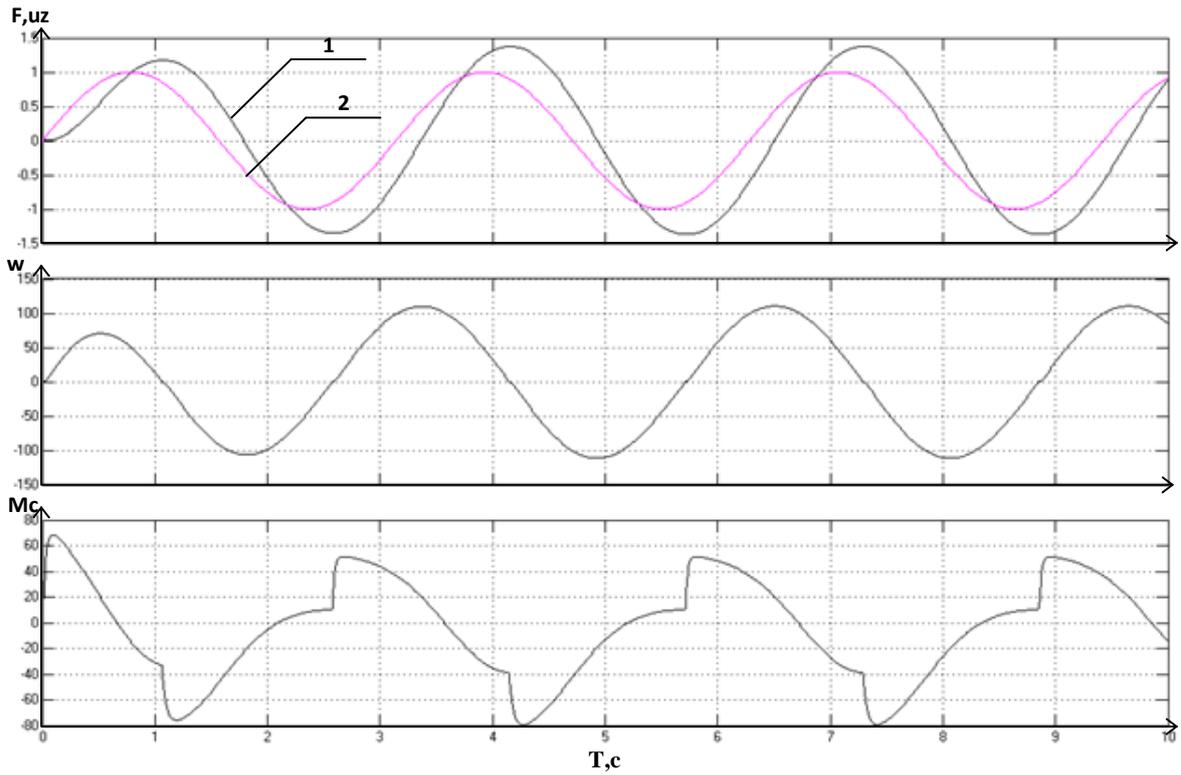


Рис. 2.20. Характеристики системы при гармоническом задающем воздействии с частотой 2 рад/с

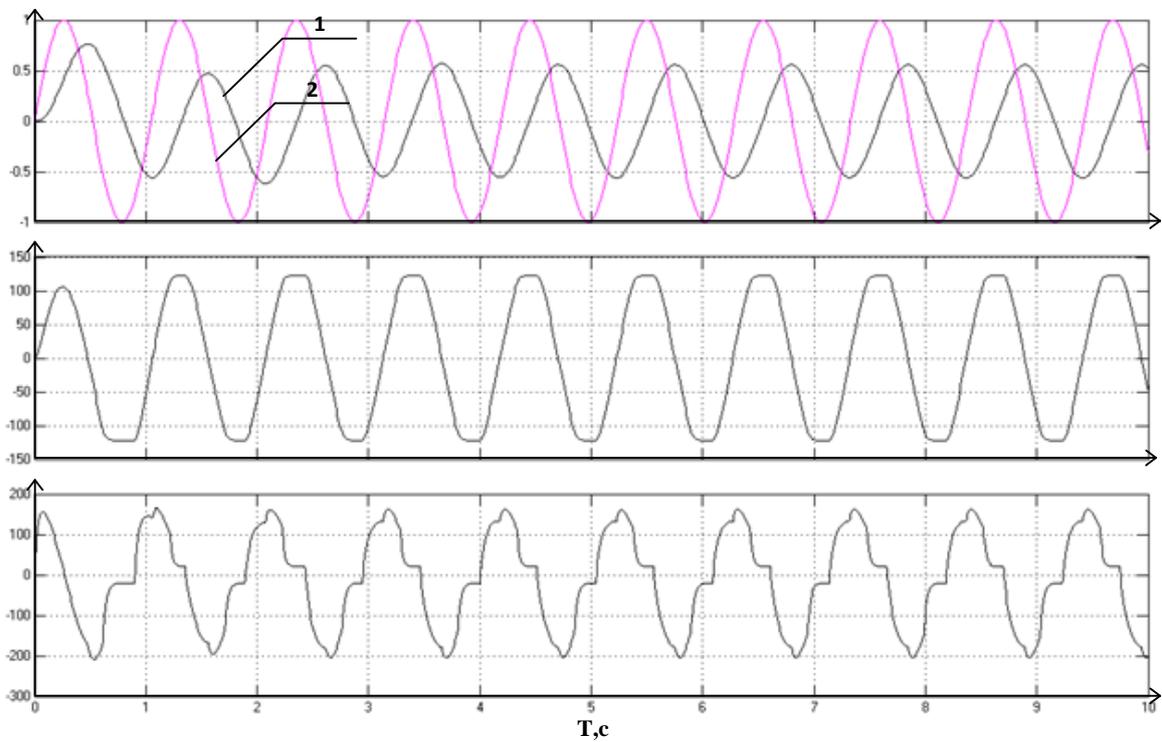


Рис. 2.21. Характеристики системы при гармоническом задающем воздействии с частотой 6 рад/с

Как видно из этих графиков, система обрабатывает заданное воздействие с запаздыванием.

Рассмотрим расчет параметров ПИ-регулятора с использованием блока «Check Step Response Characteristics» [2]

Для настройки ПИ-регулятора используется блок «Check Step Response Characteristics». Схема приведена на рисунке 2.22

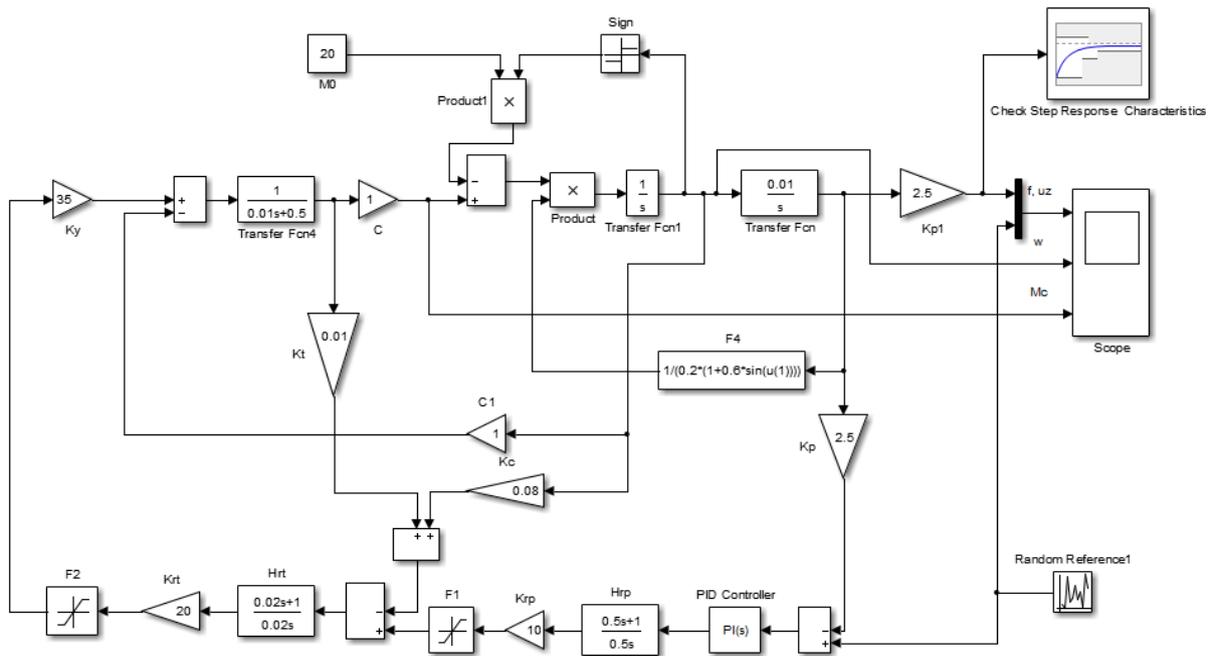


Рис. 2.22. Схема для настройки ПИ регулятора

Выберем в качестве начальных параметров ПИ регулятора: $K_p=1$, $K_i=1$. Процесс оптимизации параметров регулятора приведен на рисунке 2.23

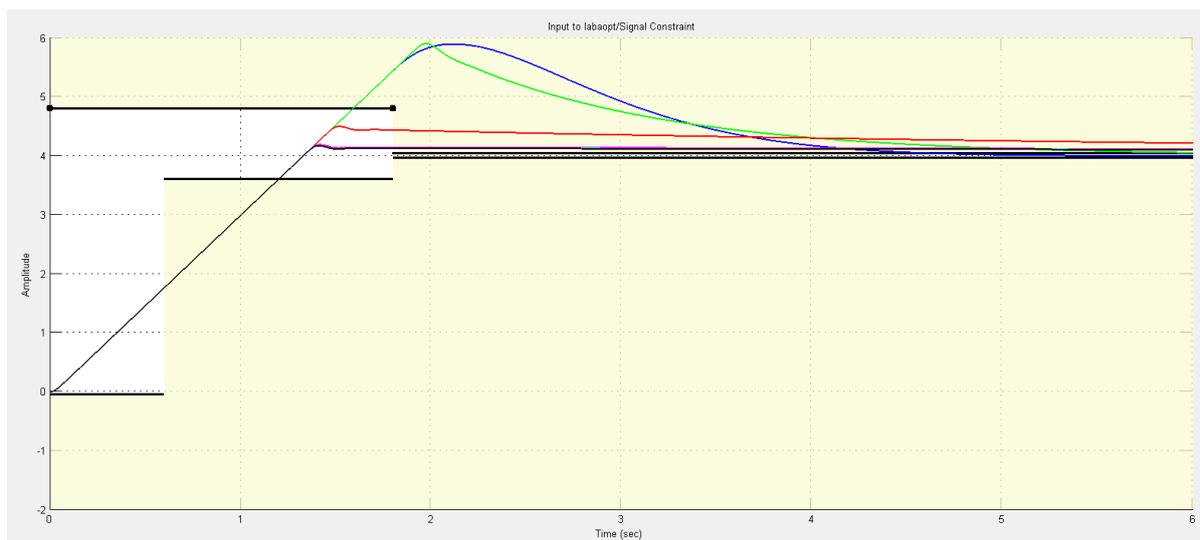


Рис. 2.23. Оптимизация параметров ПИ-регулятора

Полученные коэффициенты ПИ регулятора: $K_p = 4,9119$, $K_i = 0,2105$.

Настройка ПИ-регулятора не позволила получить желаемые параметры, перерегулирование уменьшилось незначительно, поэтому в следующем эксперименте будем использовать нейроконтроллер.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма.

Нейронные сети успешно применяются для синтеза систем управления динамическими объектами. Нейросети обладают рядом уникальных свойств, которые делают их мощным инструментом для создания систем управления: способностью к обучению на примерах и обобщению данных, способностью адаптироваться к изменению свойств объекта управления и внешней среды, пригодностью для синтеза нелинейных регуляторов, высокой устойчивостью к повреждению своих элементов в силу изначально заложенного в нейросетевую архитектуру параллелизма. [6]

Обучение нейронной сети с учителем предполагает, что для каждого входного вектора из обучающего множества существует требуемое значение выходного вектора, называемого целевым. Эти вектора

образуют обучающую пару. Веса сети изменяют до тех пор, пока для каждого входного вектора не будет получен приемлемый уровень отклонения выходного вектора от целевого.

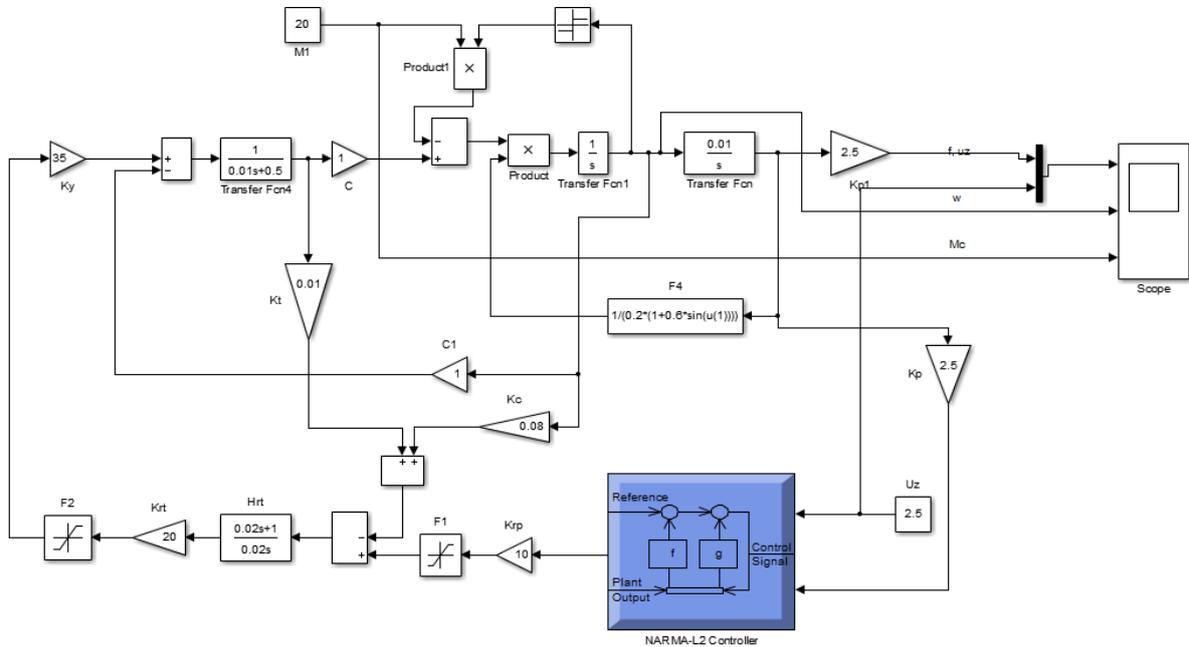


Рис. 2.24. Модель, содержащая нейроконтроллер в качестве регулятора положения

Для того, чтобы обучить нейросеть, необходимо иметь эталонную систему (учителя) (рис.2.25), относительно которой будет проводиться тренировка. В качестве такой было выбрано апериодическое звено второго порядка.

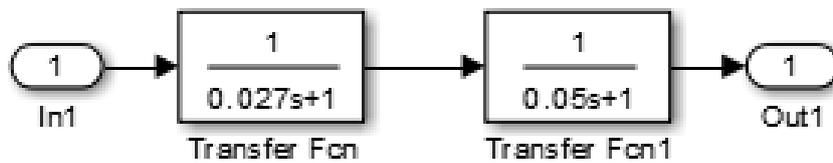


Рис. 2.25. Апериодическое звено второго порядка

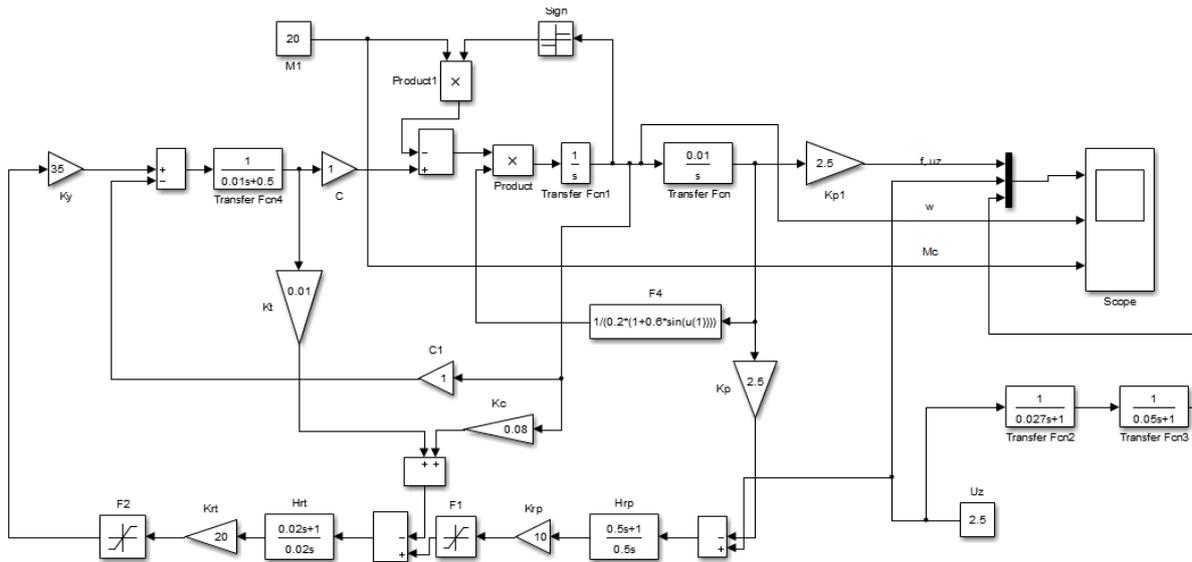


Рис. 2.26. Модель системы с эталонном

Как видно из рисунка 2.27, тренировочная схема имеет меньшее время переходного процесса.

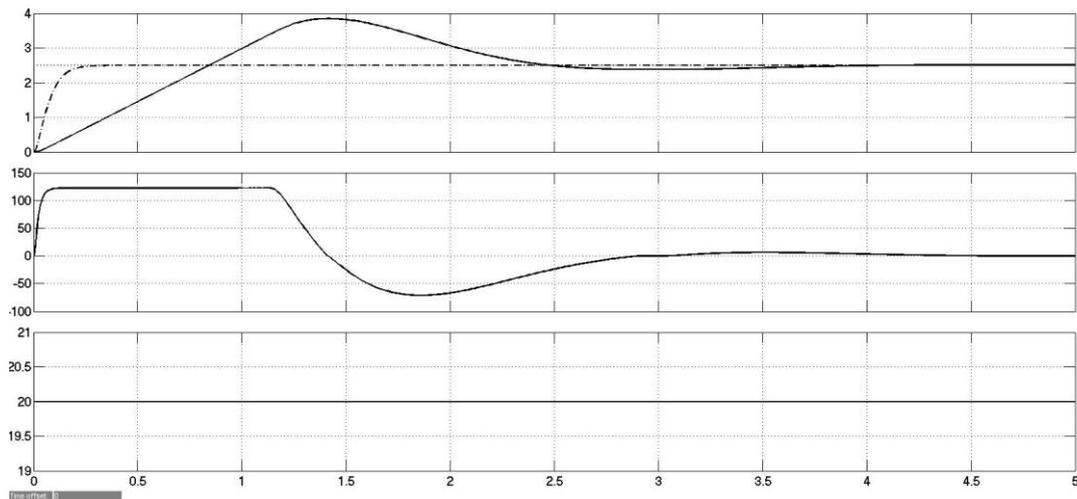


Рис. 2.27. Сравнение выходных характеристик

Процедура идентификации нейроконтроллера требует задания следующих параметров (Рис. 2.28):

- *Size of Hidden Lauer* – размер скрытого слоя определяется количеством используемых нейронов;
- *Sampling Interval* – такт дискретности в секундах между двумя последовательными моментами съема данных;

- *No. Delayed Plant Inputs* – количество элементов запаздывания на входе модели;
- *No. Delayed Plant Outputs* – количество элементов запаздывания на выходе модели;
- *Normalize Training Data* – окно контроля нормирования обучающих данных к диапазону [0 1].
- Параметры обучающей последовательности:
 - *Training Samples* – длина обучающей выборки (количество точек съема информации);
 - *Maximum Plant Input* – максимальное значение входного сигнала;
 - *Minimum Plant Input* – минимальное значение входного сигнала;
 - *Maximum Interval Value (sec)* – максимальный интервал идентификации в секундах;
 - *Minimum Interval Value (sec)* – минимальный интервал идентификации в секундах;
 - *Limit Output Data* – окно контроля, позволяющее ограничить объем выходных данных (только при включенном окне контроля будут доступны два следующих окна редактирования текста);
 - *Maximum Plant Output* – максимальное значение выходного сигнала;
 - *Minimum Plant Output* – минимальное значение выходного сигнала;
 - *Simulink Plant Model* – задание модели *Simulink* с указанием входных и выходных портов, используемых при нейросетевой модели управляемого процесса;
- Параметры обучения:
 - *Training Epochs* – количество циклов обучения;
 - *Training function* – задание обучающей функции;
 - *Use Current Weights* – окно контроля, позволяющее подтвердить использование текущих весов нейронной сети;
 - *Use Validation/Testing for Training* – выбор этих окон контроля означает, что 25 % данных из обучающей последовательности будет

использовано для формирования контрольного и тестового множеств соответственно.

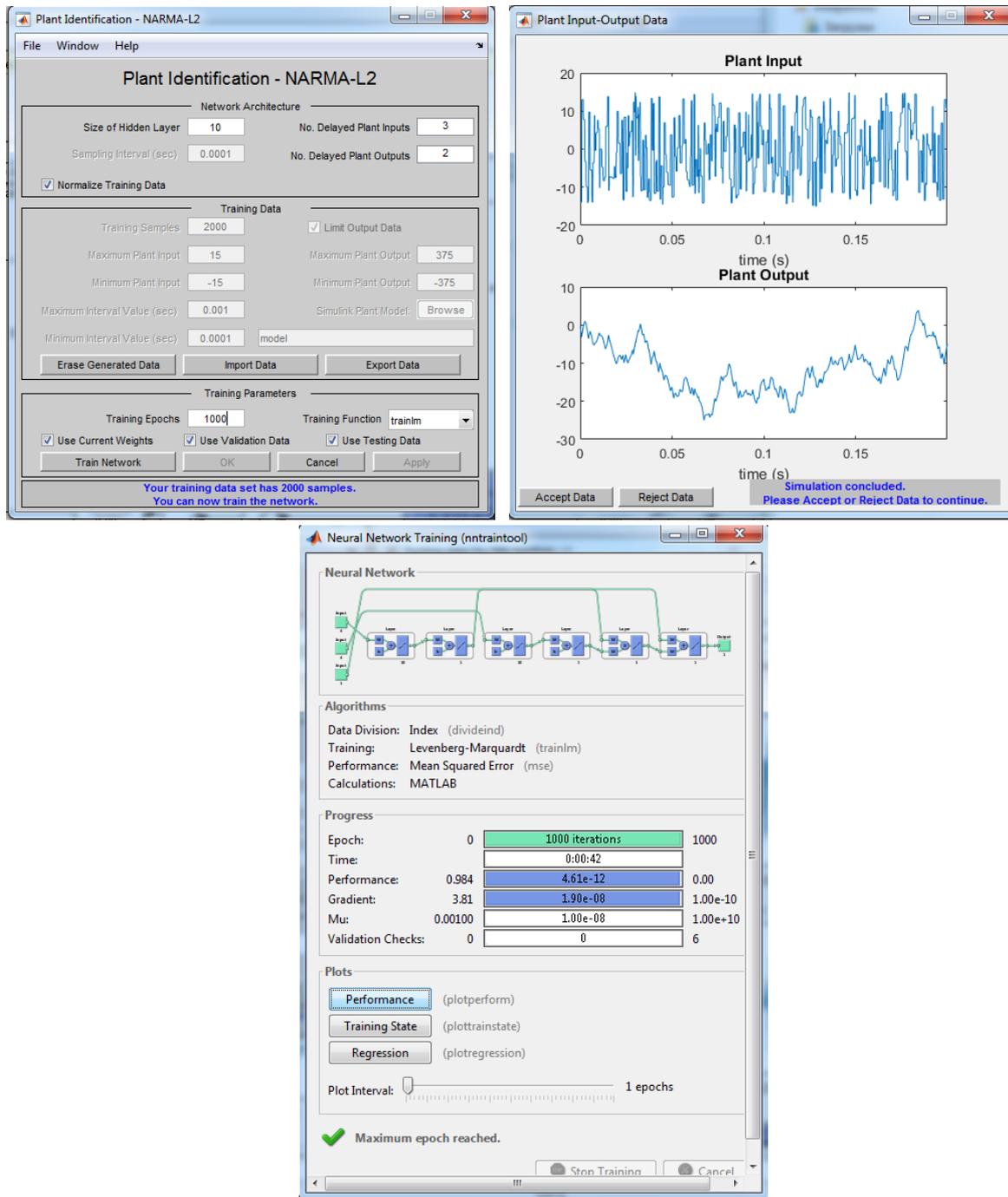


Рис. 2.28. Окно настройки нейроконтроллера и тестовые сигналы

Результаты расчета динамических характеристик для системы с нейроконтроллером (рис. 2.24) представлены на рис. 2.29.

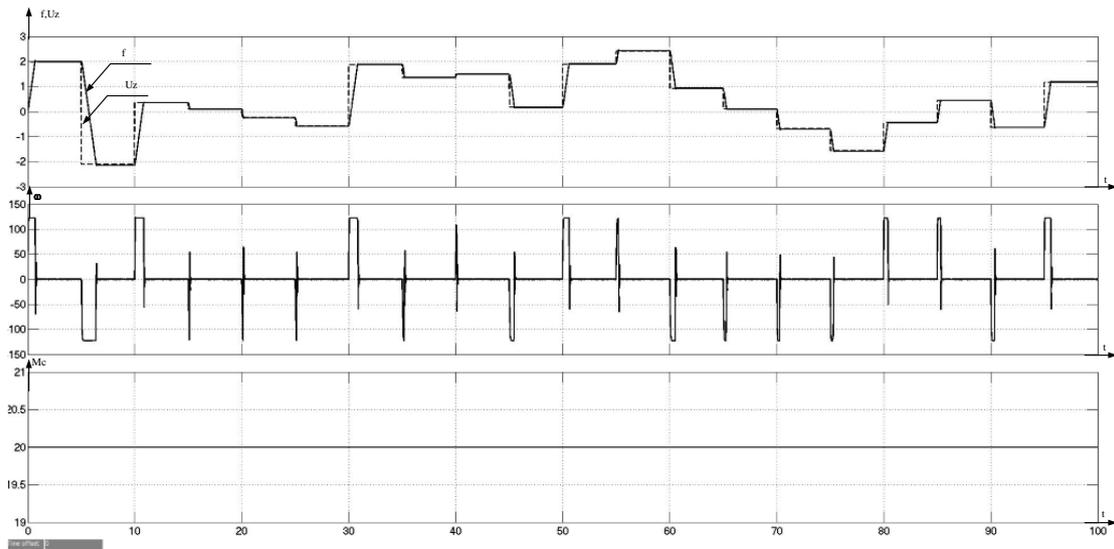


Рис 2.29. Результаты расчета динамических характеристик для системы с нейроконтроллером

Произведем расчет статических характеристик системы. С этой целью составим программу для расчёта зависимости положения(перемещения) и ошибки регулирования от сигнала задания. Модель для снятия зависимости скорости и ошибки регулирования от сигнала задания приведена на рисунке 2.30, а листинг программы на рис 2.31.

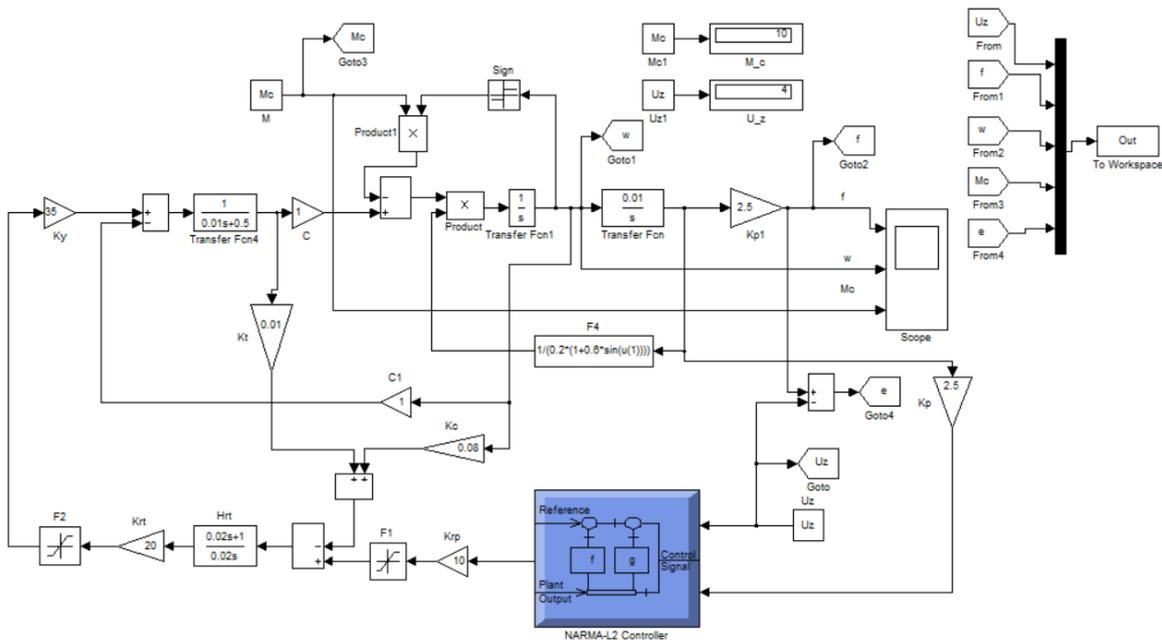


Рис. 2.30 Модель системы для расчета статических характеристик
Листинг программы

```

for k1=0:1:4;%
Mc=10*k1;% Момент сопротивления;
for k=1:1:8;
    Uz=4-1*k;% напряжение задания;
    sim('StatNero');% команда обращения к модели;
    A(k,1)=Out(1);% массив значений выходной величины;
    A(k,2)=Out(2);% массив значений напряжения задания;
    A(k,3)=Out(3);% массив значений частоты вращения двигателя;
    A(k,4)=Out(4);% массив значений момента сопротивления;
    A(k,5)=Out(4);% массив значений ошибки;
end
plot(A(1:k,1),A(1:k,2),'k');% команда построения графика;
hold on
end
grid on

```

Рис. 2.31. Листинг программы для расчета статических характеристик

По полученным результатам строим зависимости положения (перемещения) и ошибки от сигнала задания (рис. 2.32).

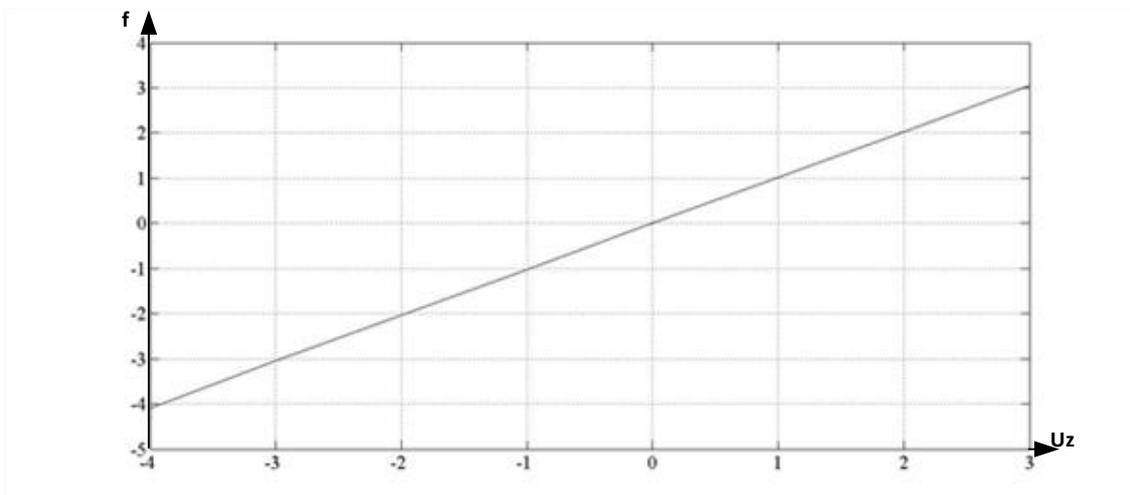


Рис. 2.32. Зависимость положения(перемещения) от сигнала задания

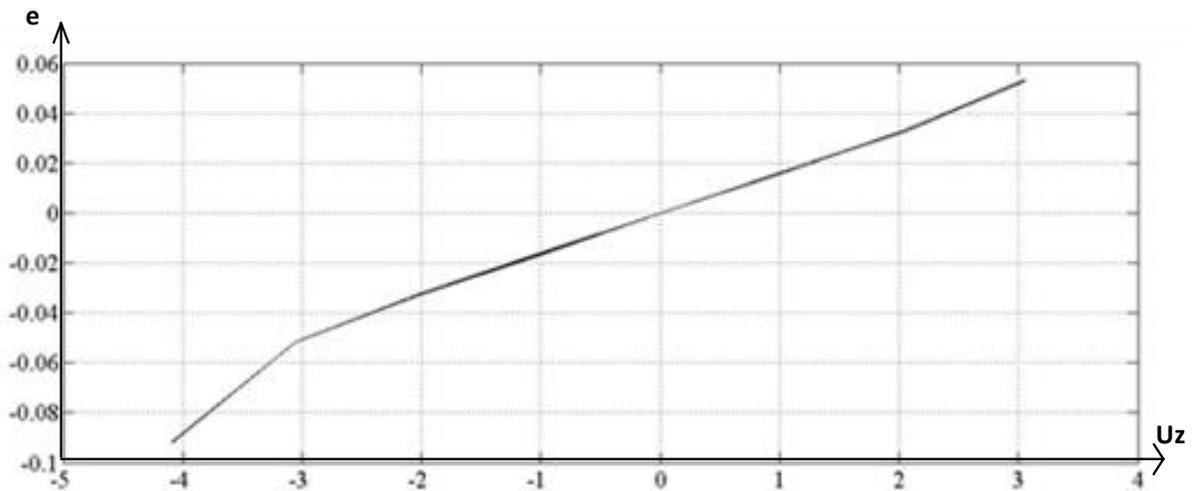


Рис. 2.33. Зависимость ошибки регулирования от сигнала задания

Из полученных характеристик видно – с увеличением сигнала задания, увеличивается ошибка регулирования.

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры использования системы в промышленности.
2. Как зависят величина перерегулирования от входной величины?
3. Как изменятся статические и динамические характеристики системы, если использовать в качестве регулятора нейроконтроллера?
4. Назовите основные параметры следящей системы
5. Чем отличается следящая система от системы стабилизации?

Практическое занятие 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В РЕАКТОРЕ

Функциональная схема системы показана на рисунке 3.1. [1]

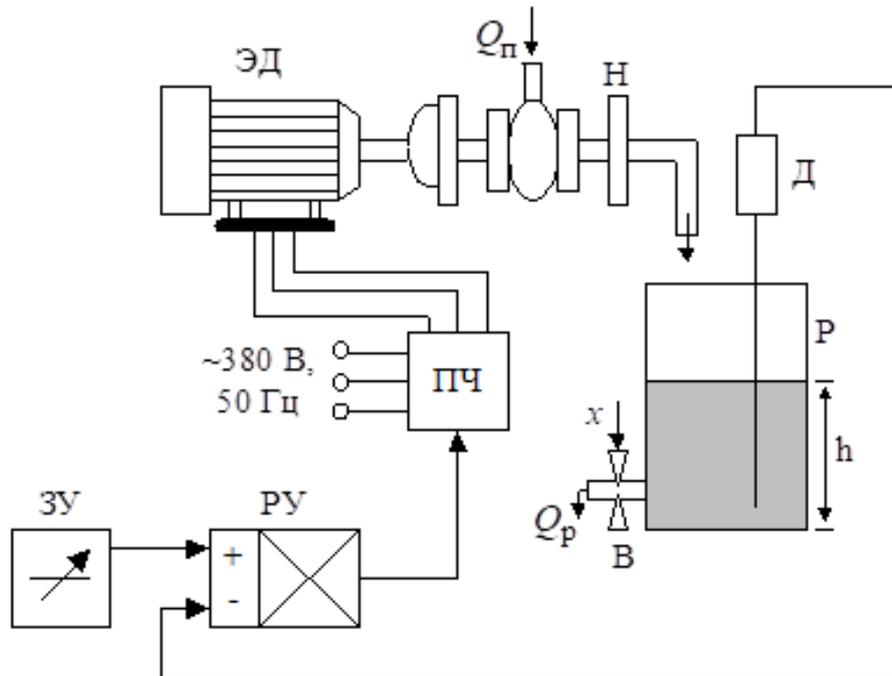


Рис. 3.1. Функциональная схема автоматической системы регулирования уровня жидкости в реакторе

На схеме обозначено:

1. ЗУ – задающее устройство;
2. ЭД – электрический двигатель;
3. Р – резервуар;
4. Н – насос;
5. Д – датчик;
6. РУ – регулирующее устройство;
7. ПЧ – преобразователь частоты;
8. В – вентиль;
9. $Q_{п}$ – объемный расход приточной жидкости;
10. $Q_{р}$ – объемный расход вытекающей жидкости;
11. x – эквивалентный ход выпускного вентиля;
12. h – уровень.

Дан реактор, наполненный жидкостью. Из него в некоторые моменты времени производят забор жидкости посредством открытия сливного клапана. Автоматическая система стабилизации необходима для поддержания постоянного уровня жидкости в этом реакторе. Для этого в системе установлен насос, позволяющий накачивать жидкость в бак по мере необходимости. Датчик уровня жидкости, установленный в реакторе выдает некоторый электрический сигнал, пропорциональный величине h (уровню). Этот сигнал подается на устройство сравнения, где он вычитается из сигнала задания. В зависимости от полученной ошибки устройство управления генерирует сигнал, поступающий к насосу (исполнительное устройство), который в свою очередь добавляет жидкость в бак. Следует заметить, что насос по своей физической природе не способен откачивать жидкость из бака, а значит, в случае установления отрицательной ошибки избавиться от нее исполнительное устройство будет не в состоянии [1].

Структурная схема системы приведена на рисунке 3.2 [1].

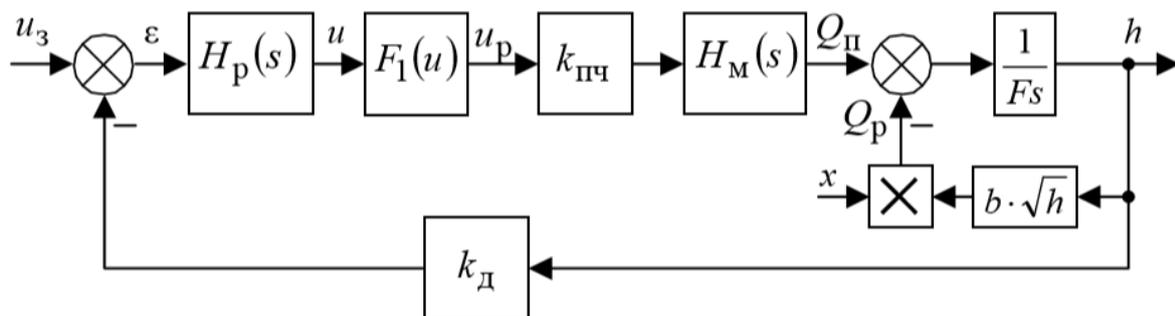


Рис. 3.2. Структурная схема автоматической системы регулирования уровня жидкости в реакторе

На схеме обозначено:

- 1) u_3 – сигнал задания;
- 2) ε – ошибка регулирования;
- 3) $H_p(s)$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулирующего устройства;

$$H_p(s) = \frac{k_p(T_p s + 1)}{T_p s},$$

где k_p, T_p – коэффициент передачи и постоянная времени регулирующего устройства.

4) u – выходной сигнал регулирующего устройства без учета ограничения;

5) $F_1(u)$ – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулирующего устройства;

$$F_1(u) = u_p = \begin{cases} u & \text{при } 0 < u \leq u_m; \\ 0 & \text{при } u < 0; \\ +u_m & \text{при } u \geq u_m; \end{cases}$$

6) u_p – выходное напряжение регулирующего устройства;

7) u_m – максимальное значение выходного сигнала регулирующего устройства, $u_m = 10$ В;

8) $k_{пч}$ – коэффициент передачи преобразователя частоты;

9) $H_m(s)$ – передаточная функция исполнительного устройства (насоса);

$$H_m(s) = \frac{k_m(T_p s + 1)}{T_m s + 1},$$

где k_m, T_m – коэффициент передачи и постоянная времени исполнительного устройства;

10) F – эквивалентная площадь сечения резервуара;

11) b – коэффициент пропорциональности;

12) k_d – коэффициент передачи датчика уровня.

Входной переменной системы являются сигнал задания u_z , а выходной – уровень жидкости в реакторе h . Нагрузкой в системе является объёмный расход воды Q_p . Возмущающим воздействием для заданной системы являются эквивалентный ход выпускного вентиля x .

Данные для расчета и моделирования системы приведены в таблице.

Данные для расчета и моделирования системы

| $U_z, \text{В}$ | K_p | $T_p, \text{с}$ | $K_{пч}$ | $K_m, \text{м}^3/\text{с} \cdot \text{В}$ | $T_m, \text{с}$ | $F, \text{м}^2$ | $b, \text{м}^{3/2}/\text{с}$ | $K_d, \text{В}/\text{м}$ | $x_0, \text{м}$ |
|-----------------|-------|-----------------|----------|---|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|-----------------|
| 6 | 0.1 | 150 | 25 | 10^{-3} | 5 | 10 | 0.2 | 1 | 0.3 |

После расчета передаточных функций набираем модель схемы автоматической системы регулирования уровня жидкости в реакторе в Matlab (Рис. 3.3).

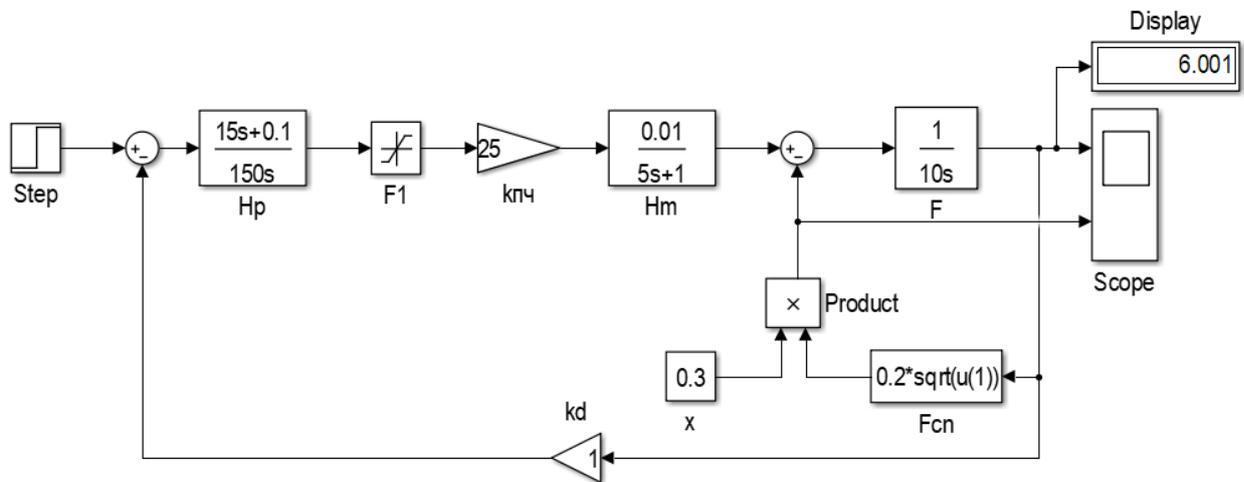


Рис. 3.3. Модель автоматической системы регулирования уровня жидкости в реакторе

Результаты моделирования при задании постоянного задающего входного сигнала представлены на рис. 3.4.

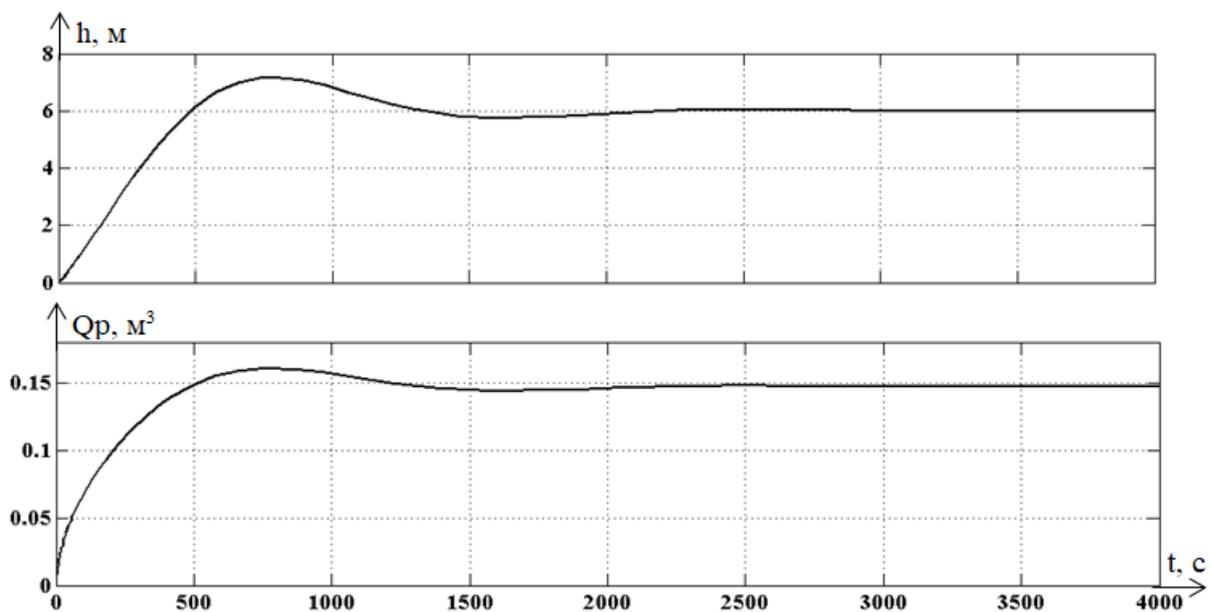


Рис. 3.4. Динамические характеристики при $U_3 = 6 \text{ В}$

Исходя из полученных характеристик, можно сделать вывод, что данная система с заданными параметрами работает с перерегулированием приблизительно равной 16%.

Рассмотрим расчет статических характеристик. Наибольший интерес представляет зависимость выходной величины элемента автоматики от его входной величины. Для определения статических характеристик была собрана схема автоматической системы регулирования уровня жидкости в реакторе в Simulink (рис.3.5) и разработана программа (рис.3.6).

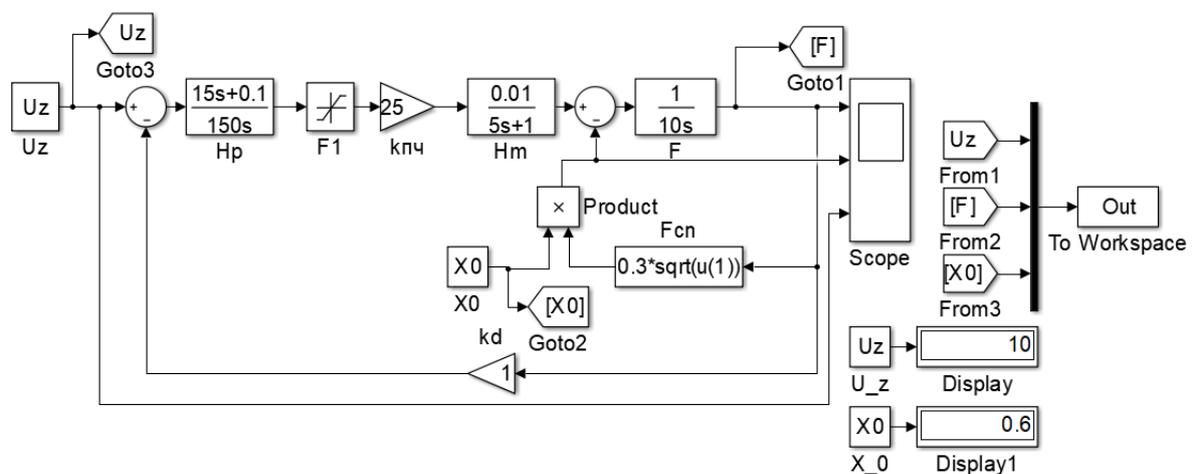


Рис. 3.5 – Модель схемы автоматической системы регулирования уровня жидкости для расчёта статических характеристик

```

for k1=0:2:6;% начало цикла для X0
    X0=0.3*k1/3;% значение X0
for k=0:1:10;% значение k от 0 до 10 с шагом 1
    Uz=1*k;% напряжение задания
    sim('Stx')% команда обращения к модели
    A(k+1,1)=Out(1);% формирование массива данных величины uz
    A(k+1,2)=Out(2);% формирование массива данных величины F
    A(k+1,3)=Out(3);% формирование массива данных величины X0
end
plot(A(1:k,1),A(1:k,2),'k')% построение графиков
hold on;% обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно
end
grid on % добавляет сетку к текущему графику

```

Рис. 3.6. Листинг программы для расчёта статических характеристик

Результаты расчета представлены на рис. 3.7.

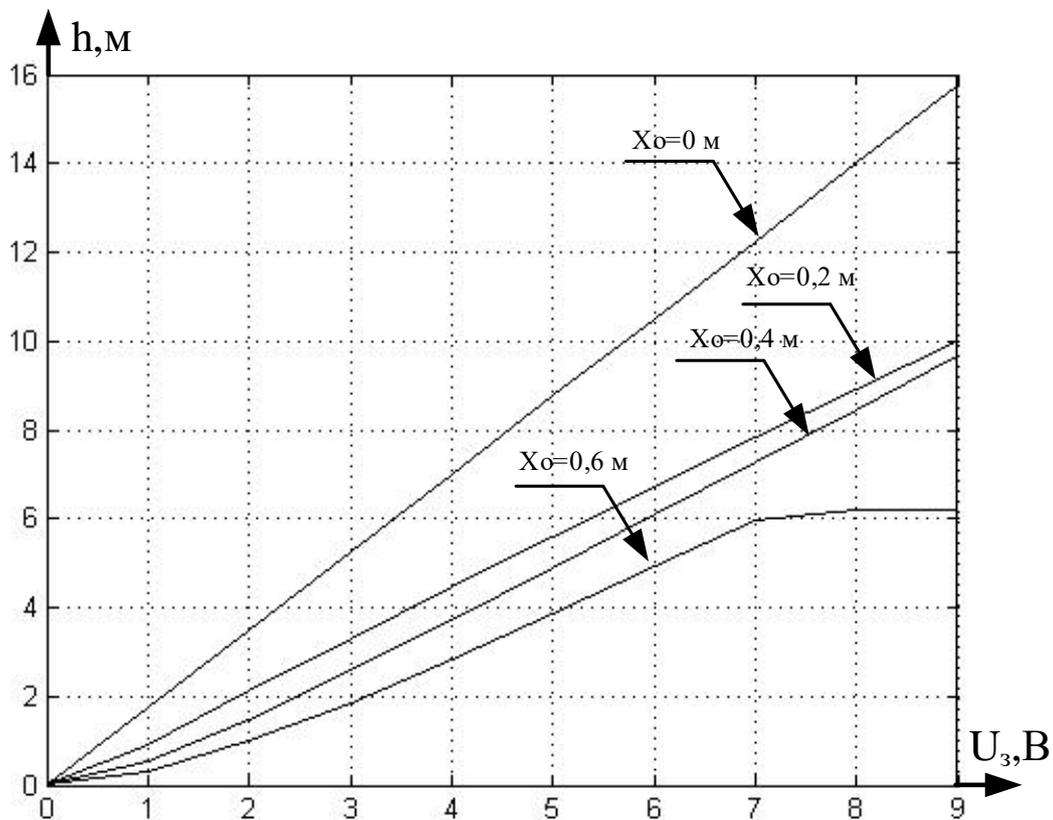


Рис. 3.7. Статические характеристики модели

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры использования системы в промышленности.
2. Проанализируйте функциональную схему автоматической системы регулирования уровня жидкости в реакторе с двигателем постоянного тока.
3. Как изменятся статические и динамические характеристики системы, если вместо ПИ-регулятора использовать нейроконтроллер?
4. Как влияет значение эквивалентного хода x вентиля на статические и динамические характеристики системы?

Практическое занятие 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В РЕАКТОРЕ

Автоматизация производственных процессов является ведущим направлением технического прогресса, важным фактором повышения эффективности и производительности труда, а также повышения качества выпускаемой продукции во всех сферах производства.

Рассмотрим принцип действия, элементы, функциональную и структурную схему системы регулирования давления в реакторе [1].

На рис.4.1 представлена схема автоматической системы регулирования давления в реакторе [1]. Принцип работы заключается в том, что необходимо поддерживать давление объекта на заданном уровне. Устройством для измерения температуры выступает датчик давления (значения давления поступают от ДД в регулирующее устройство (РУ)). В самом РУ формируется управляющее воздействие, за счёт заложенного алгоритма управления в регуляторе. На схеме обозначено: СВД – сеть высокого давления; СНД – сеть низкого давления; Р – резервуар; РО – регулирующий орган (вентиль); ИМ – исполнительный механизм; У – усилитель; РУ – регулирующее устройство; ЗУ – задающее устройство; ДД – датчик давления; x – ход вентиля; p – давление в резервуаре [1].

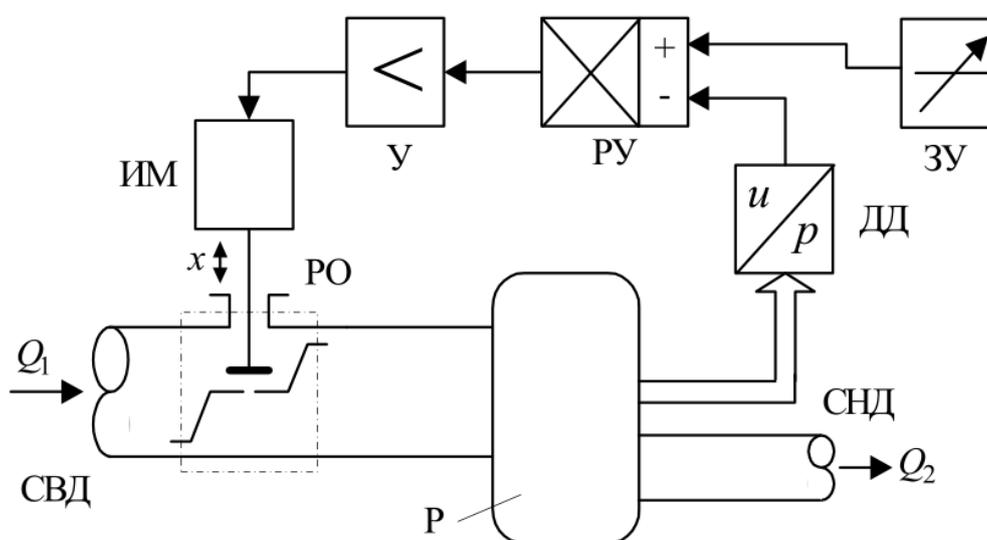


Рис. 4.1. Функциональная схема системы

Рассмотрим структурную схему автоматической системы регулирования давления в реакторе, представленной на рис. 4.2 [1].

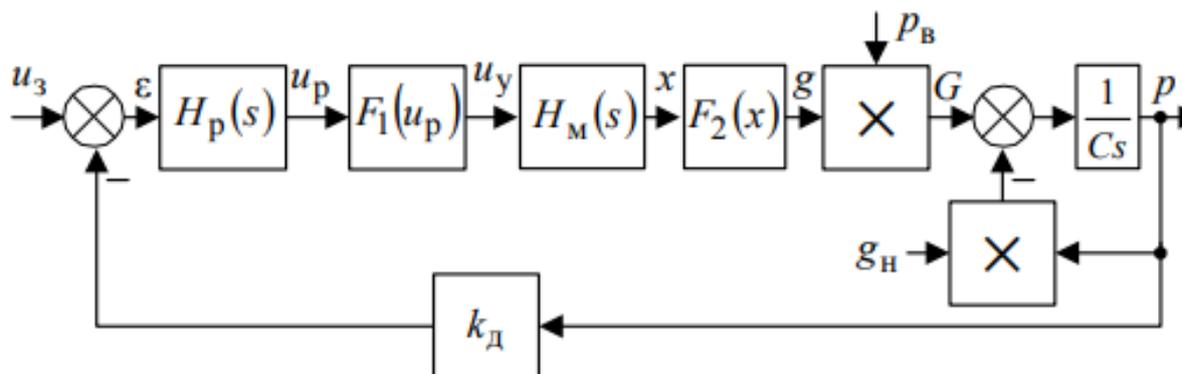


Рис. 4.2. Структурная схема системы

На схеме обозначено:

u_3 - сигнал задания;

ϵ – ошибка регулирования;

$H_p(s)$ – передаточная функция ПД – регулятора;

$$H_p(s) = k_p + k_d s.$$

k_p, k_d – коэффициенты передачи регулирующего устройства;

u_p – выходной сигнал регулирующего устройства;

$H_M(s)$ – передаточная функция исполнительного механизма;

$$H_M(s) = \frac{k_M}{s(T_M s + 1)}.$$

Где k_M, T_M – коэффициент передачи и постоянная времени исполнительного механизма.

$F_1(u_p)$ – статическая характеристика усилителя:

$$F_1(U_p) = U_y = \begin{cases} k_y u_p & \text{при } |k_y u_p| \leq u_M \\ -u_M & \text{при } k_y u_p \leq -u_M \\ +u_M & \text{при } k_y u_p \geq u_M, \end{cases}$$

где k_y и u_M – коэффициент передачи и максимальное значение выходного сигнала усилителя мощности; $u_M = 120\text{В}$;

$F_2(x)$ – характеристика нелинейности типа «упор» вентиля:

$$g = F_2(x) = \begin{cases} K_B(x) \\ 0 \leq x \leq x_M \end{cases}$$

k_B – коэффициент передачи вентиля;

x_M – максимальный ход вентиля;

g – проводимость вентиля;

g_H – проводимость утечки (нагрузки);

p_B – давление в СВД; $p_B=1,2$ МПа.

G – расход газа;

C – емкость резервуара;

k_D – коэффициент передачи датчика давления.

Данные для расчета и моделирования автоматической системы регулирования давления в резервуаре представлены в таблице.

| Параметры | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------------|-------|---------------|-------------|---------------------|--------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|
| $u_z,$ В | K_p | $K_D,$ с | K_y | $K_M,$ м/В | $T_M,$ с | $K_B, M^2/c$ МПа | $x_M,$ мм | $C,$ м ³ /МПа | $K_D,$ В/МПа | $g_H,$ м ³ /МПа |
| 7 | 0,5 | 3 | 2,5 | 0,001 | 1 | 2 | 1,5 | 2 | 50 | 0,015 |

По функциональной и структурной схемам, приведенным выше, была разработана модель автоматической системы регулирования давления в реакторе, построенная в среде MATLAB (рис.4.3). Результаты моделирования представлены на рис.4.4.

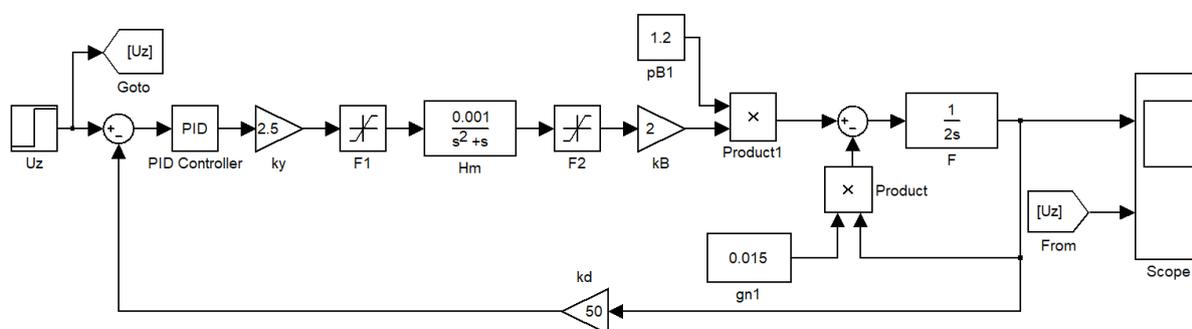


Рис. 4.3. Модель автоматической системы регулирования давления

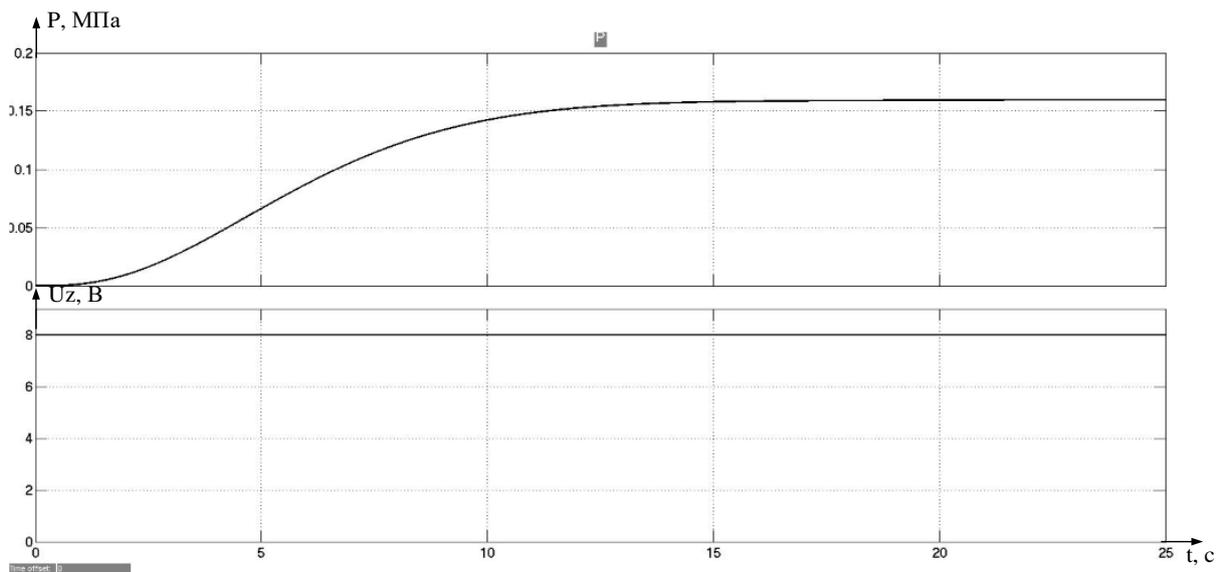


Рис. 4.4. Характеристика давления при напряжении задания $u_z=8$ В

Рассмотрим настройку параметров регулятора с помощью блока «Signal Constraint» [2].

Задача блока Signal Constraint заключается в том, чтобы на базе заданных ограничений автоматически генерировать задачу конечно-мерной оптимизации так, чтобы точка экстремума в пространстве настраиваемых параметров соответствовала выполнению всех требований, предъявляемых к качеству процесса [2]. В качестве модели будем использовать схему, представленную на рис 4.5.

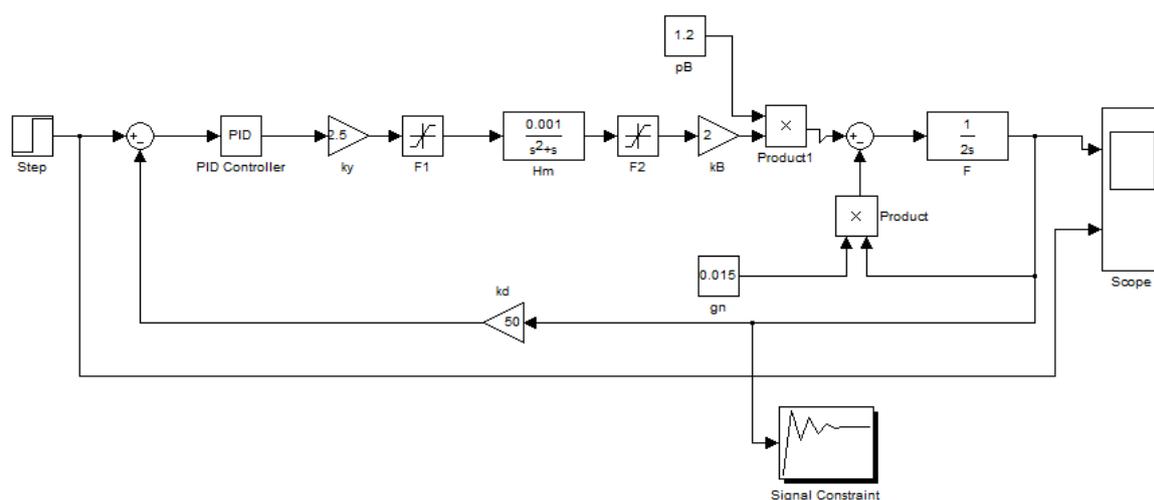


Рис. 4.5. Модель с ПД – регулятором

Далее необходимо настроить сам коридор, в пределах которого, должен находиться сигнал блока в соответствии с требованиями задачи. Это можно сделать, передвигая линии, являющиеся границами коридора, либо задать точные значения при помощи диалоговой панели. При этом необходимо задать начальные значения k_d и k_p .

На рисунке 4.6 представлен процесс настройки параметров регулятора k_d и k_p .



Рис. 4.6. График настройки параметров k_d и k_p

После окончания процесса оптимизации получаем следующие значения: $k_d = 86,3$; $k_p = 47,4$.

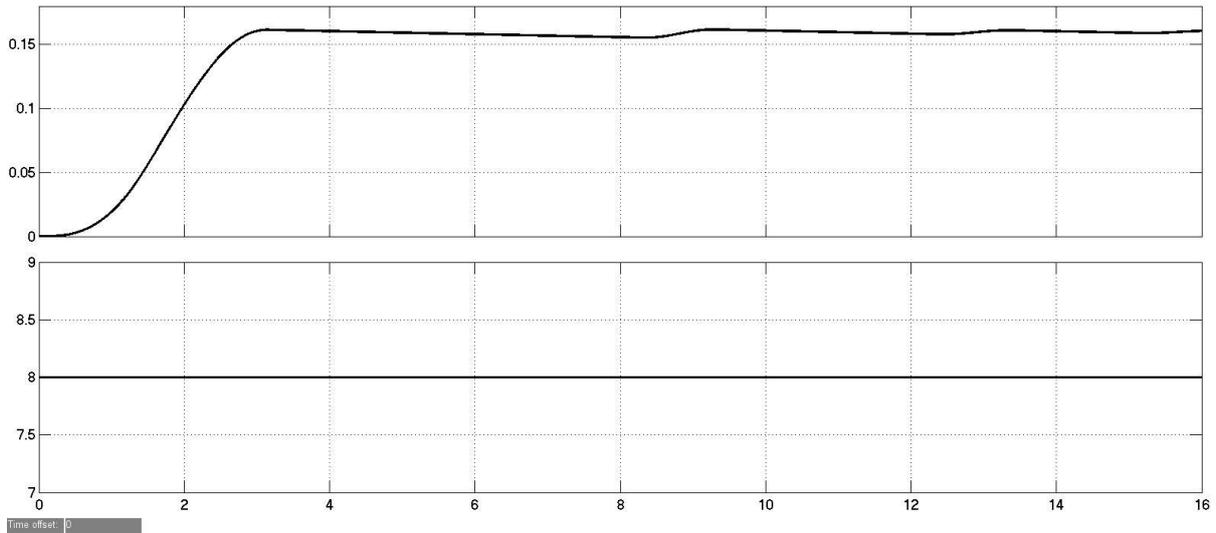


Рис. 4.7. Динамическая характеристика давления после оптимизации

Сравним характеристики заданной системы с характеристиками системы после настройки. Модель для сравнения характеристик представлена на рис 4.8.

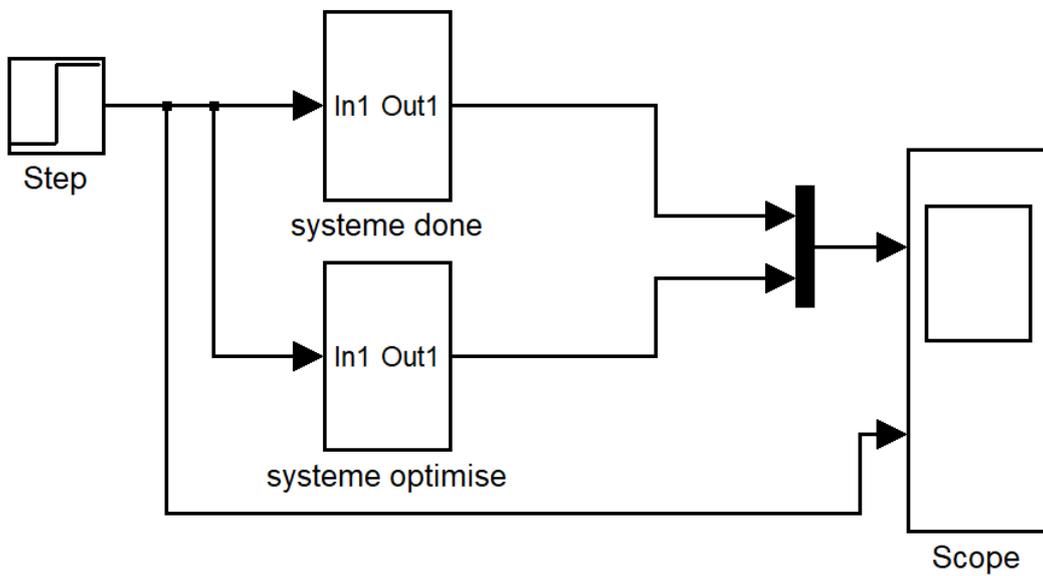


Рис 4.8. Модель для сравнения характеристик

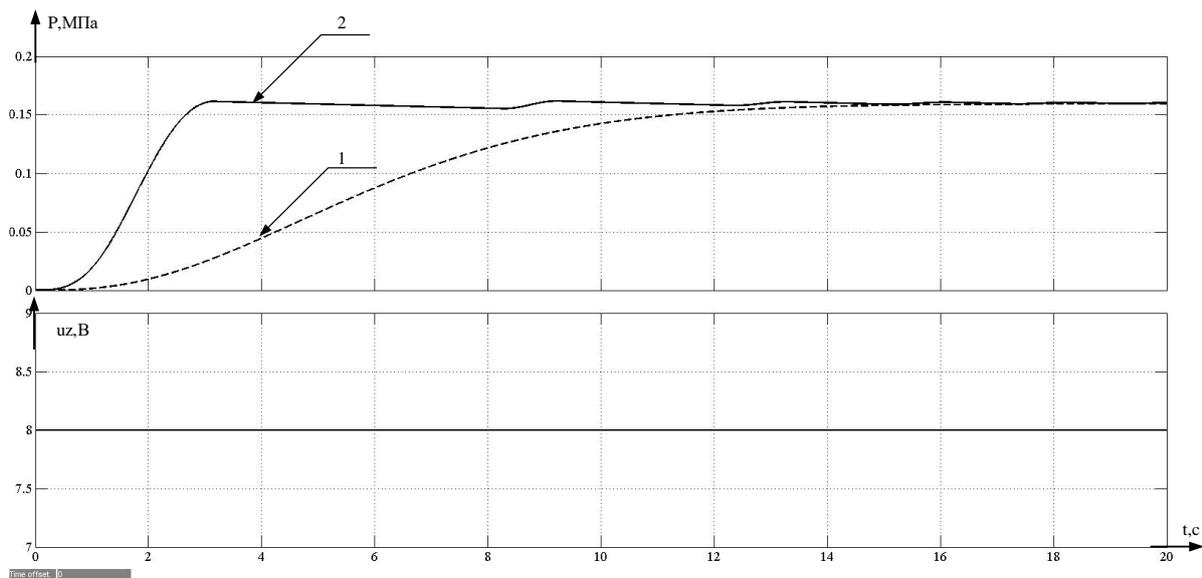


Рис. 4.9. Характеристика системы до настройки (кривая 1) и после (кривая 2)

Результат настройки параметров ПД - регулятора показал, что система в процессе настройки улучшила свои показатели качества.

Рассмотрим расчет статистических характеристик системы. Модель для расчета представлена на рис.4.10

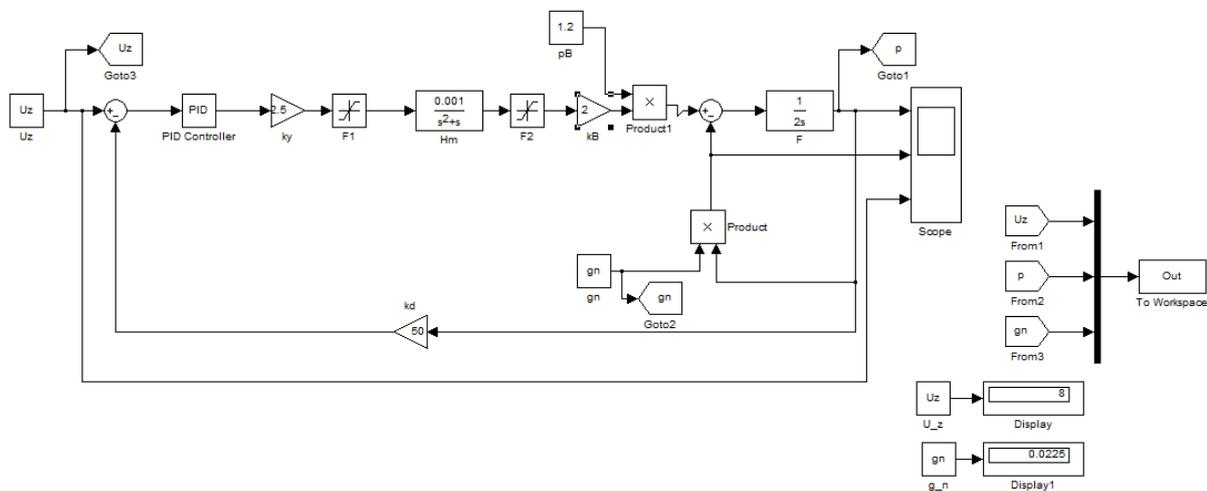


Рис. 4.10. Модель для расчёта статистических характеристик

Блоки Goto1 - Goto3 и From1 – From3, представленные в схеме (рис. 4.10), предназначены передачи сигналов вместо соединительных линий.

Код программы для построения зависимости давления от напряжения задания представлен на рис 4.11.

```
for k1=0:1:3;  
gn=0.015*k1/2; % давление в СВД;  
for k=1:1:4;  
Uz=2*k; % напряжение задания;  
sim('pressionst'); % команда обращения к модели;  
A(k,1) = Out (1); % формирование данных массива величины  $u_z$ ;  
A(k,2) = Out (2); % формирование данных массива величины  $P$ ;  
A(k,3) = Out (3); % формирование данных массива величины  $P_v$ ;  
end  
plot (A(1:k,1),A(1:k,2),'k'); % построение графиков;  
hold on; % обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно;  
end  
grid on % добавление сетки к текущему графику;
```

Рис. 4.11. Код программы для построения зависимости давления
От напряжения задания

Результаты расчета статических характеристик представлены на рис.4.12

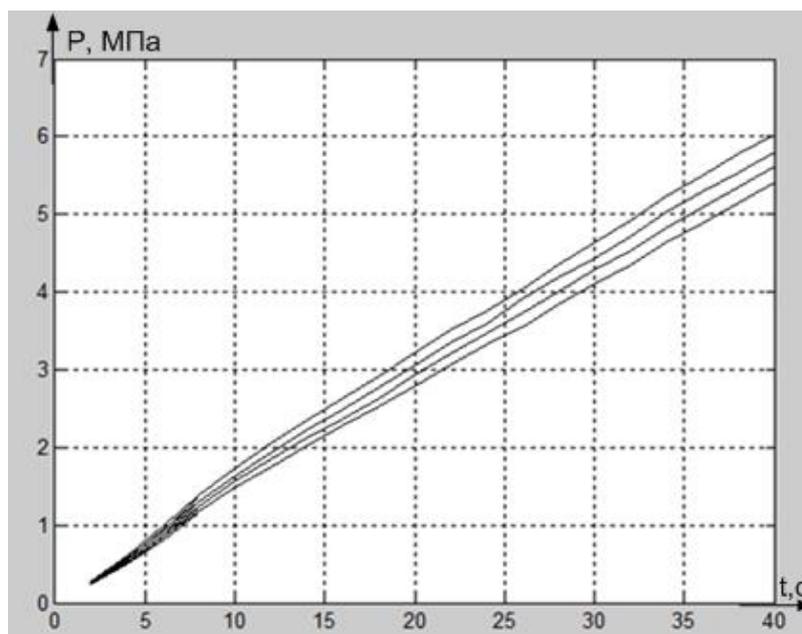


Рис. 4.12. Статистические характеристики системы

Проведем исследование процессов в системе при действии случайного сигнала со стороны давления в СВД (сеть высокого давления).
Используем модель, представленную на рис. 4.5 в качестве подсистемы для дальнейшего исследования.

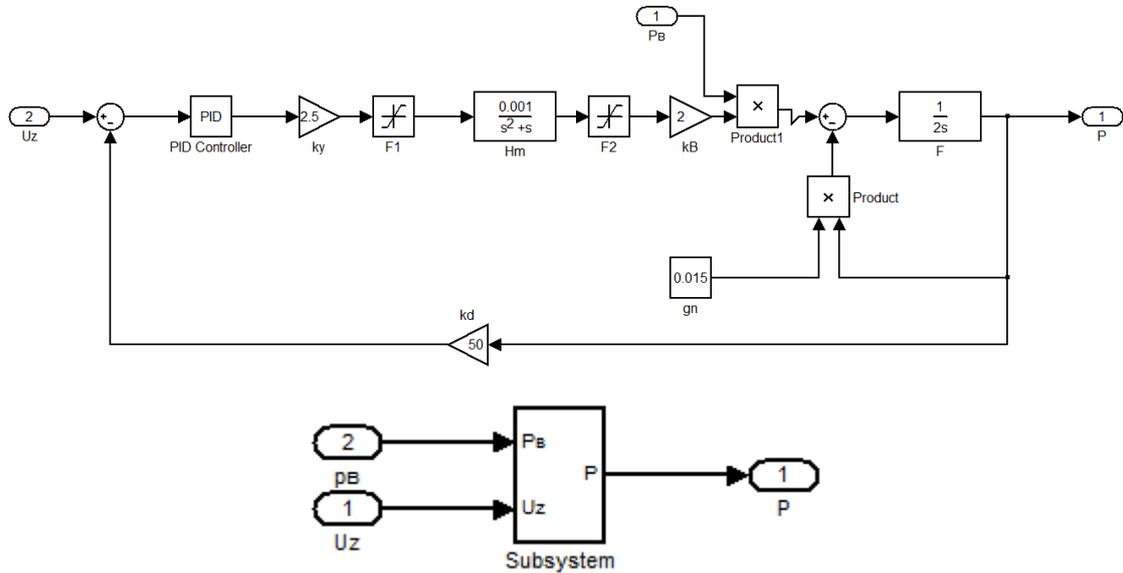


Рис. 4.13. Создание подсистемы из модели

Создадим две одинаковые подсистемы, на одну из которых будет подаваться случайное значение параметра p_b (давление в СВД) и напряжение задания равное 7В, на вторую подсистему на вход подаётся постоянное значение параметра $p_b = 1,2$ и напряжение задания $u_z = 7В$.

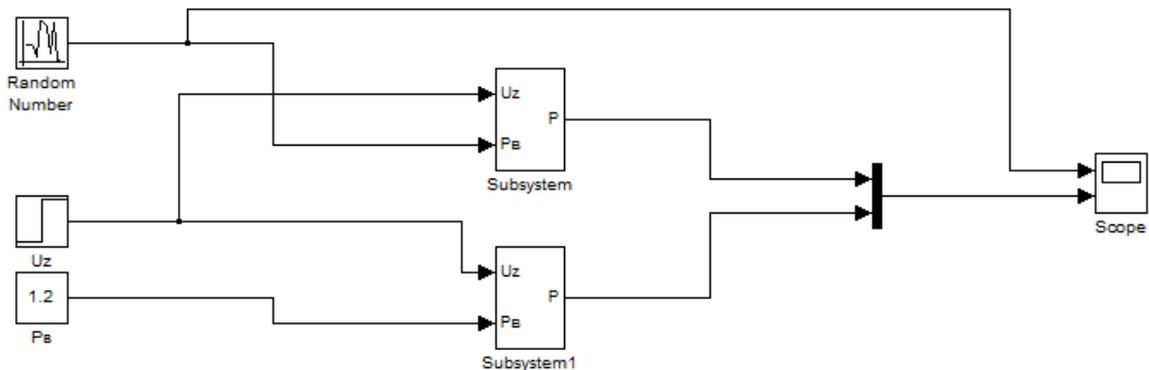


Рис. 4.14. Модель для исследования процессов при случайное значение p_b (давление в СВД)

Таким образом, на рис. 4.15 представлены характеристики модели, построенной выше.

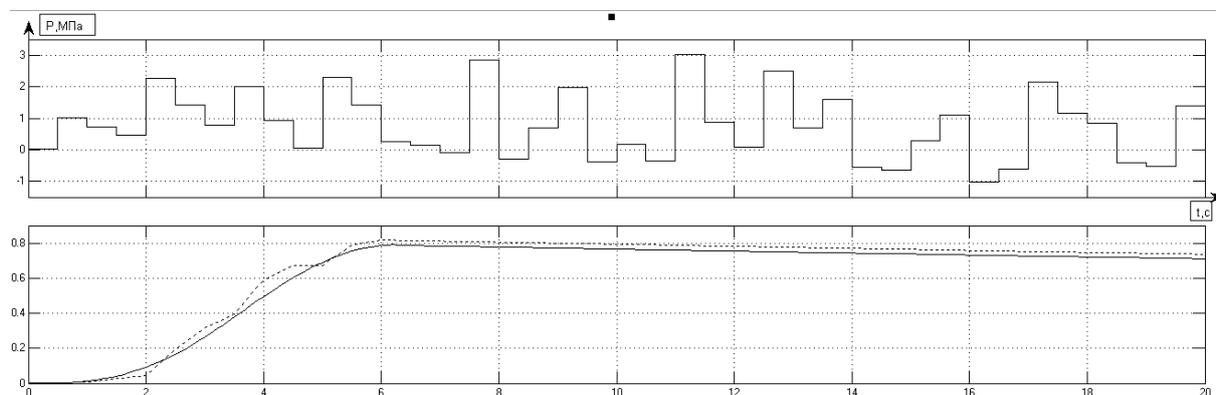


Рис. 4.15. Характеристика виртуальной модели для исследования процессов системы при случайном значении давления в СВД

Исходя из выходной характеристики можно сделать вывод о том, что при подаче случайного значения давления, выходное давление практически не изменяется.

Проведем исследование процессов в системе при действии линейного сигнала со стороны давления в СВД (сеть высокого давления). Исследование проведем на модели, представленной на рис. 4.16.

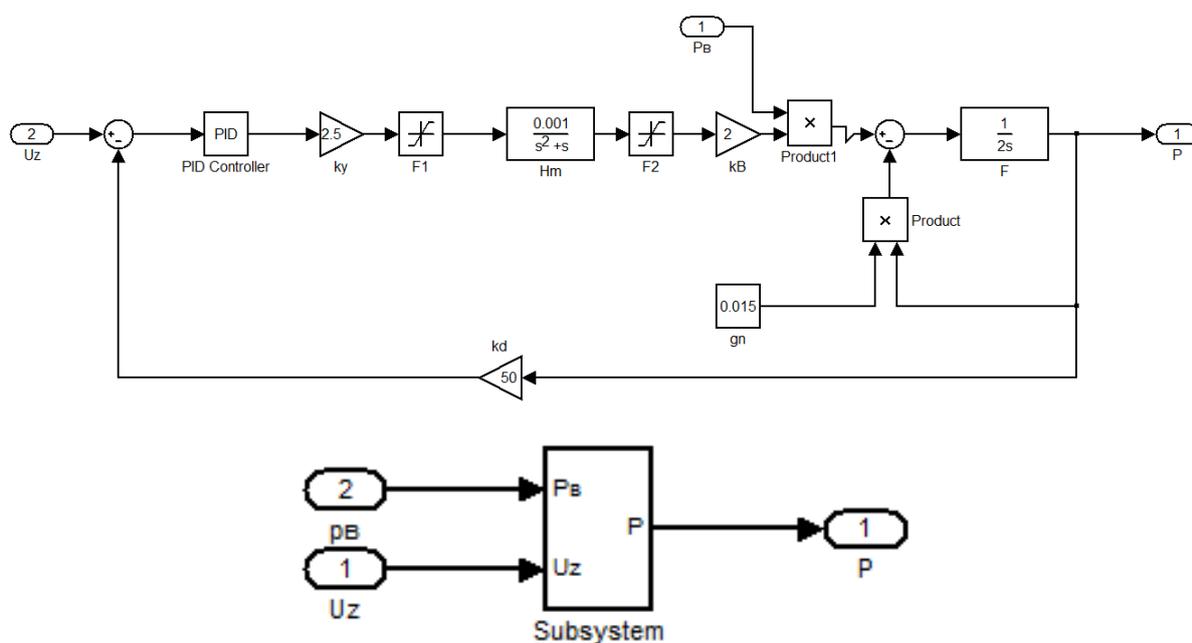


Рис. 4.16. Создание subsystemы из модели

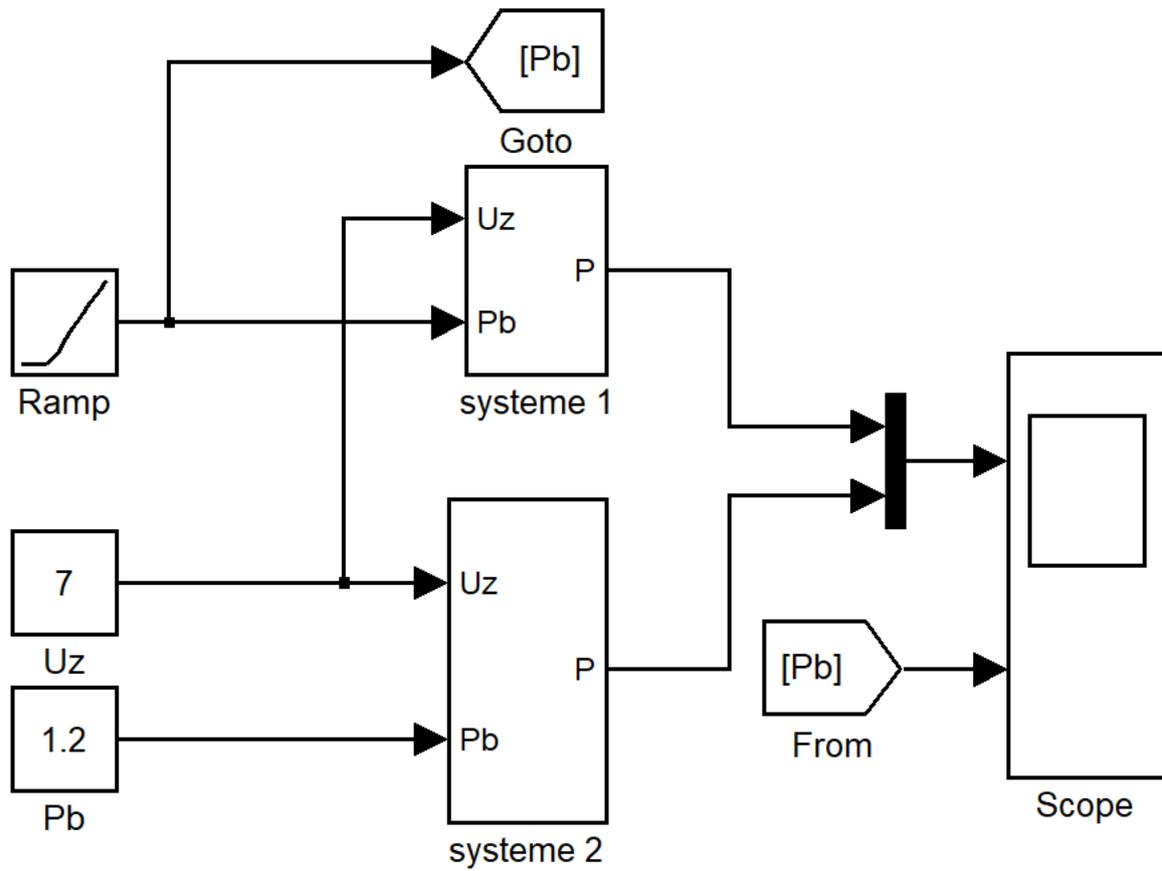


Рис. 4.17. Модель для исследования процессов системы при подаче линейно-растущего давления (СВД)

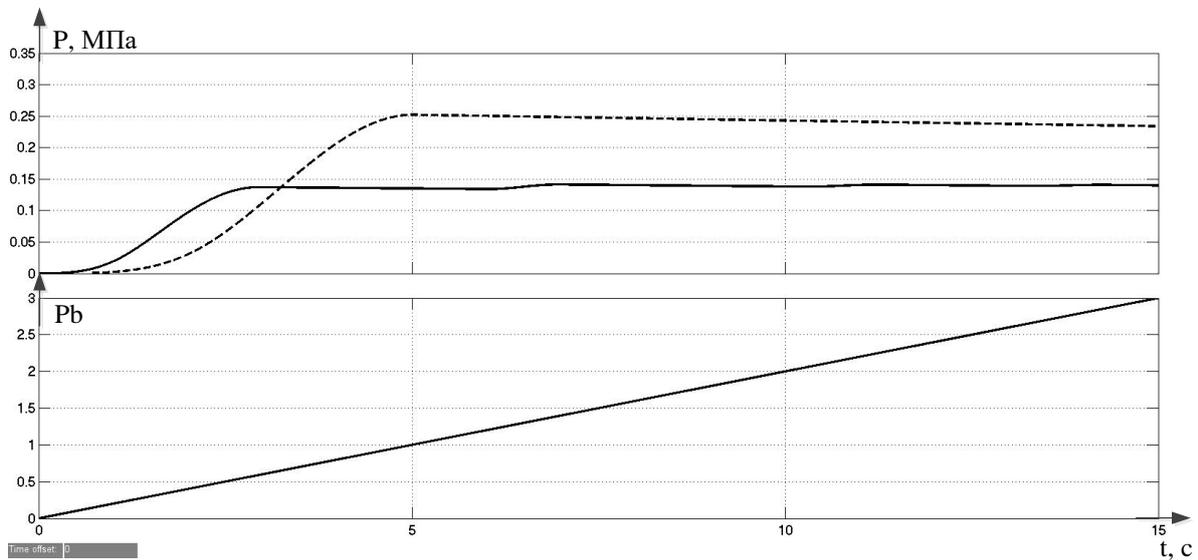


Рис. 4.18. Характеристика виртуальной модели при подаче линейно растущего давления

Проведем исследование процессов в системе при скачке напряжения задания (рис 4.19).

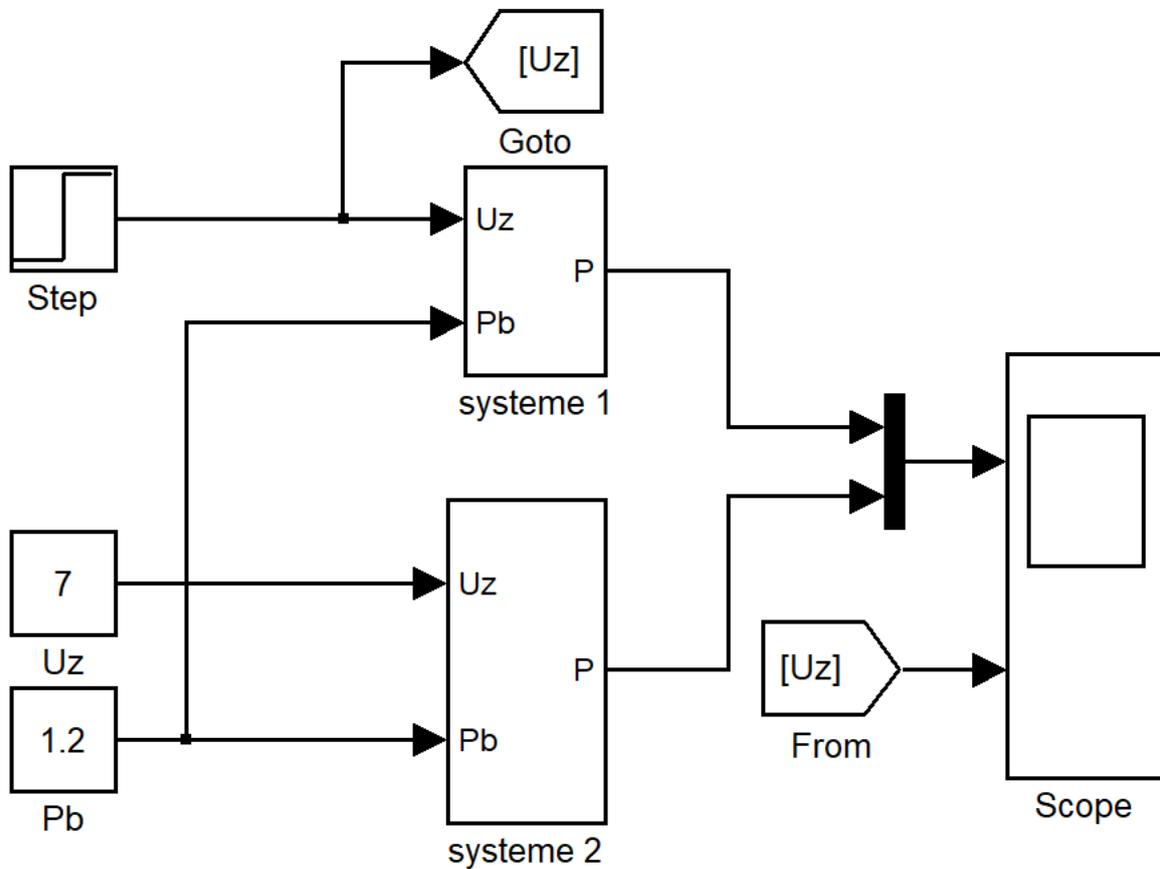


Рис. 4.19. Виртуальная модель для исследования процессов системы при скачке напряжения задания

Результаты моделирования процессов в системе при скачке напряжения задания приведены на рис. 4.20.

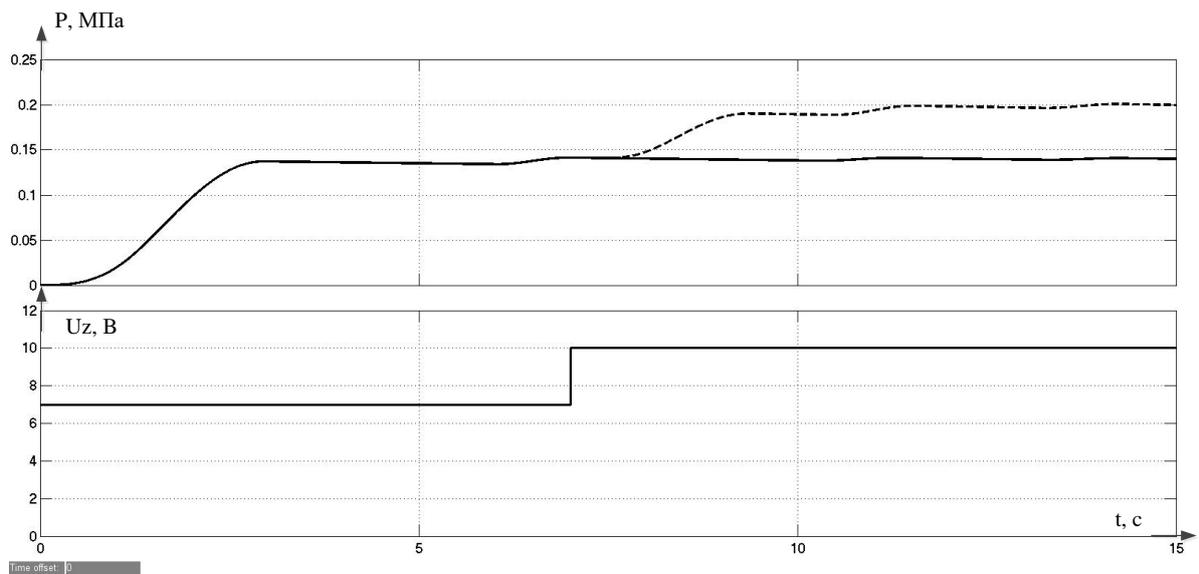


Рис. 4.20. Результаты моделирования процессов в системе при скачке напряжения задания приведены

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры использования системы в промышленности.
2. Проведите анализ статических и динамических характеристик системы.
3. Возможно ли применение в системе релейного регулирующего устройства?
4. Назовите возмущающие воздействия действующие на систему и проанализируйте работу системы при их воздействии.

Практическое занятие 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рисунке 5.1 приведена функциональная схема автоматической системы регулирования скорости с нелинейной обратной связью по току, на которой отображены основные элементы и узлы [1].

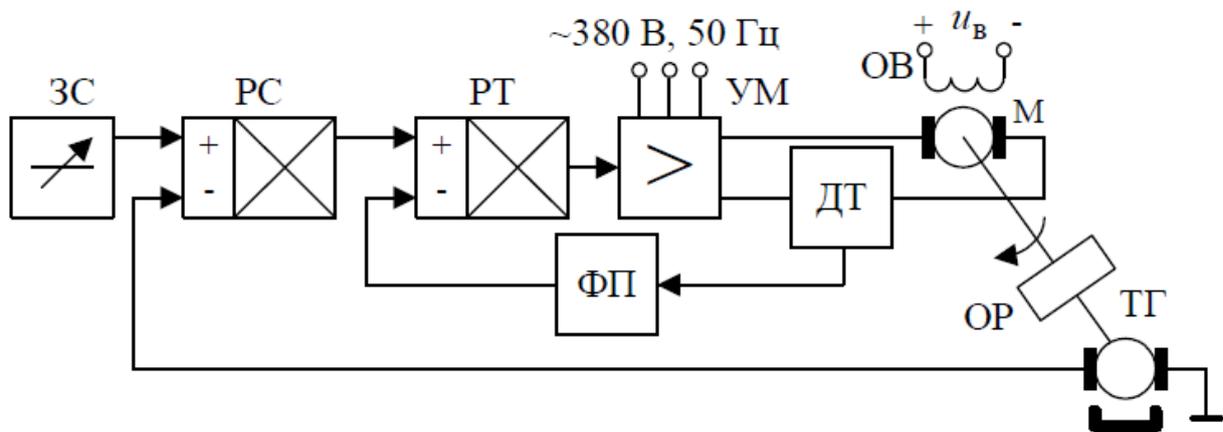


Рис. 5.1. Функциональная схема автоматической системы регулирования скорости с нелинейной обратной связью по току

Система содержит:

ЗС - задатчик скорости;

РС - регулятор скорости;

РТ - регулятор тока;

УМ - усилитель мощности;

ДТ - датчик тока;

ФП - функциональный преобразователь;

М - двигатель постоянного тока (ОВ — обмотка возбуждения,

$U_{в}$ - напряжение питания обмотки возбуждения);

ОР - объект регулирования;

ТГ - тахогенератор.

На рисунке 5.2 изображена структурная схема системы регулирования скорости [1].

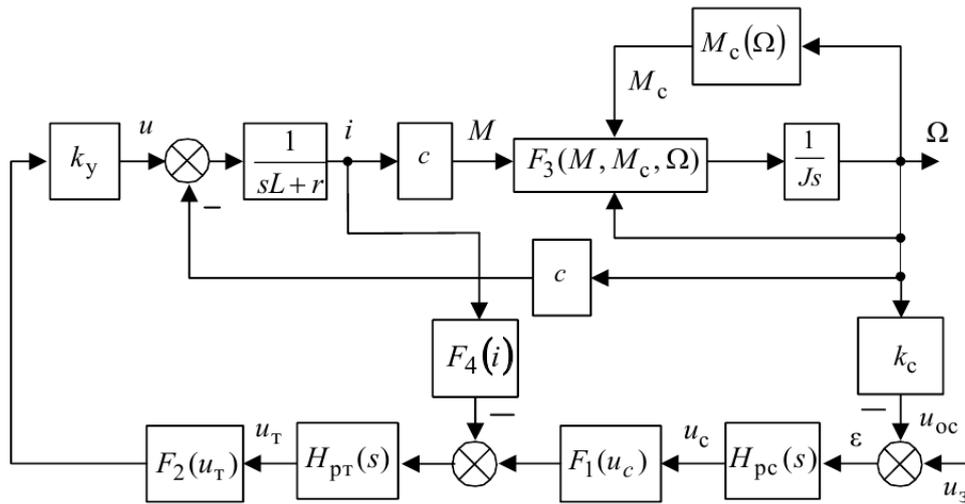


Рис. 5.2. Структурная схема системы регулирования скорости

На схеме рис 5.2 обозначено:

u_3 - сигнал задания;

ε - ошибка регулирования;

$H_{pc}(s)$ - передаточная функция пропорционально - интегрального регулятора скорости;

$$H_{pc}(s) = \frac{k_{pc}(T_{pc}s + 1)}{T_{pc}s};$$

k_{pc} , T_{pc} - коэффициент передачи и постоянная времени регулятора скорости;

u_c - выходной сигнал регулятора скорости без учета ограничения;

$F_1(u_c)$ - нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора скорости;

$$F_1(u_c) = \begin{cases} u_c & \text{при } |u_c| \leq u_m; \\ -u_m & \text{при } u_c \leq -u_m; \\ +u_m & \text{при } u_c \geq u_m; \end{cases}$$

u_m - максимального значение выходного сигнала регулятора скорости $u_m=10В$;

$H_{прт}(s)$ - передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора тока;

$$H_{\text{PT}}(s) = \frac{k_{\text{PT}}(T_{\text{PT}}s + 1)}{T_{\text{PT}}s};$$

k_{PT} , T_{PT} - коэффициент передачи и постоянная времени пропорционально-интегрального регулятора тока;

u_{T} - выходной сигнал регулятора тока без учета ограничения;

$F_2(u_{\text{T}})$ - нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора тока;

$$F_2(u_{\text{T}}) = \begin{cases} u_{\text{T}} & \text{при } |u_{\text{T}}| \leq u_{\text{M}}; \\ -u_{\text{M}} & \text{при } |u_{\text{T}}| \leq -u_{\text{M}}; \\ +u_{\text{M}} & \text{при } |u_{\text{T}}| \geq u_{\text{M}}; \end{cases}$$

k_{y} - коэффициент передачи усилителя мощности;

u - выходное напряжение усилителя мощности;

r , L - активное сопротивление и индуктивность якорной обмотки двигателя;

i - ток якорной обмотки;

c - конструктивная постоянная двигателя;

J - момент инерции механической нагрузки, приведенный к валу двигателя;

k_{c} - коэффициент передачи датчика скорости;

$M_{\text{c}}(\Omega)$ - зависимость момента нагрузки от скорости;

$$M_{\text{c}}(\Omega) = M_0 \operatorname{sgn} \Omega;$$

M_0 - момент трения покоя;

M - электромагнитный момент двигателя;

$F_3(M, M_{\text{c}}, \Omega)$ - нелинейная зависимость, моделирующая торможение двигателя за счет сил трения;

$$F_3(M, M_{\text{c}}, \Omega) = \begin{cases} M - M_{\text{c}} & \text{при } \Omega \neq 0; \\ 0 & \text{при } |M| - |M_{\text{c}}| < 0 \text{ и } \Omega = 0; \end{cases}$$

$F_4(i)$ - статическая характеристика функционального преобразователя;

$$F_4(i) = k_T (i + \alpha i^2 \operatorname{sgn} i);$$

k_T - коэффициент передачи датчика тока;

α - коэффициент пропорциональности.

По функциональной и структурной схемам, приведенным выше была разработана модель системы автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока в среде MATLAB (Рис. 5.3).

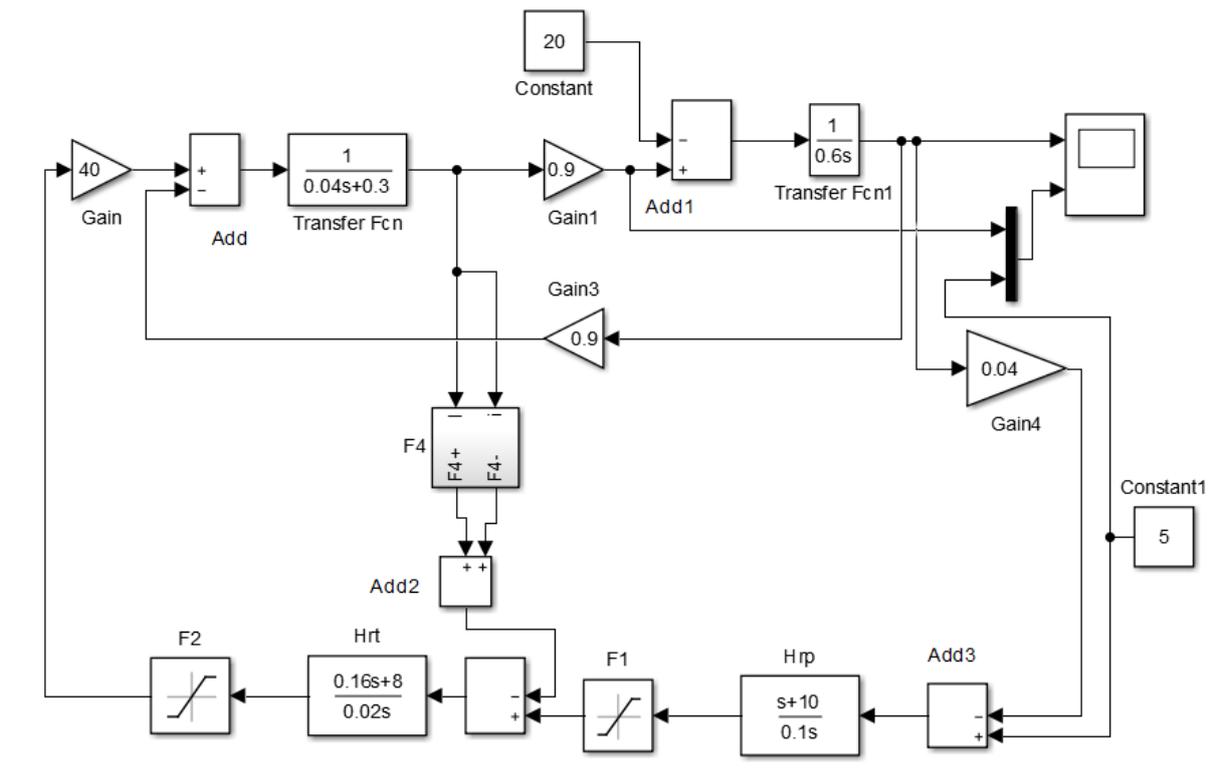


Рис. 5.3. Модель системы автоматического регулирования в среде MATLAB

В данной схеме были реализованы все узлы автоматической системы регулирования при помощи Simulink.

Рассмотрим некоторые блоки модели более детально:

Блок F1 (Рис. 5.4)

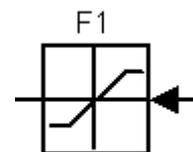
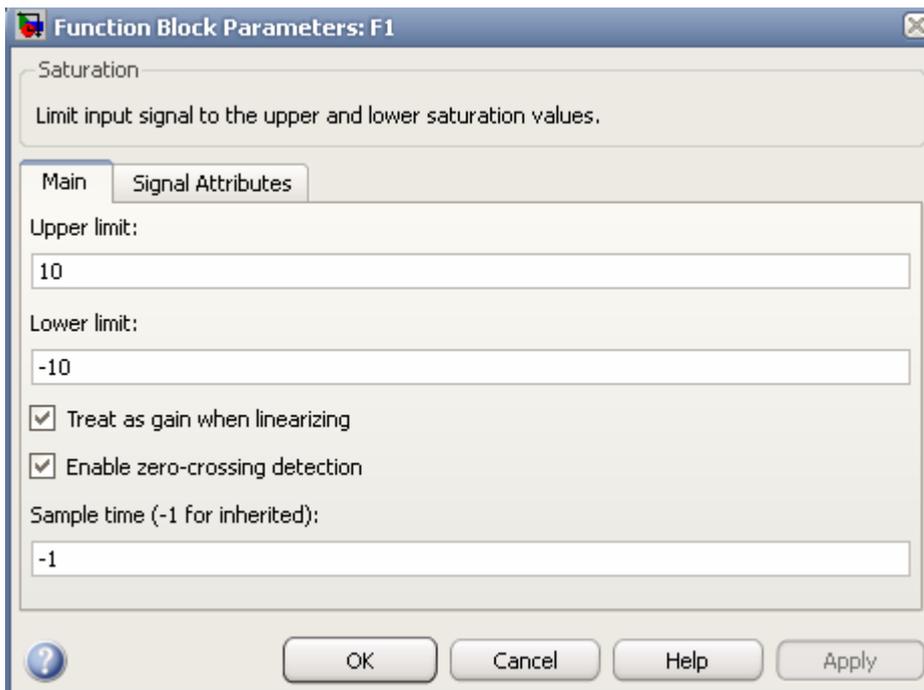


Рис. 5.4. Блок ограничения максимального значения

Блок является ограничителем, максимальные значения в нашем случае +10 и -10.

Блок F2 аналогичен блоку F1.

На рисунке 5.5 представлена модель которая реализует нелинейную обратную связь.

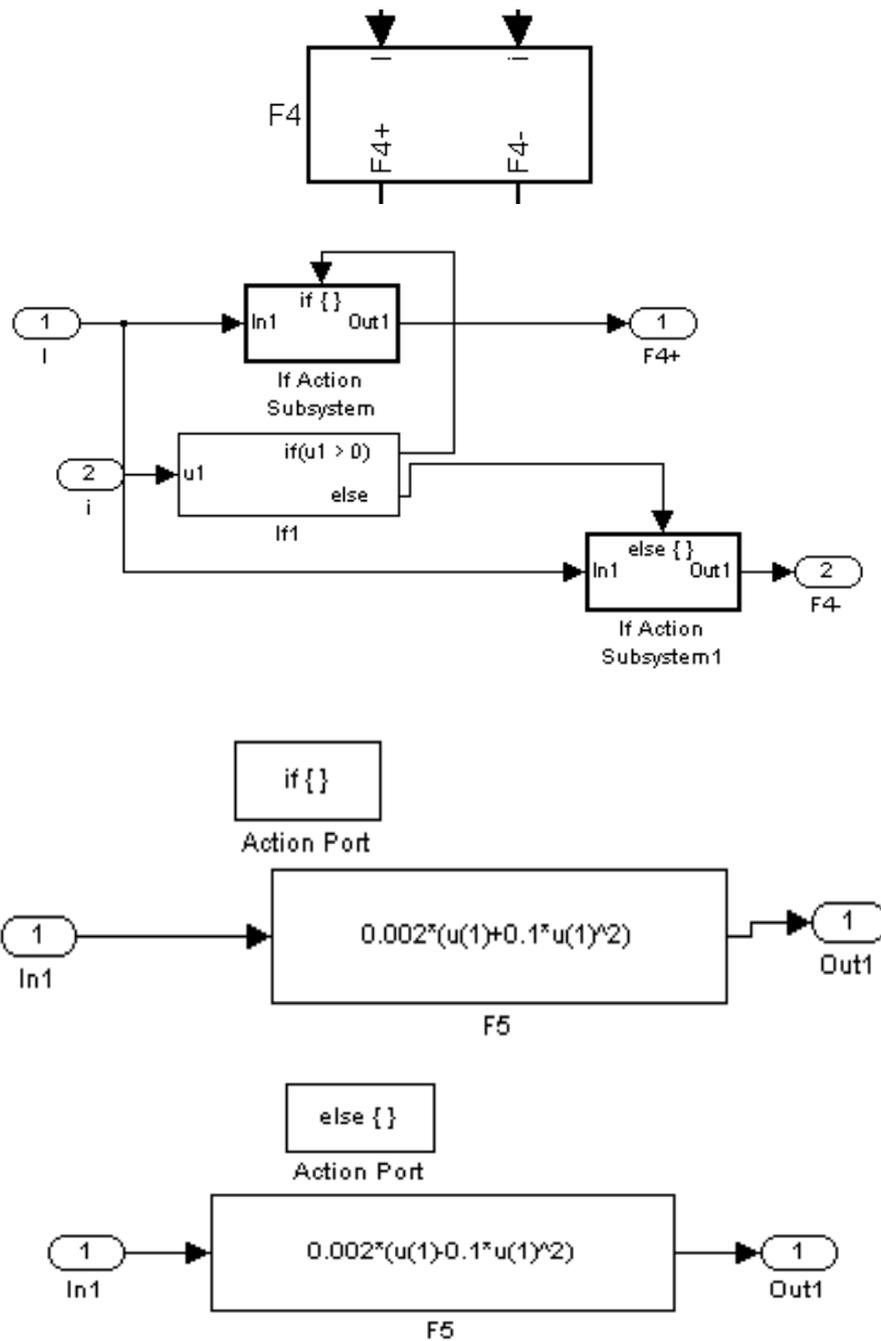


Рис. 5.5. Модель нелинейной обратной связи

После запуска моделирования был получен переходный процесс (Рис. 5.6):

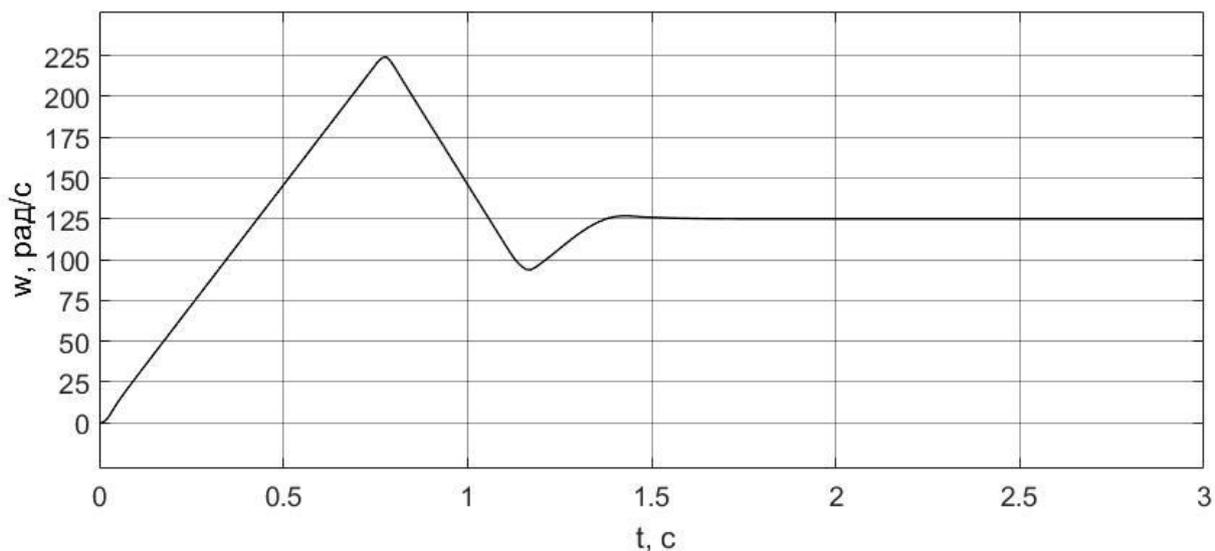


Рис. 5.6. Зависимость скорости ДПТ от времени

Рассмотрим настройку параметров ПИ-регулятора с использованием блока «Check StepResponseCharacteristics».

В Matlab есть встроенные инструменты оптимизации настроек регулятора по заданной форме переходного процесса. Для настройки ПИ-регулятора используется блок «Check StepResponseCharacteristics». Этот инструмент, который представляет из себя набор блоков, разработанных для использования с SIMULINK, автоматически настраивает параметры моделируемых систем, полагаясь на определённых пользователем ограничениях на их временные характеристики. Модель системы приведена на рисунке 5.7.

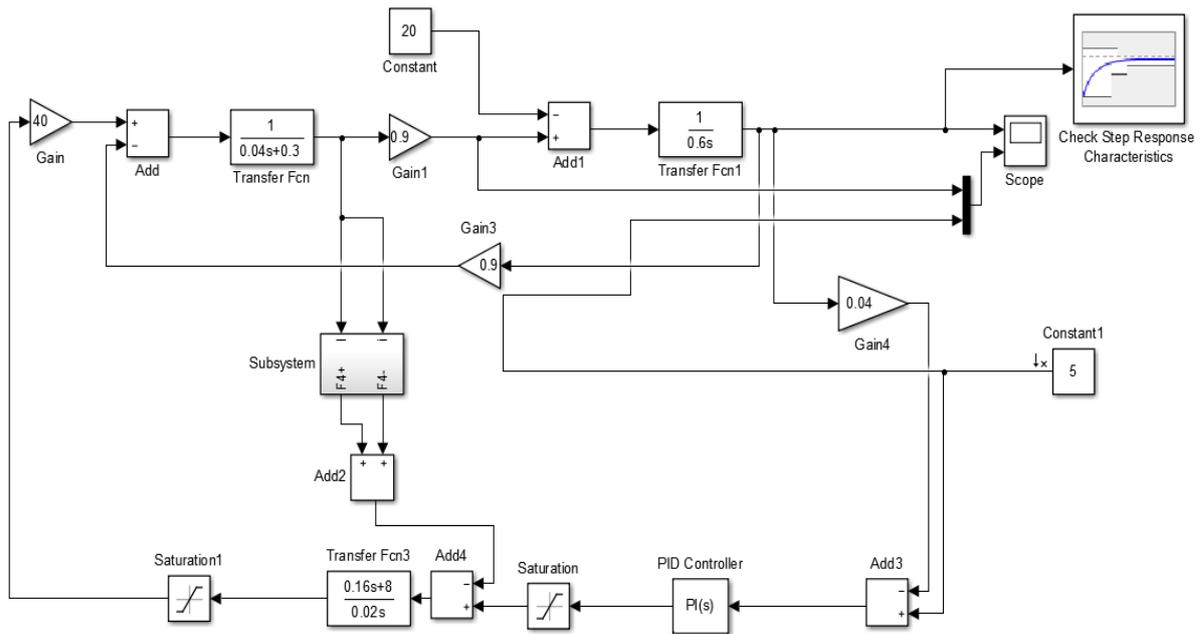


Рис. 5.7. Схема регулирования скорости ДПТ с ПИ регулятором

Зададим начальные параметры ПИ регулятора: $K_p=1$, $K_i=1$.

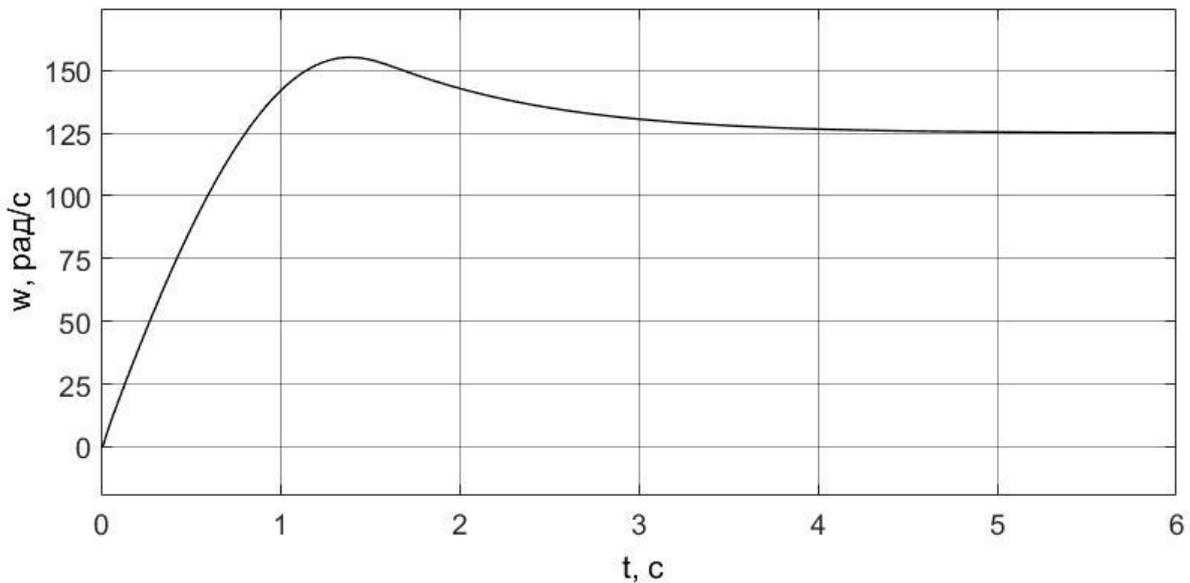


Рис. 5.8. Зависимость скорости ДПТ от времени с коэффициентами $K_p=K_i=1$

Рассмотрим подробнее параметры настройки блока оптимизации «Check Step Response Characteristic» (см. Рис. 5.9.)

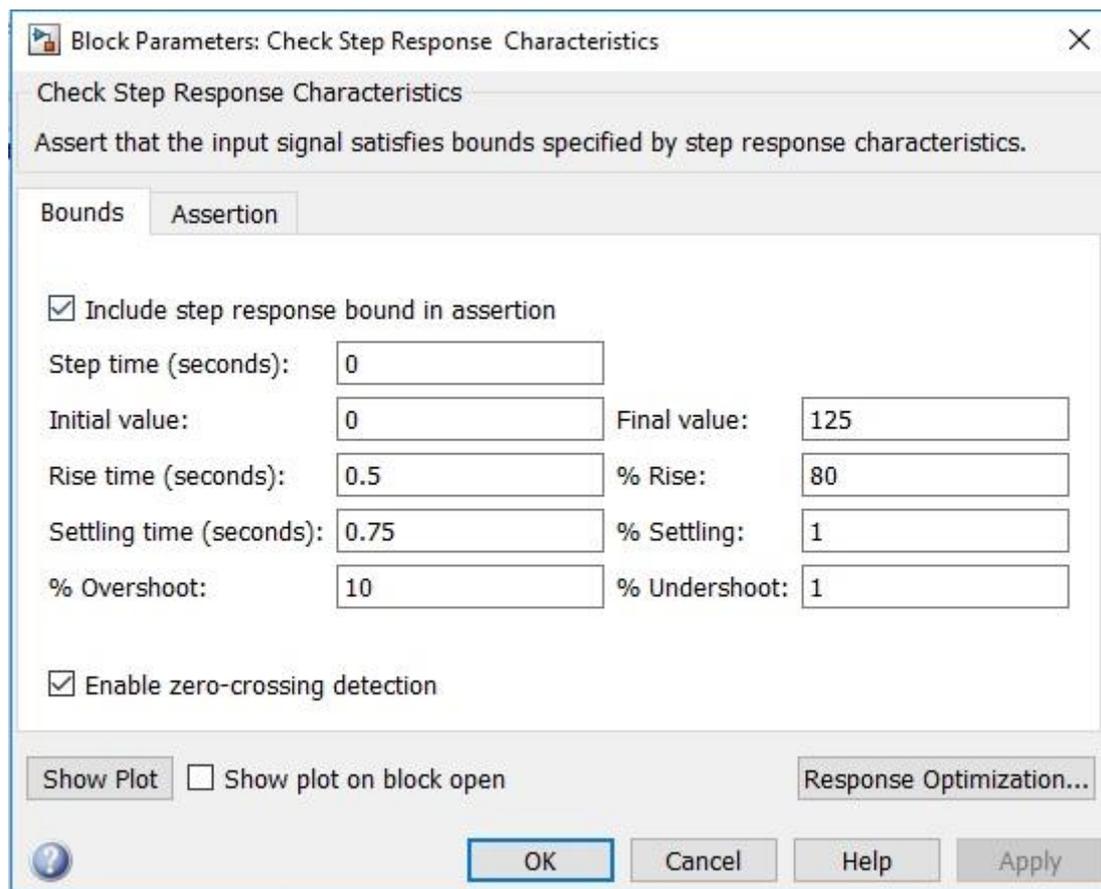


Рис. 5.9. Параметры блока оптимизации

Параметры блока «Check Step Response Characteristic» содержат в себе численные значения параметров «коридора», в который должна зайти кривая переходного процесса. Время указано в секундах, установившееся значение в абсолютных единицах, амплитуда для «коридора» указывается в процентах. Для просмотра полученного «коридора» можно использовать иконку «Response Optimization».

Далее появится графическое представление заданных численных значений для коридора. Заданный коридор можно корректировать прямо на графике. Для этого необходимо мышью передвигать прямые на графике (рис. 5.10).

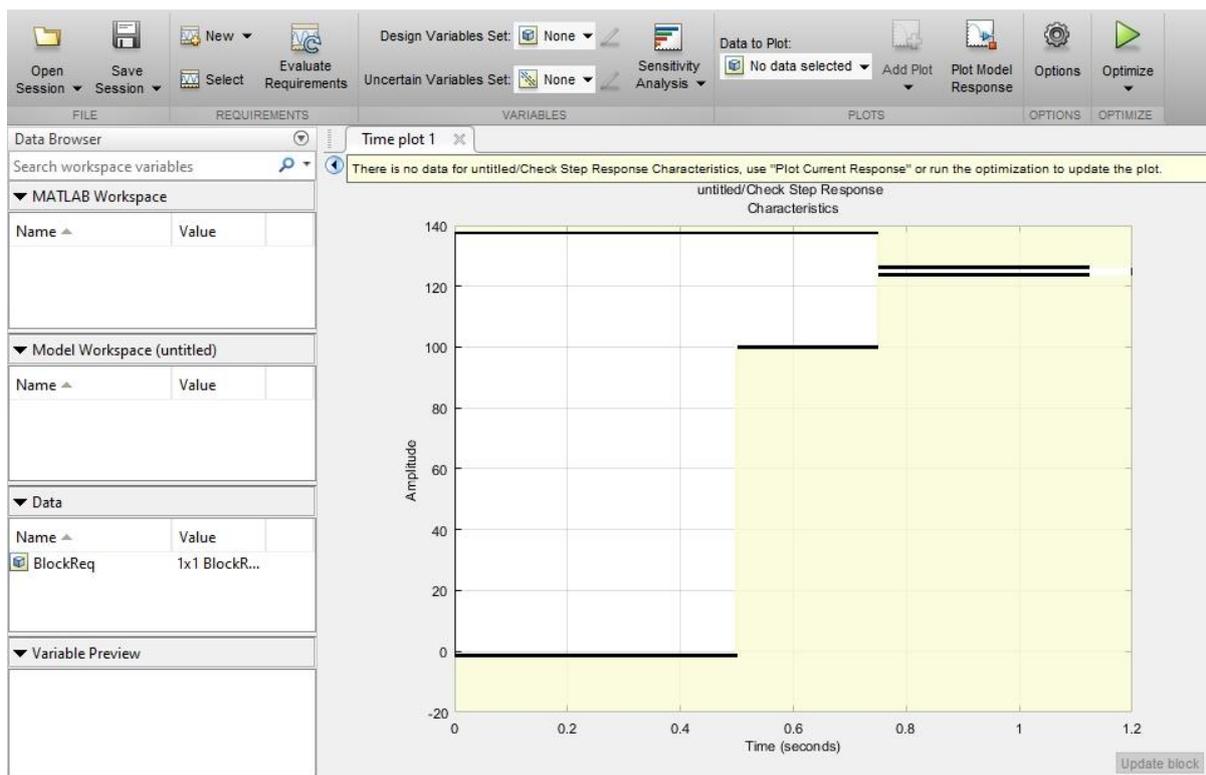


Рис. 5.10. Коридор параметров оптимизации

Для выбора переменных оптимизации необходимо нажать иконку «CREATE NEW SET OF DESIGN VARIEBLES».

Укажем в правом поле на переменные K_p , K_i , K_d и при помощи стрелки переместим их в левое поле. Когда все необходимые переменные появятся в левом поле нажмем кнопку «ОК» см. Рис. 5.11.

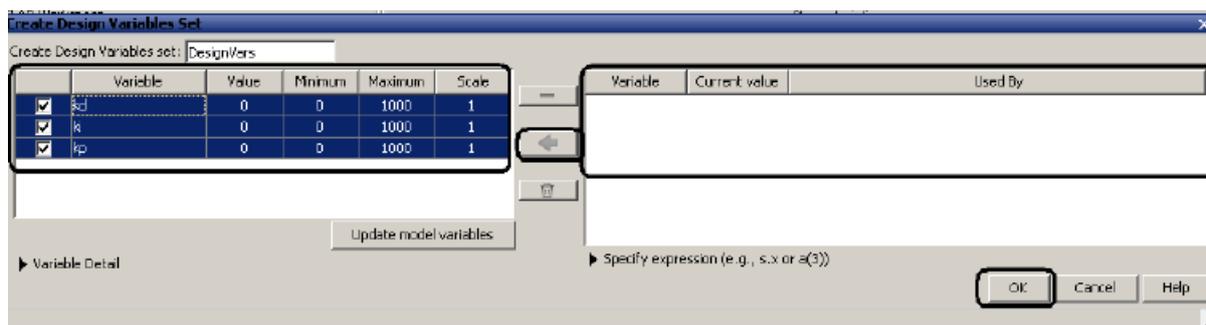


Рис. 5.11. Выбор переменных для оптимизации

Для запуска процесса оптимизации необходимо нажать кнопку «Optimize». После настройки получаем оптимальные параметры ПИ-регулятора $K_p=4,9119$, $K_i=0,2105$. Результат оптимизации параметров

регулятора приведен на рисунке 5.12. Для достижения наилучшего эффекта можно постепенно сужать параметры коридора и посмотреть сможет ли оптимизатор подобрать настройки.

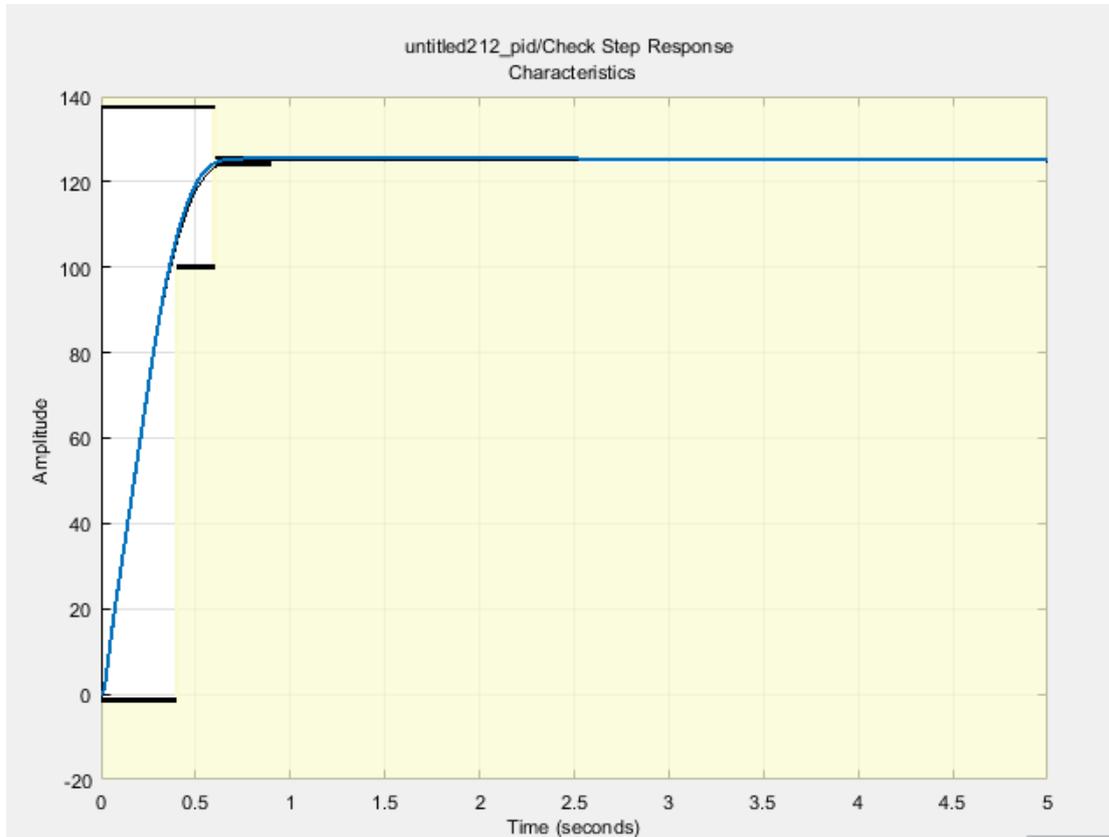


Рис. 5.12. Результат оптимизации параметров регулятора

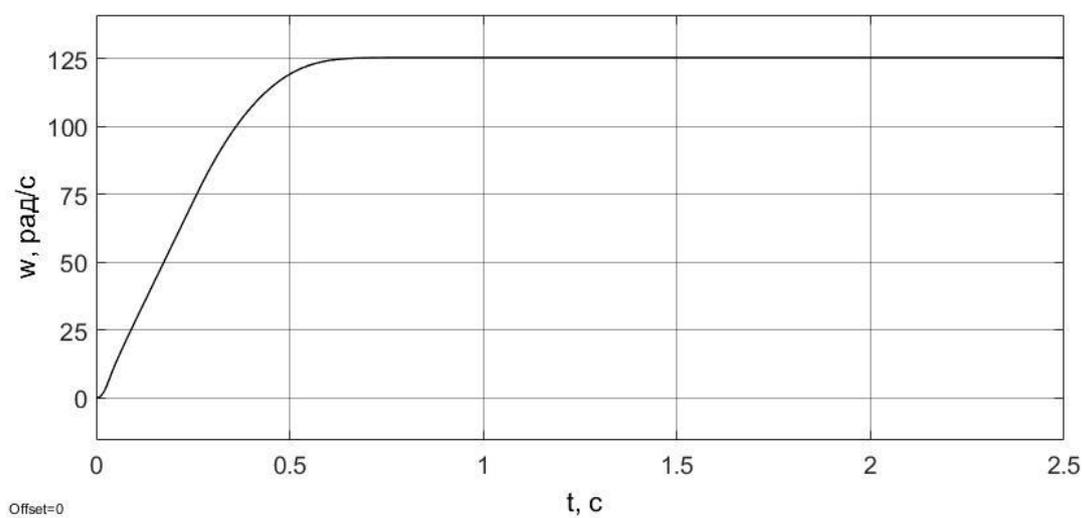


Рис. 5.13. Оптимальные параметры ПИ-регулятора $K_p=4,9119$, $K_i=0,2105$

Сравним характеристики. Исходная характеристика и оптимальная представлены на рисунке 5.14.

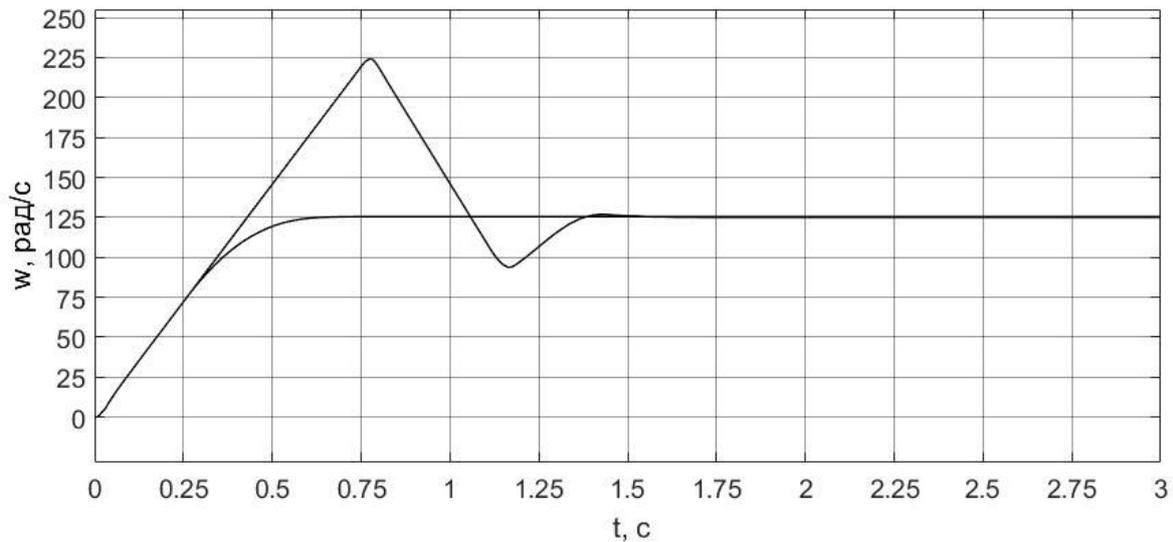


Рис. 5.14. Сравнение характеристик

Перерегулирование уменьшилось с $\frac{225-125}{125} \cdot 100\% = 80\%$ до $\frac{125,01-125}{125} \cdot 100\% = 0,008\%$. Время переходного процесса снизилось с 1,47 с до 0,58 с.

Для расчета статических характеристик системы, зависимости тока двигателя и ошибки регулирования от момента нагрузки составим модель (Рис. 5.15) и программу.

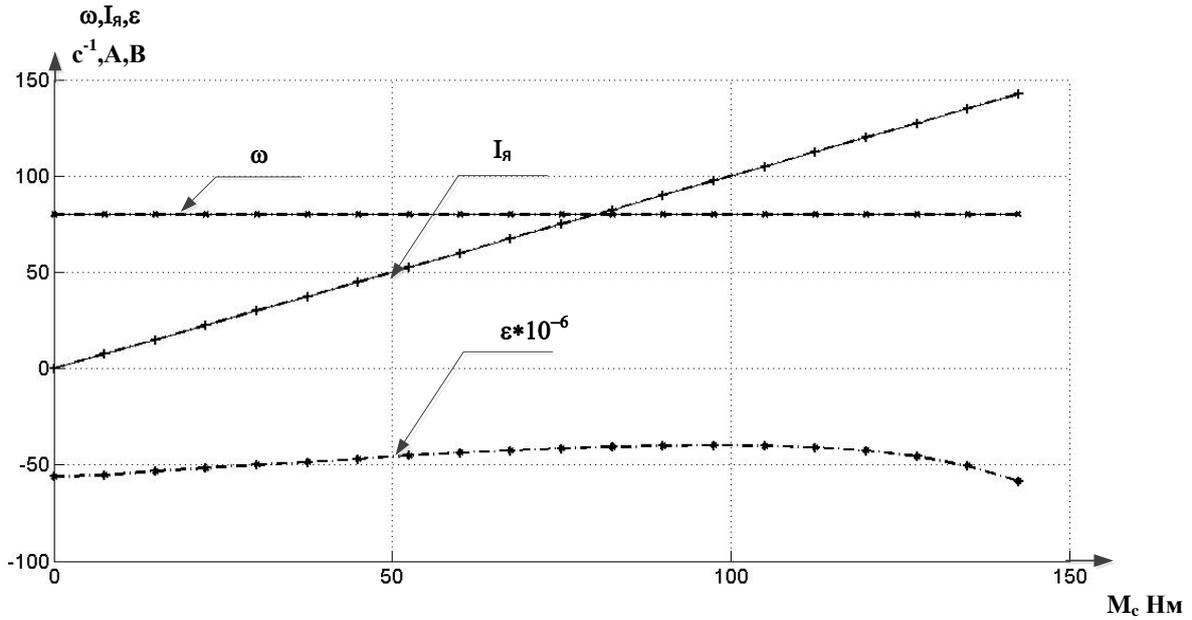


Рис. 5.16. Зависимости скорости, тока якоря и ошибки регулирования от момента сопротивления

Модель расчета статических характеристик системы, зависимости скорости двигателя и ошибки регулирования от напряжения задания представлена на рисунке 5.17.

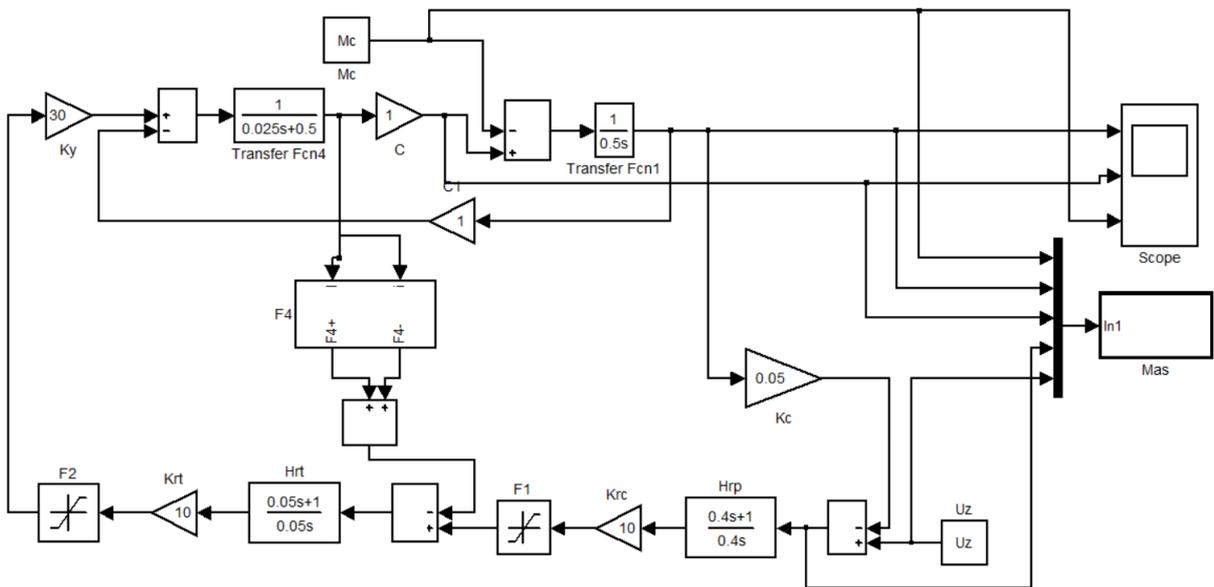


Рис. 5.17. Модель расчета статических характеристик системы

```

Код программы
%fork1=0:1:2;
%Mc=10*k1;
    Mc=0;
    for k=0:1:20;
        Uz=2+1*k;
        sim('temaUz1')
        A(k+1,1)=Out1(1);% Момент сопротивления.
        A(k+1,2)=Out1(2);% Скорость.
            A(k+1,3)=Out1(3);% Токякоря.
        A(k+1,4)=Out1(4)*10e10;% ошибка
            A(k+1,5)=Out1(5);% Напряжение задания.
    end
    plot(A(1:k,5),A(1:k,2),['K','x','-'])
        hold on;
        %plot(A(1:k,5),A(1:k,3),['K','+','-'])
        grid on;
        hold on;
        plot(A(1:k,5),A(1:k,4),['K','*','-'])
    hold on;
        %end

```

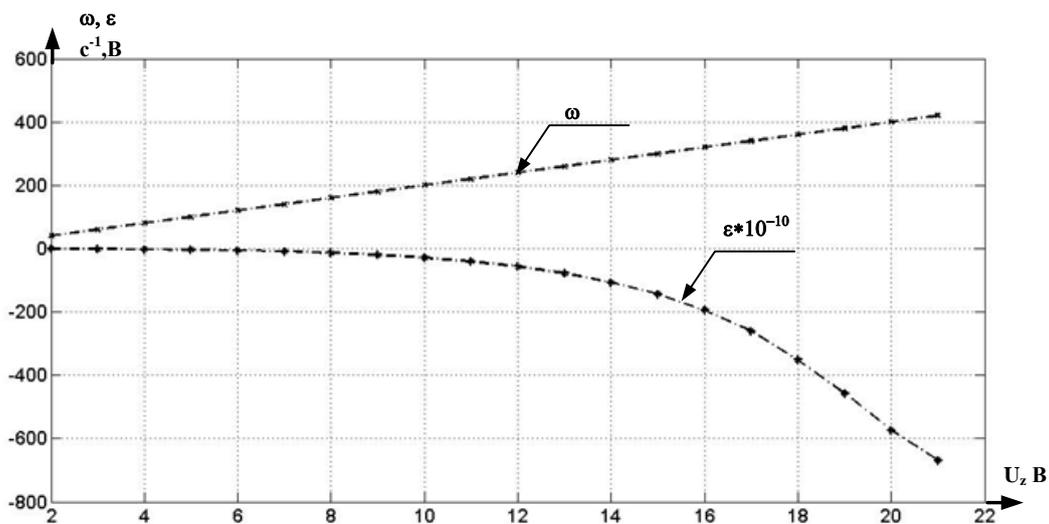


Рис. 5.18. Зависимость скорости и ошибки от сигнала задания

Из полученных характеристик видно, что с увеличением сигнала задания, увеличивается ошибка регулирования.

Рассмотрим расчет частотных характеристик системы с помощью функции Matlab «Analysis-ControlDesing-LinearAnalysis»

Simulink имеет широкие возможности для реализации методов теории автоматического регулирования при исследовании динамики автоматических систем. Исследуемая система задается в виде структурной схемы, набираемой из типовых звеньев, имеющихся в библиотеке Simulink. При использовании методов линейного анализа Simulink производит для заданной структуры (модели) расчет передаточной функции, частотных характеристик и переходного процесса и выдает результаты расчета в виде графиков [2].

Используя средство Linear Analysis линейного анализа систем, можно решать задачи по оценке их качества при проектировании регуляторов, а также выбирать тип регулятора и его настройку на основе сравнительного анализа вариантов с использованием частотных характеристик исследуемой системы [2].

С помощью этой функции получаем частотные характеристики линеаризованной системы. Для этого необходимо указать блок Input Point на входе и блок Output Point на выходе системы, как показано на рисунке 5.19.

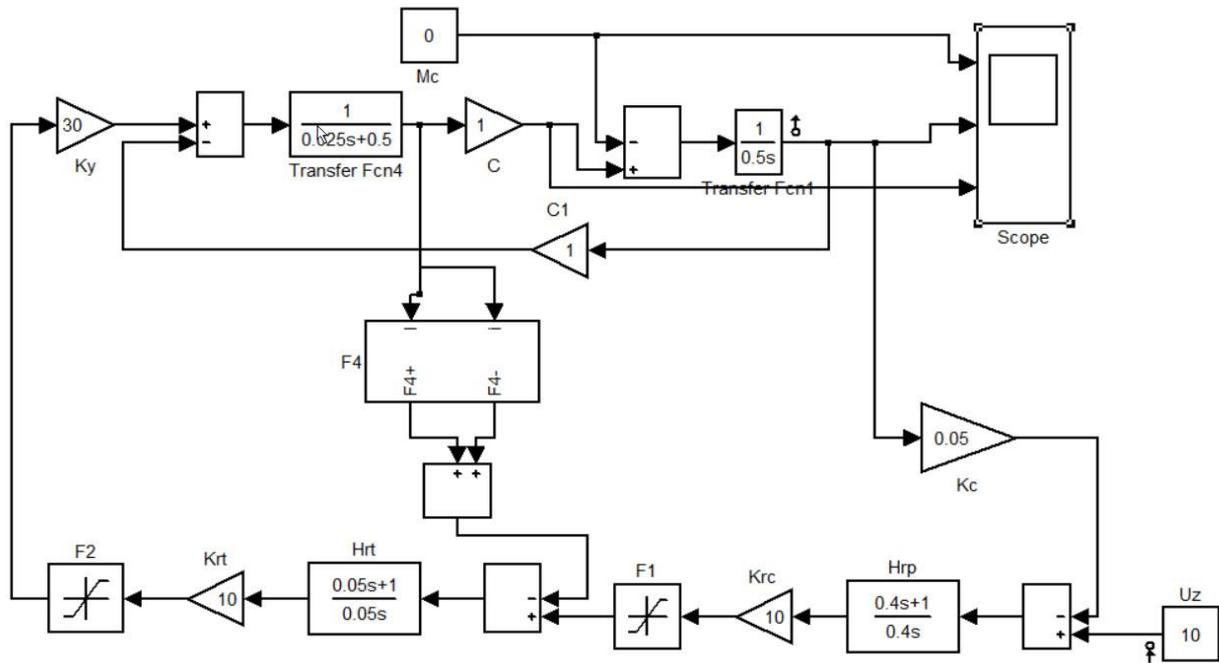


Рис. 5.19. Модель системы регулирования скорости ДПТ для расчета характеристик

После обозначения точек входа и выхода получаем переходную и логарифмические характеристики, годограф линеаризованной системы.

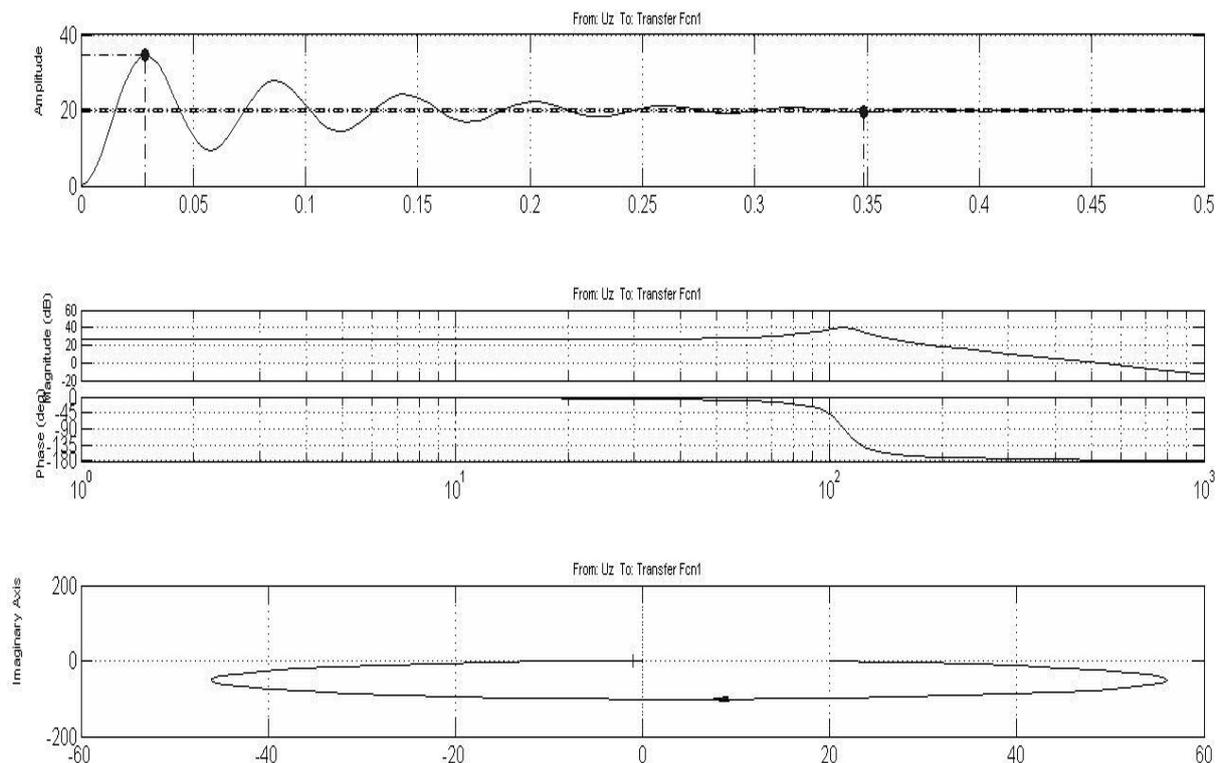


Рис. 5.20. Переходная, логарифмические характеристики и годограф линеаризованной системы

Рассмотрим нейросетевую модель системы управления электроприводом.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) — математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей — сетей нервных клеток живого организма [10]. Это понятие возникло при изучении процессов, протекающих в мозге, и при попытке смоделировать эти процессы. ИНС представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов). Такие процессоры обычно довольно просты (особенно в сравнении с процессорами, используемыми в персональных компьютерах). Каждый процессор подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим процессорам. И, тем

не менее, будучи соединёнными в достаточно большую сеть с управляемым взаимодействием, такие локально простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных.

Рассмотрим обучение нейроконтроллера [2]. Обучение нейронной сети с учителем предполагает, что для каждого входного вектора из обучающего множества существует требуемое значение выходного вектора, называемого целевым. Эти вектора образуют обучающую пару. Веса сети изменяют до тех пор, пока для каждого входного вектора не будет получен приемлемый уровень отклонения выходного вектора от целевого.

Для того, чтобы обучить нейросеть, необходимо иметь эталонную систему (учителя), относительно которой будет проводиться тренировка. В качестве такой было выбрано апериодическое звено первого порядка (Рис. 5.21).



Рис. 5.21. Апериодическое звено первого порядка

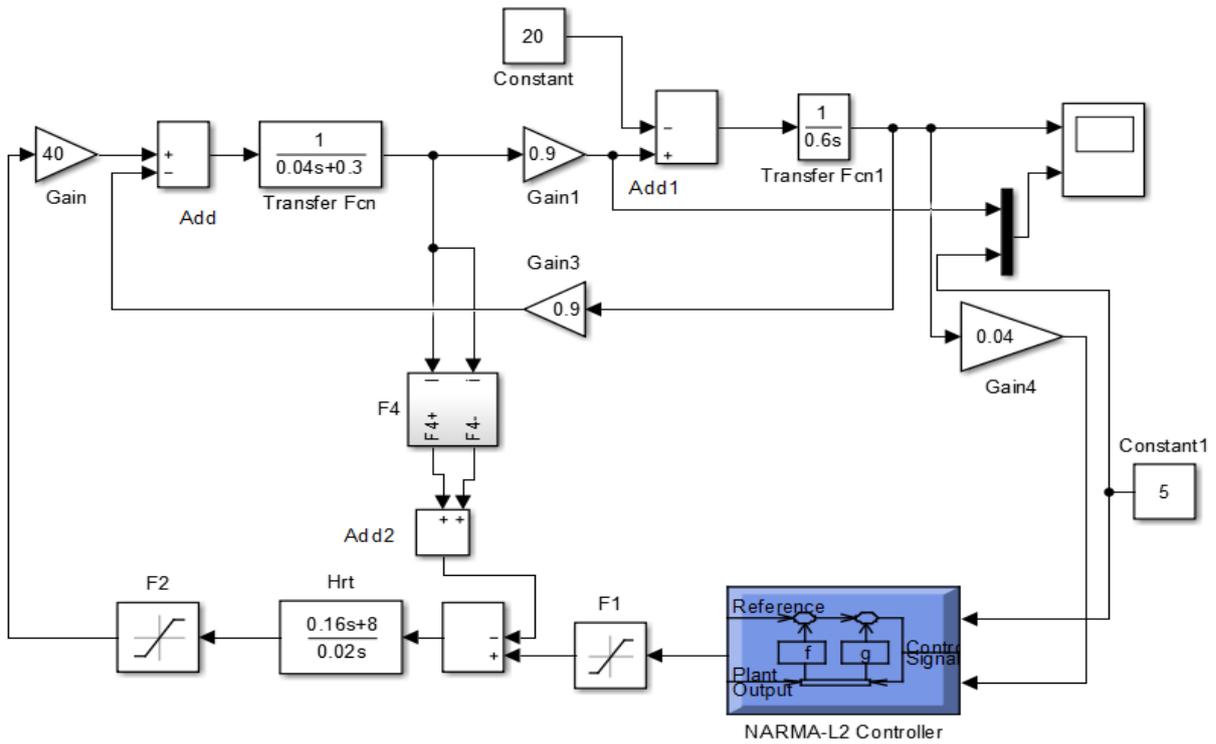


Рис. 5.22. Модель схемы, содержащая нейроконтроллер в качестве регулятора скорости

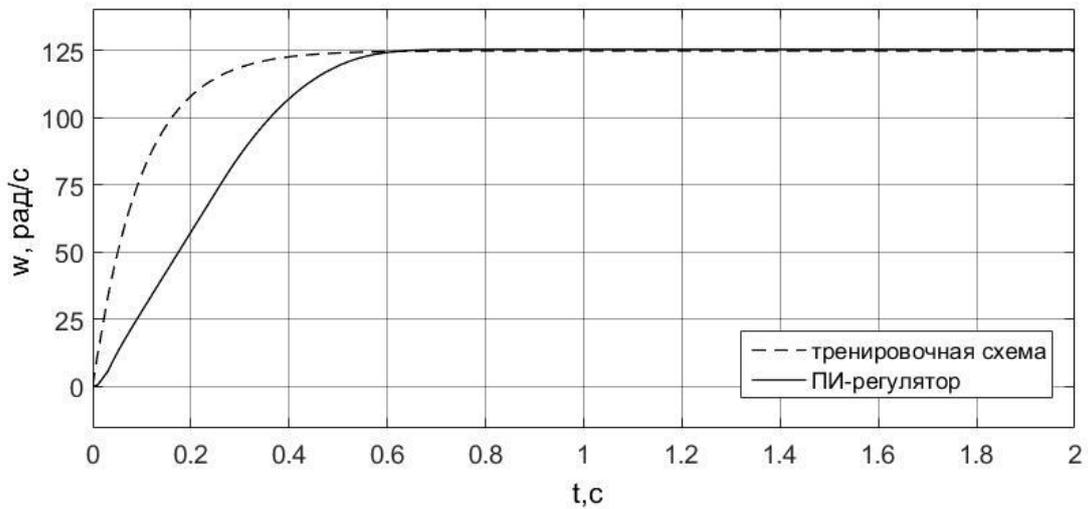


Рис. 5.23. Сравнение характеристик тренировочной схемы и ПИ-регулятора

Как видно из рисунка 5.23, тренировочная схема имеет лучшее время переходного процесса. То есть система, при тренировке должна получить большее быстродействие.

Рассмотрим панель настройки нейроконтроллера (рис. 5.24).

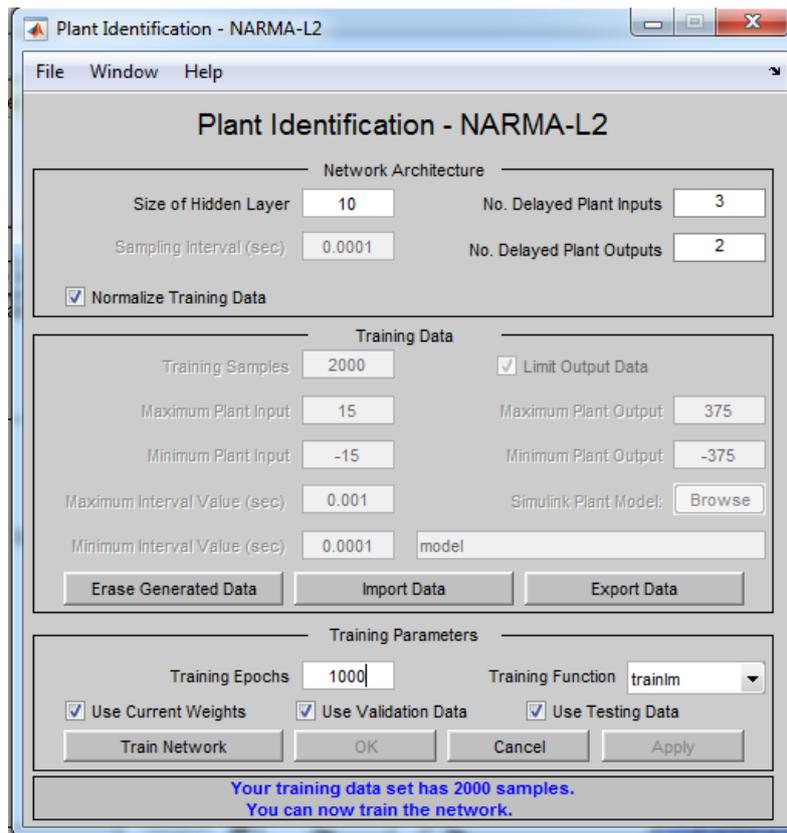


Рис. 5.24. Окно настройки нейросети

Процедура идентификации нейроконтроллера требует задания следующих параметров (Рис. 5.24):

- Size of Hidden Layer – размер скрытого слоя определяется количеством используемых нейронов;
- Sampling Interval – такт дискретности в секундах между двумя последовательными моментами съема данных;
- No. Delayed Plant Inputs – количество элементов запаздывания на входе модели;
- No. Delayed Plant Outputs – количество элементов запаздывания на выходе модели;
- Normalize Training Data – окно контроля нормирования обучающих данных к диапазону;
- Training Samples – длина обучающей выборки (количество точек съема информации);
- Maximum Plant Input – максимальное значение входного сигнала;

- Minimum Plant Input – минимальное значение входного сигнала;
- Maximum Interval Value (sec) – максимальный интервал идентификации в секундах;
- Minimum Interval Value (sec) – минимальный интервал идентификации в секундах;
- Limit Output Data – окно контроля, позволяющее ограничить объем выходных данных (только при включенном окне контроля будут доступны два следующих окна редактирования текста);
- Maximum Plant Output – максимальное значение выходного сигнала;
- Minimum Plant Output – минимальное значение выходного сигнала;
- Simulink Plant Model – задание модели Simulink с указанием входных и выходных портов, используемых при нейросетевой модели управляемого процесса;
 - Параметры обучения:
 - Training Epochs – количество циклов обучения;
 - Training function – задание обучающей функции;
 - Use Current Weights – окно контроля, позволяющее подтвердить использование текущих весов нейронной сети;
 - Use Validation/Testing for Training – выбор этих окон контроля означает, что 25 % данных из обучающей последовательности будет использовано для формирования контрольного и тестового множеств соответственно.

Результаты обучения нейроконтроллера представлены на рис. 5.25.

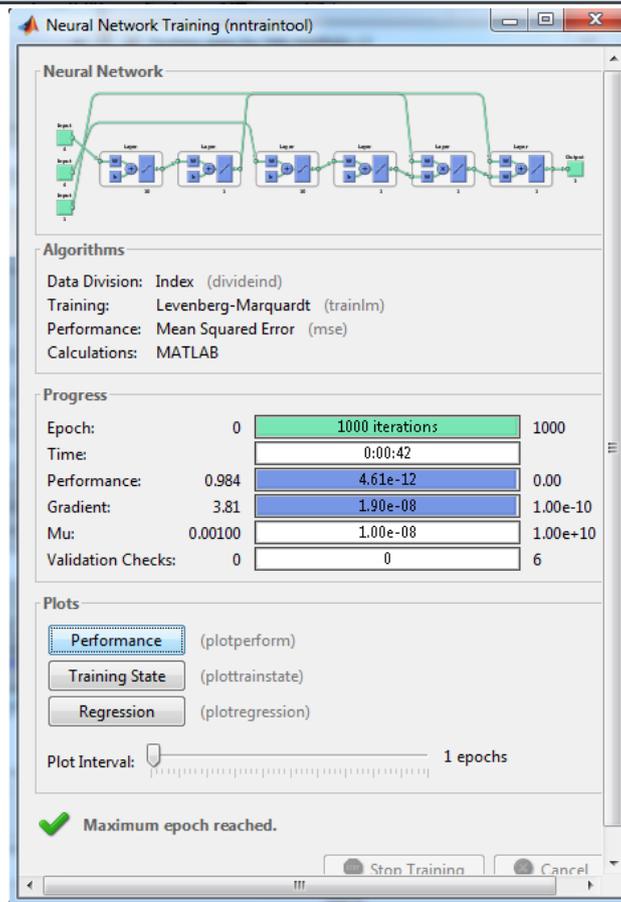
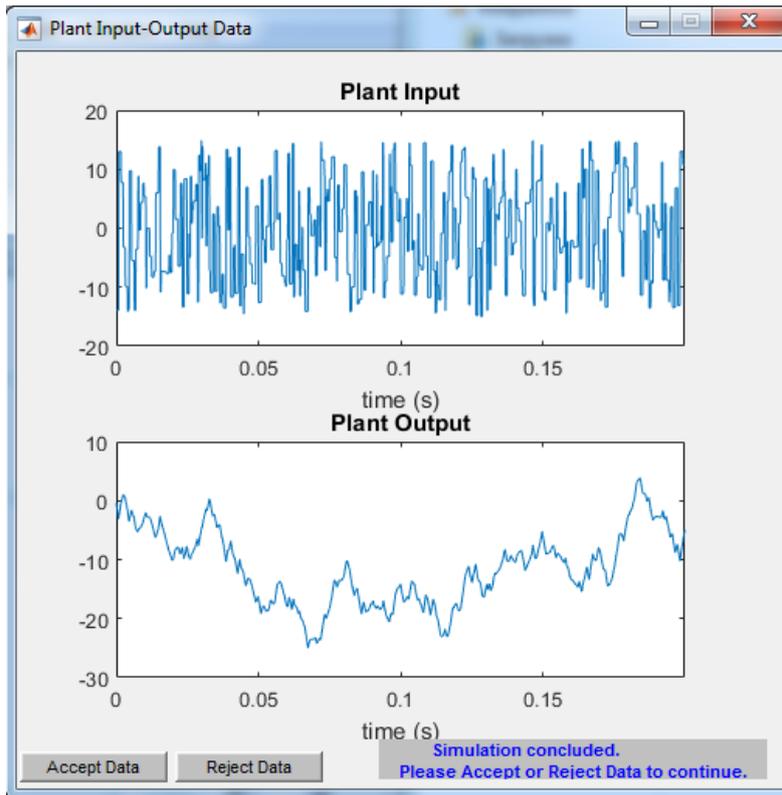


Рис. 5.25. Тестовые сигналы

Результаты моделирования представлены на рис.5.26. Из графика видно, что при использовании нейрорегулятора время переходного процесса стало меньше, чем при использовании ПИ-регулятора.

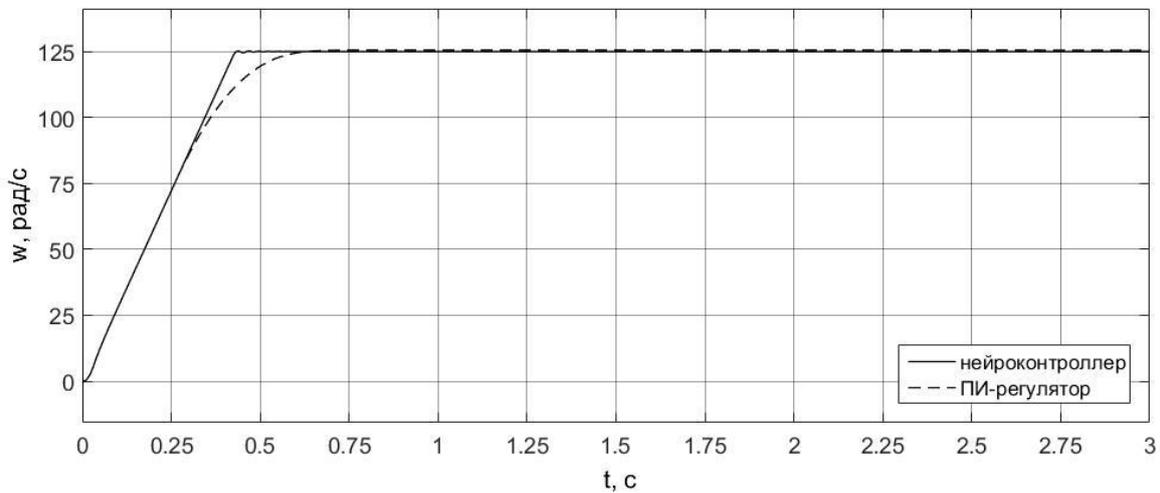


Рис. 5.26. Сравнение характеристик схемы с нейроконтроллером и с ПИ регулятором

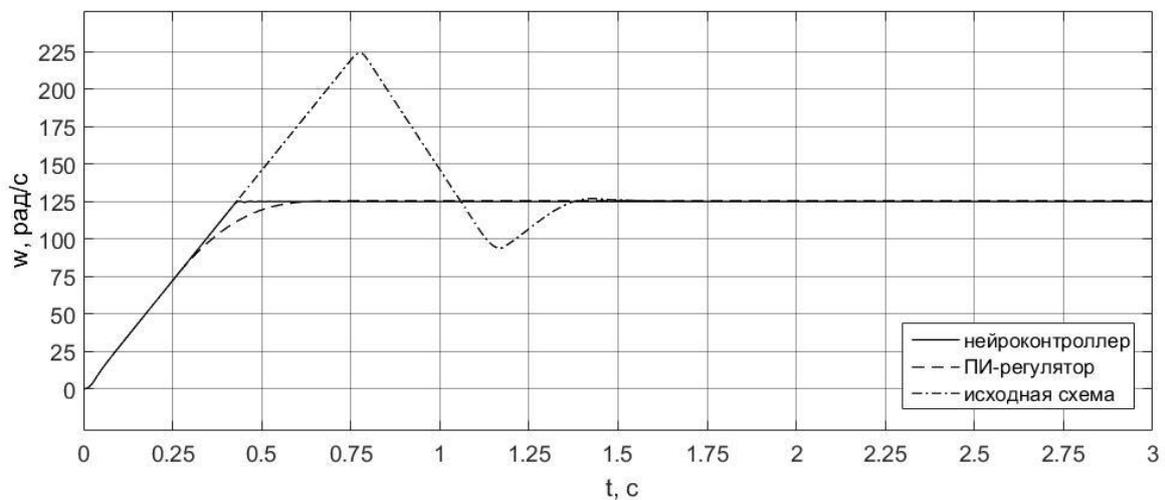


Рис. 5.27. Сравнение характеристик заданной схемы и схем с нейроконтроллером и с ПИ регулятором

Как видно из рисунка 5.27, схема с нейрорегулятором имеет самое высокое быстродействие, по сравнению с остальными системами.

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры использования системы в промышленности.
2. По каким критериям оценивается оптимальность системы?
3. Объясните назначение нелинейной обратной связи по току.
4. Для чего в структурной схеме был использован блок ограничивающий ток?
5. Почему разомкнутая система регулирования электропривода постоянного тока обладает малой жесткостью механической характеристики?

Практическое занятие 6

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ И ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Вентильный двигатель является одним из наиболее популярных управляемых электроприводов на данный момент на рынке [8, 9]. Причиной этого является то, что данные электроприводы обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами электроприводов. В частности, им присуща высокая надежность, повышенная перегрузочная способность по моменту, широкий диапазон частот вращения, высокий показатель КПД, а также возможность создания приводов различных габаритов. Данные электроприводы находят широкое применение как в различных областях промышленности, так и в области робототехники, транспорта, медицинской техники, аэрокосмической, бытовой и компьютерной техники.

При использовании вентильного электропривода, одной из самых распространенных задач является регулирование скорости его вращения, а также электромагнитного момента [8]. Для решения данной задачи используются достижения теории автоматического управления для создания многоконтурных систем управления с применением различных регуляторов. При этом главной задачей является составление

адекватной математической модели объекта управления, а также выбор наилучшей методики расчета параметров регулирования [8]. Данный подход уже много лет успешно используется на практике. Однако большой интерес представляет собой подход к управлению электроприводами, связанный с применением искусственных нейронных сетей (ИНН).

Системы управления на основе применения искусственных нейронных сетей являются перспективной альтернативой классическим методам управления [10].

Существует большое количество видов программного обеспечения, позволяющего пользователю работать с нейросетевыми концепциями. Программный пакет MATLAB, разработанный фирмой «The MathWorks», также предоставляет пользователям возможность работы с ИНС. В стандартную поставку MATLAB входит расширение «Neural Network Toolbox», которое предоставляет широкие возможности для работы с нейронными сетями различных типов [2]. Использование данного расширения совместно с другими средствами MATLAB, такими как пакет имитационного моделирования Simulink, открывает большие возможности для эффективного использования современных нейронных методов для решения самых различных инженерно-прикладных задач. В пакете «Neural Network Toolbox» представлены 3 нейросетевые структуры, которые реализованы в виде следующих нейроконтроллеров:

- контроллер с предсказанием (NN Predictive Controller);
- контроллер на основе эталонной модели (Model Reference Control);
- контроллер на основе авторегрессии со скользящим средним (NARMA-L2 Controller).

Рассмотрим цифровую модель вентильного двигателя с автономным инвертером, технические данные которого представлены описаны в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры исследуемого привода

| U1 (В) | R (Ом) | Ld (мГн) | Lq (мГн) | Φ_0 (Вб) | J (кг·м ²) | p | m |
|--------|--------|----------|----------|---------------|------------------------|---|---|
| 220 | 2,875 | 1,53 | 1,53 | 0,175 | $0,8 \cdot 10^{-3}$ | 4 | 3 |

Модель вентильного двигателя с автономным инвертером показана на рис. 6.1. Данная модель представляет собой двухконтурную систему регулирования скорости ВД с релейными регуляторами тока в неподвижных координатах.

В данной схеме синхронная машина на постоянных магнитах представлена блоком Permanent Magnet Synchronous Machine. Параметры настройки синхронной машины показаны на рис. 6.2.

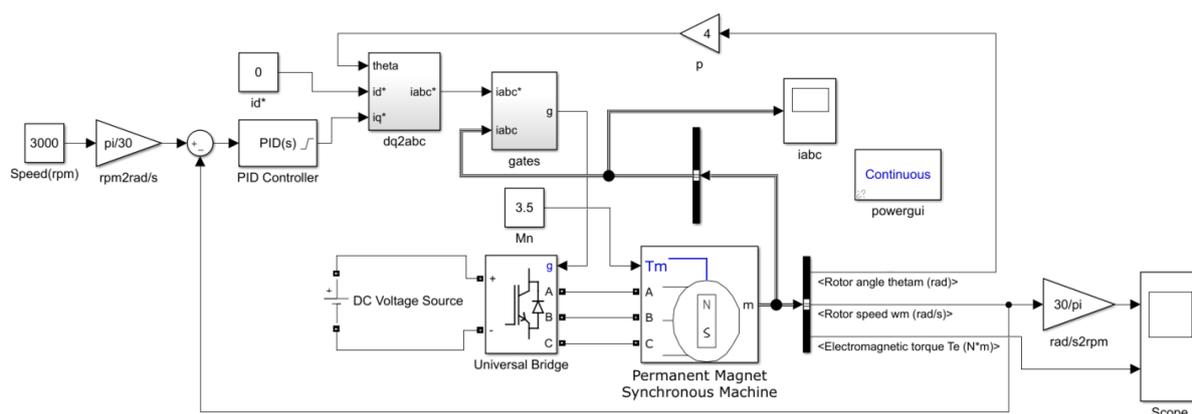


Рис. 6.1. Модель двухконтурной системы регулирования скорости ВД

Автономный инвертер представлен блоком Universal Bridge. Параметры настройки инвертора показаны на рис. 6.3. Данный блок симулирует работу автономного инвертора напряжения, собранного на силовых модулях IGBT, переключение которых происходит согласно вектору сигналов, поступающему на вход g.

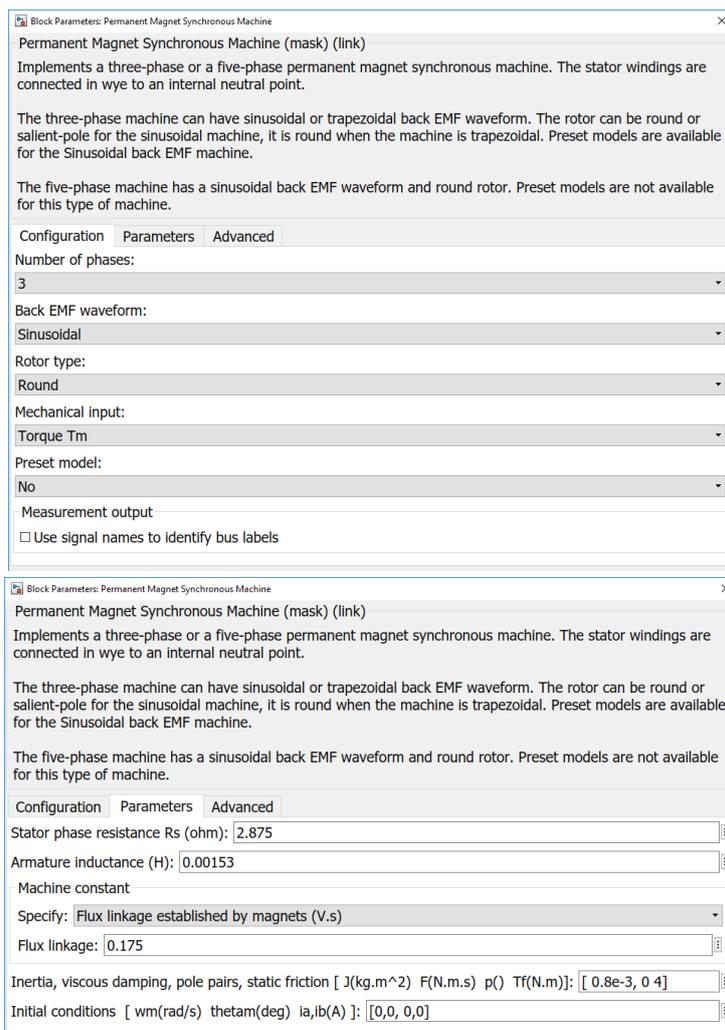


Рис. 6.2. Параметры настройки блока Magnet Synchronous Machine

Автономный инвертер представлен блоком Universal Bridge. Параметры настройки инвертора показаны на рис. 6.3. Данный блок симулирует работу автономного инвертора напряжения, собранного на силовых модулях IGBT, переключение которых происходит согласно вектору сигналов, поступающему на вход g.

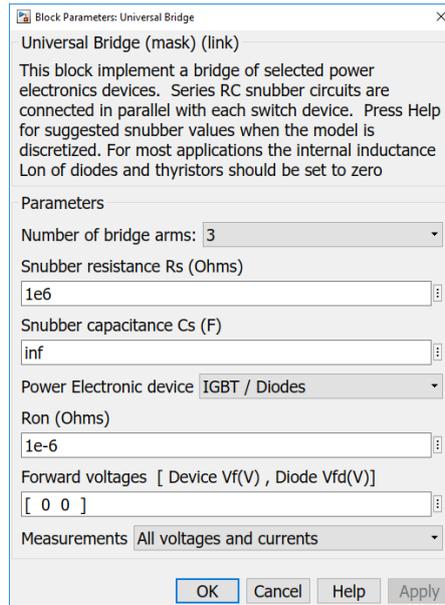


Рис. 6.3. Параметры настройки блока Universal Bridge

Блок dq2abc представляет собой блок преобразования вращающейся координатной системы (d,q) в неподвижную координатную систему (a,b,c) по закону (6.1).

$$\begin{cases} i_a = I_q \cdot \cos \theta + I_d \cdot \sin \theta ; \\ i_b = I_q \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_d \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\ i_c = I_q \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + I_d \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right). \end{cases} \quad (6.1)$$

Структура блока gates показана на рис. 6.4. Данный блок выполняет функцию релейного регулятора тока статора по трем фазам, а также выполняет функции системы управления инвертером, вырабатывая вектор сигналов, управляющих переключением вентилей автономного инвертора.

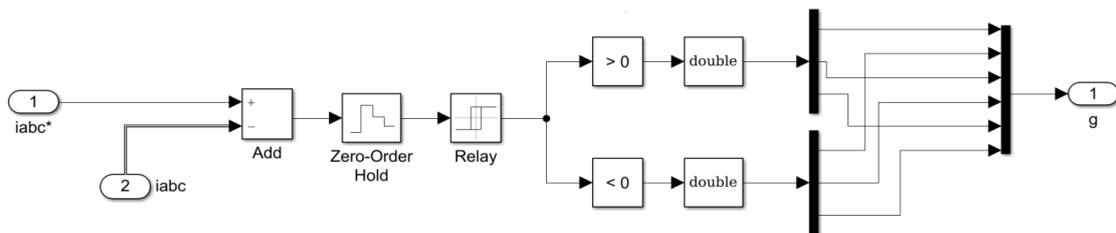


Рис. 6.4. Структура блока gates

Рассмотрим настройку ПИ-регулятора скорости. В пакете компьютерного моделирования Simulink пользователю предложены средства для настройки ПИД-регуляторов в автоматическом режиме, согласно указанным пользователем критериям качества. На рис. 6.5 показано окно настройки ПИ-регулятора в составе системы, показанной на рис. 6.1. В качестве структуры ПИ-регулятора была выбрана его классическая реализация. Данный регулятор также может использоваться в качестве ограничителя. В данной модели границы ограничения сигнала были установлены в значения $[-30;30]$.

Для реализации автоматической настройки регулятора его коэффициенты задаются в качестве переменных K_p и K_i . Данным переменным в командном окне MATLAB присваиваются начальные значения: $K_p = 1$;

$K_i = 0$. При данных значениях коэффициентов ПИ-регулятор не будет оказывать на работу системы никакого влияния и будет работать в режиме ограничителя.

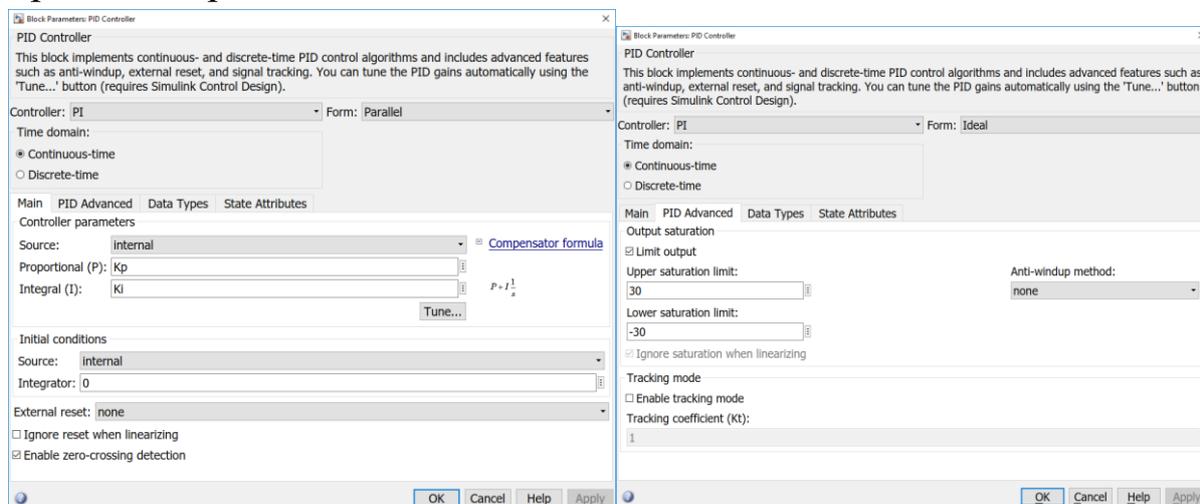


Рис. 6.5. Окно настройки ПИ-регулятора

Переходные характеристики системы по частоте вращения и электромагнитному моменту без скоростного регулятора показаны на рис. 6.6.

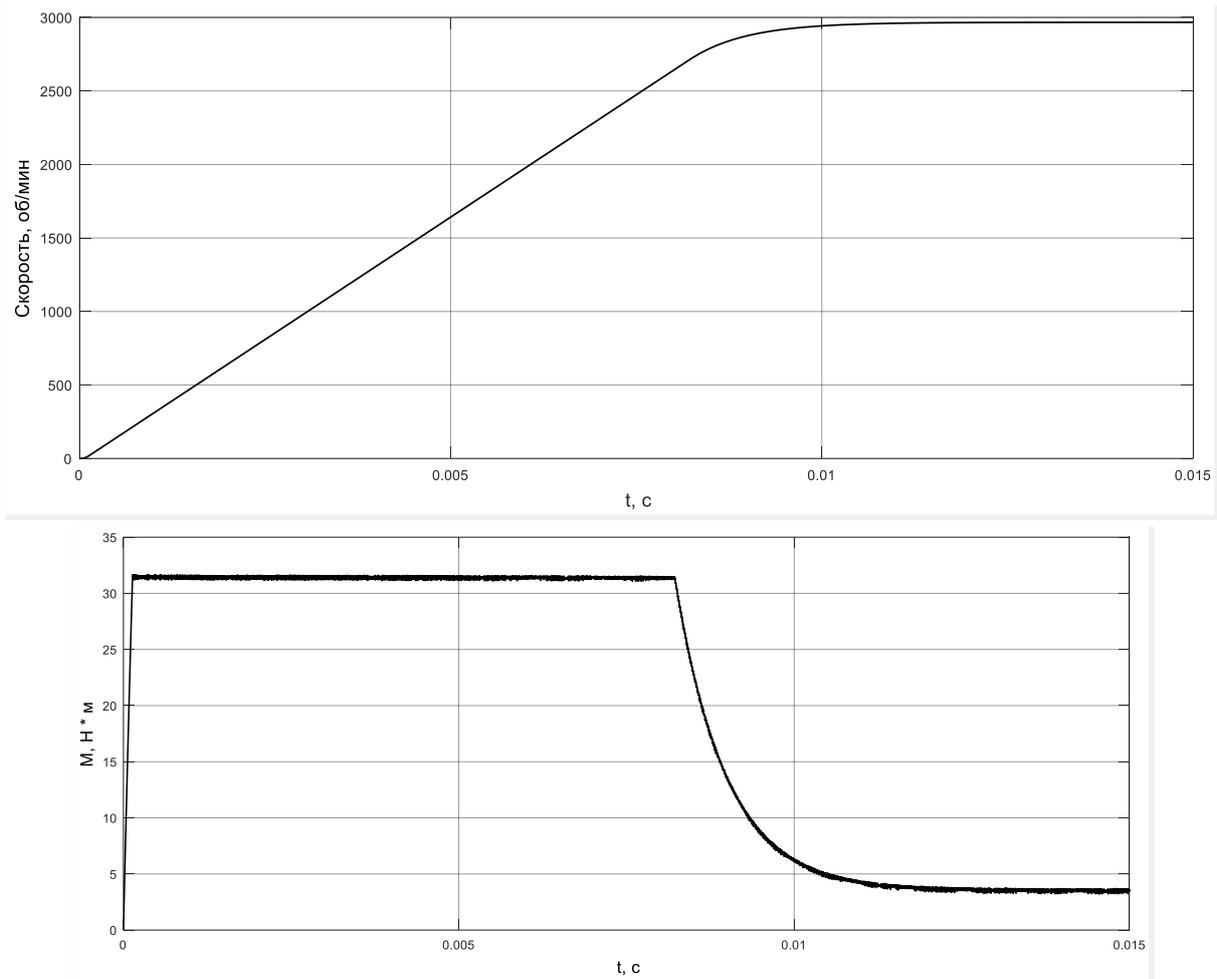


Рис. 6.6. Переходные процессы системы без регулятора

Автоматическая настройка ПИД-регулятора выполняется в блоке Check Step Response Characteristics (рис. 6.7).

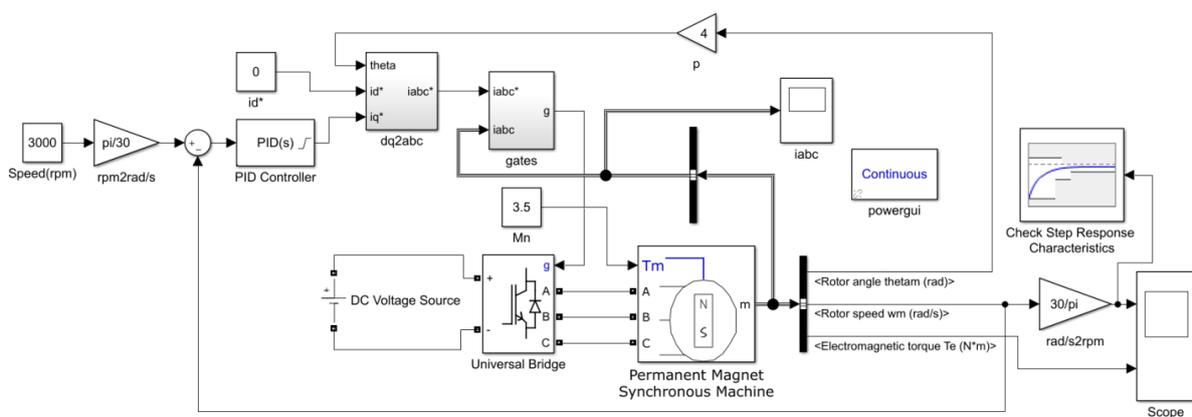


Рис. 6.7. Блок Check Step Response Characteristics в составе системы вентильного двигателя

Окно настройки блока Check Step Response Characteristics показано на рис. 6.8. В данном окне заданы следующие параметры:

- Step time (seconds) – время скачка входной ступенчатой функции в секундах;

- Initial value – первоначальное значение на выходе системы;

- Final value – конечное значение на выходе системы;

- Rise time (seconds) – время возрастания выходной функции до некоторого процентного соотношения от установившейся величины (указывается в параметре % Rise) в секундах;

- Settling time (seconds) – время переходного процесса в секундах;

- % Overshoot – перерегулирование в процентах;

- % Undershoot – уход функции в отрицательную область в процентах;

- % Rise – процентное соотношение от установившейся величины выходной функции, используется параметром Rise time;

- % Settling – процент отклонения установившейся величины от заданного значения.

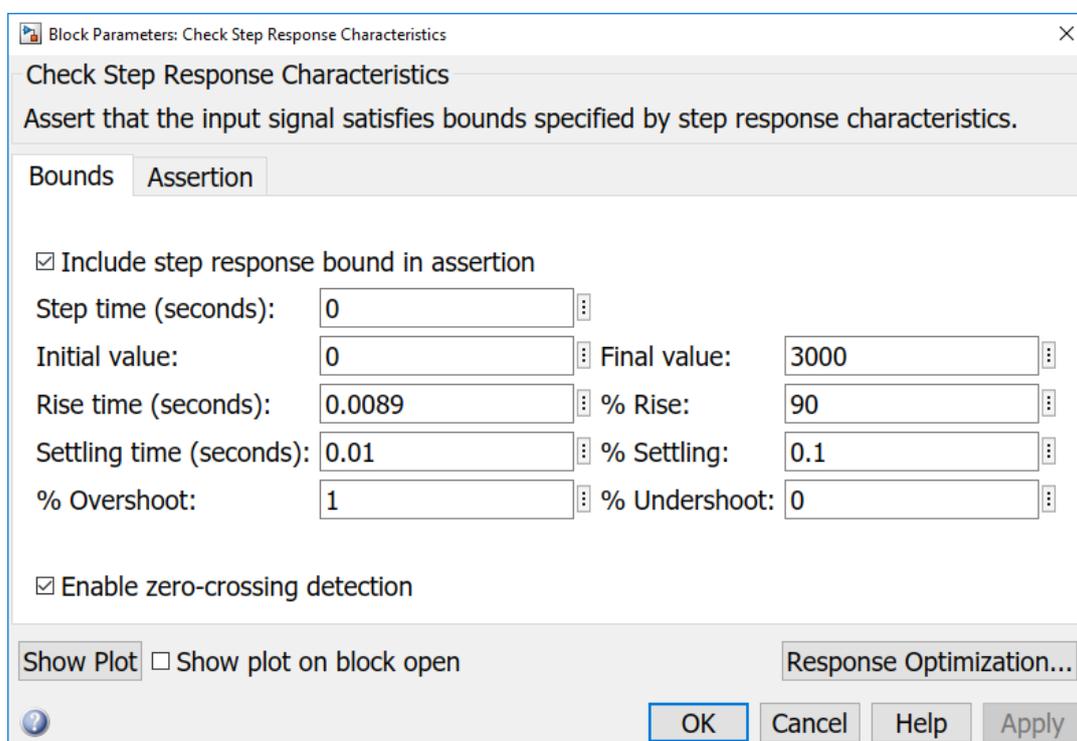


Рис. 6.8. Окно настройки блока Check Step Response Characteristics

На рисунке 6.9 показано окно расчетов параметров ПИ-регулятора исходя из заданных критериев. После окончания процесса в окне расчетов будут представлены оптимальные значения коэффициентов ПИ-регулятора. В данном случае расчет показал, что оптимальными являются коэффициенты: $K_p = 8,8$; $K_i = 0,5$.

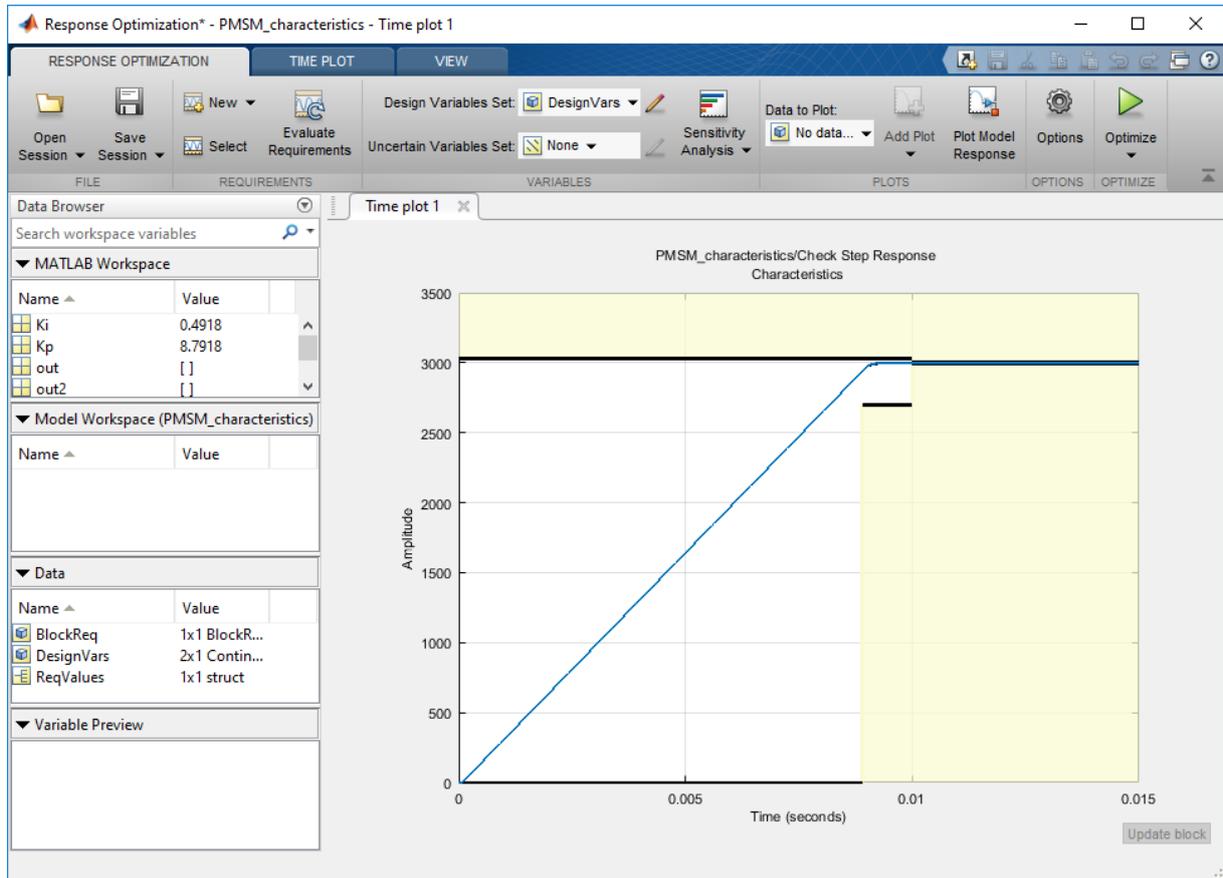


Рис. 6.9. Окно расчетов параметров ПИ-регулятора

Динамические характеристики системы по частоте вращения и электромагнитному моменту с настроенным регулятором показаны на рис. 6.10.

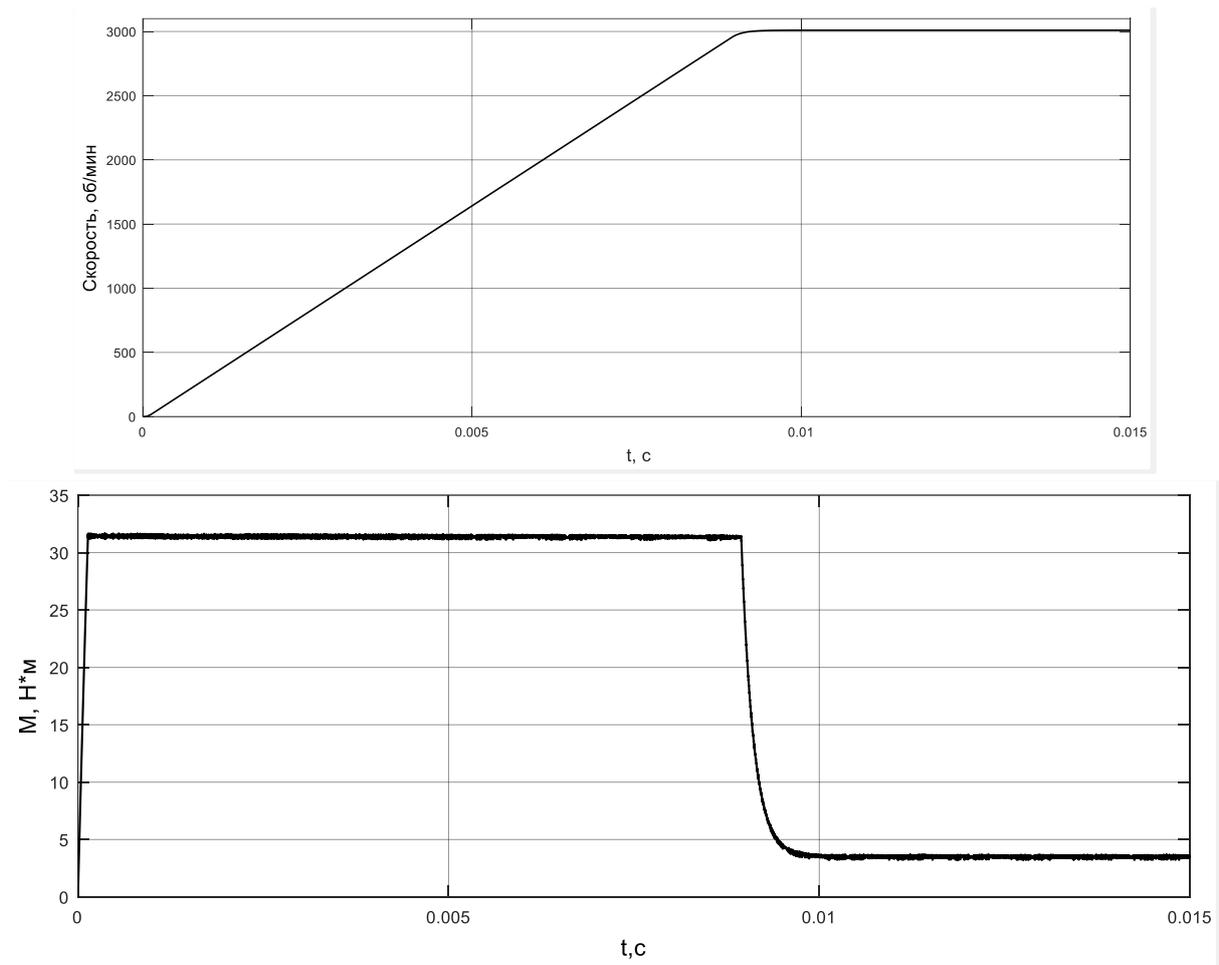


Рис. 6.10. Динамические характеристики системы скорости и момента с настроенным регулятором

На рисунке 6.11 изображено сравнение динамических характеристик системы по скорости с ПИ-регулятором (сплошная линия) и при отсутствии регулятора скорости (пунктирная линия).

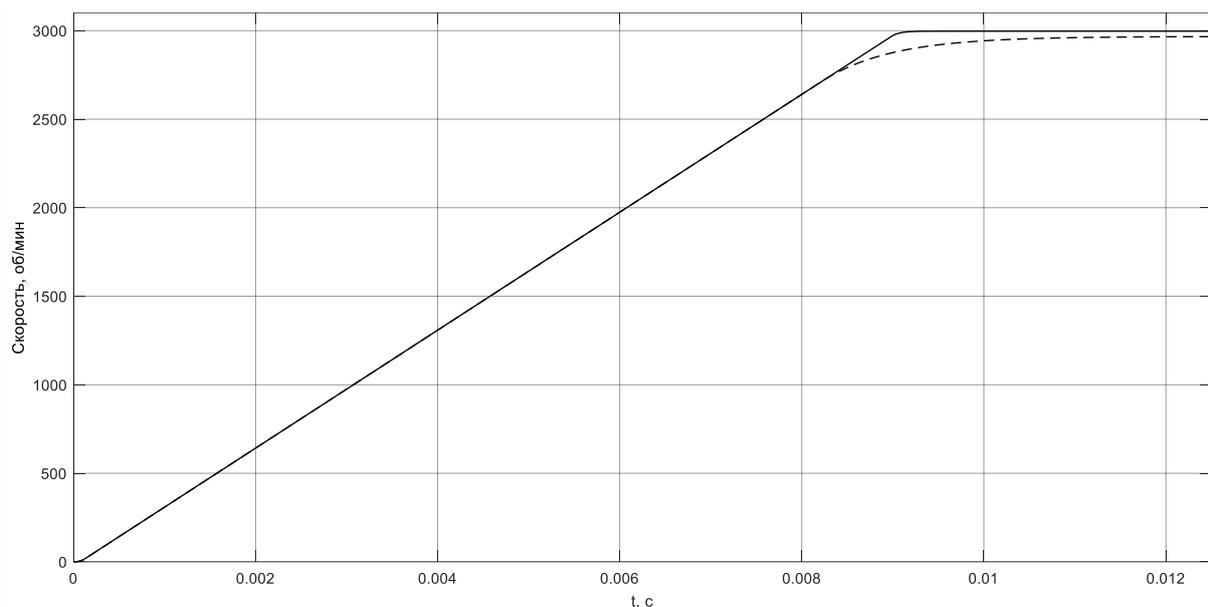


Рис. 6.11. Сравнение переходного процесса по скорости системы с ПИ-регулированием и системы без регулирования

Из данного сравнения можно сделать вывод, что применение ПИ-регулятора позволяет устранить статическую ошибку регулирования, а также уменьшить время переходного процесса с 11,87 мс до 8,99 мс.

Рассмотрим расчет статических характеристик вентильного двигателя. На рисунке 6.12 изображена схема для снятия механической характеристики двигателя $n = f(M)$. Для автоматизации процесса в систему были добавлены два дополнительных блока. Блок Subsystem отвечает за динамическое изменение нагрузочного момента. Структура блока показана на рис. 6.13. Данный блок увеличивает свое выходное значение периодически, с заданной частотой, на заданное значение. В данном случае блок был настроен на увеличение момента нагрузки двигателя с периодом в 0,01 с на 0,1 Н*м, а затем на 0,5 Н*м. (рис. 6.14).

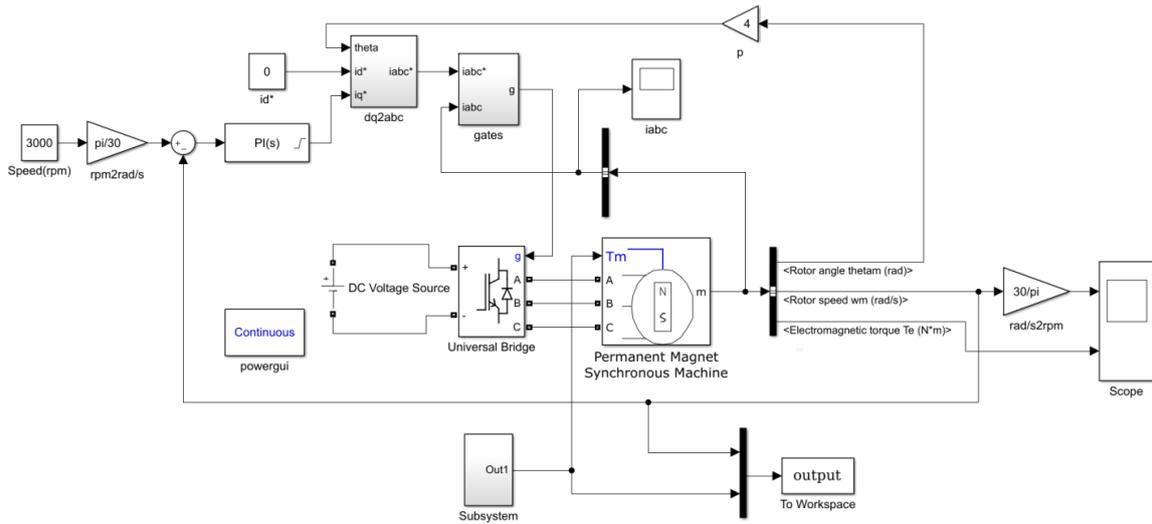


Рис. 6.12. Схема для снятия механической характеристики электропривода

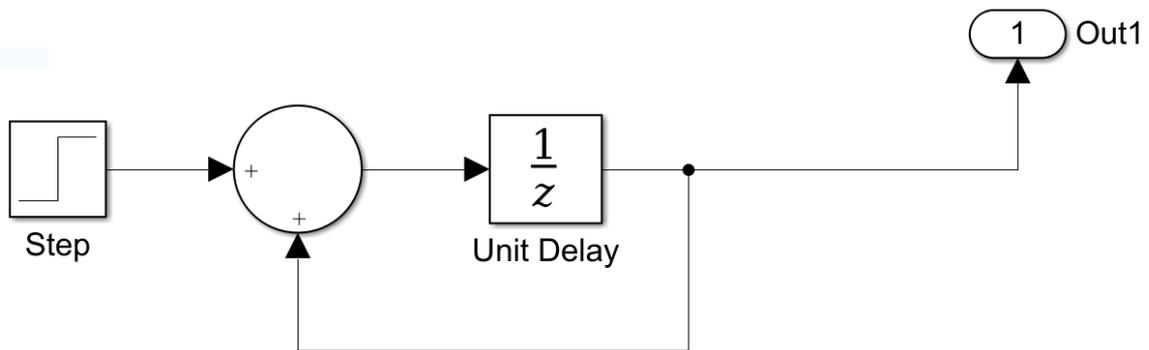


Рис. 6.13. Структура блока автоматического задания момента нагрузки

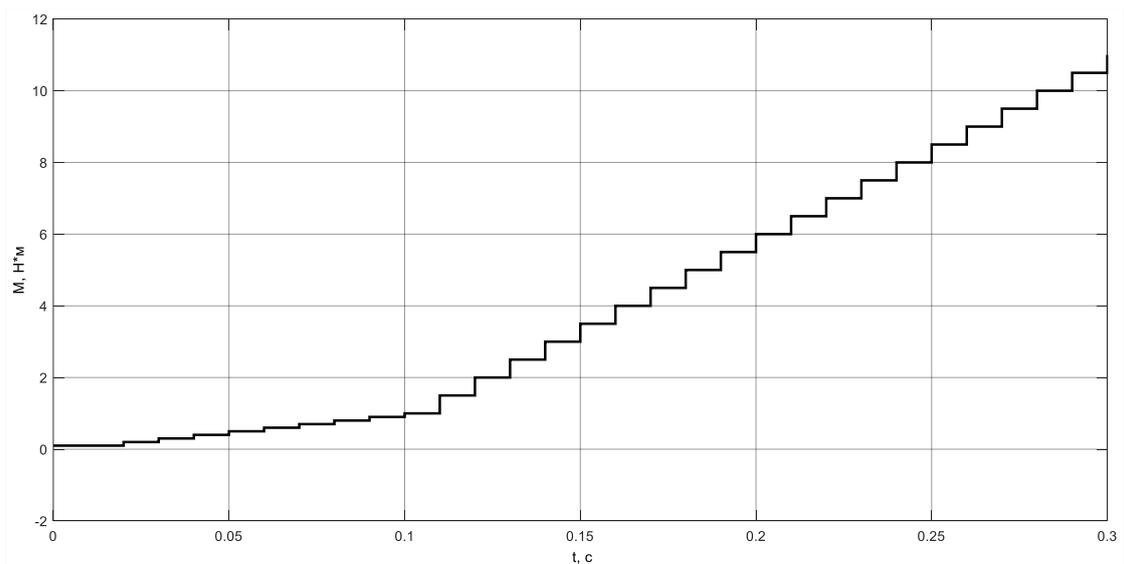


Рис. 6.14. Выходная характеристика блока автоматического задания момента нагрузки

Работа блока To Workspace (рис. 6.12) заключается в передаче данных о частоте вращения и моменте двигателя, с заданной периодичностью, в рабочую область MATLAB для дальнейшей обработки.

В ходе исследования были сняты данные по скорости вращения и моменту нагрузки двигателя при работе с ПИ-регулированием и без регулирования скорости. Соответствующие данные приведены в таблицах 6.2 и 6.3. На рисунке 6.15 показано сравнение механических характеристик вентильного двигателя с ПИ-регулятором скорости (сплошная линия) и без регулирования по скорости (пунктирная линия).

Таблица 6.2 – Зависимость $n = f(M)$ без регулятора скорости

| Момент, Н*м | Скорость, об/мин |
|-------------|------------------|
| 0,1 | 2998,120 |
| 0,2 | 2997,205 |
| 0,3 | 2996,309 |
| 0,4 | 2995,370 |
| 0,5 | 2994,468 |
| 0,6 | 2993,574 |
| 0,7 | 2992,689 |
| 0,8 | 2991,790 |
| 0,9 | 2990,850 |
| 1 | 2989,941 |
| 1,5 | 2985,413 |
| 2 | 2980,832 |
| 2,5 | 2976,290 |
| 3 | 2971,716 |
| 3,5 | 2967,133 |
| 4 | 2962,611 |
| 4,5 | 2958,064 |
| 5 | 2953,578 |
| 5,5 | 2948,988 |
| 6 | 2944,382 |
| 6,5 | 2939,852 |
| 7 | 2935,349 |
| 7,5 | 2930,814 |
| 8 | 2926,165 |

| | |
|------|----------|
| 8,5 | 2921,645 |
| 9 | 2917,126 |
| 9,5 | 2912,500 |
| 10 | 2907,996 |
| 10,5 | 2903,462 |

Таблица 6.3 – Зависимость $n = f(M)$ с ПИ-регулятором скорости

| Момент, Н*м | Скорость, об/мин |
|-------------|------------------|
| 0,1 | 3000,465 |
| 0,2 | 3000,364 |
| 0,3 | 3000,258 |
| 0,4 | 3000,146 |
| 0,5 | 3000,056 |
| 0,6 | 2999,95 |
| 0,7 | 2999,845 |
| 0,8 | 2999,735 |
| 0,9 | 2999,634 |
| 1 | 2999,522 |
| 1,5 | 2999,022 |
| 2 | 2998,499 |
| 2,5 | 2997,977 |
| 3 | 2997,472 |
| 3,5 | 2996,952 |
| 4 | 2996,443 |
| 4,5 | 2995,923 |
| 5 | 2995,404 |
| 5,5 | 2994,897 |
| 6 | 2994,386 |
| 6,5 | 2993,878 |
| 7 | 2993,366 |
| 7,5 | 2992,849 |
| 8 | 2992,347 |
| 8,5 | 2991,848 |
| 9 | 2991,325 |
| 9,5 | 2990,826 |
| 10 | 2990,317 |
| 10,5 | 2989,805 |

По приведенным данным можно сделать вывод, что механическая характеристика без регулятора скорости имеет наклон примерно равный $-9,1 \frac{\text{об/мин}}{\text{Н*м}}$. Также отклонение значения скорости от заданной величины при моменте нагрузки равном $10,5 \text{ Н*м}$ составляет $3,2\%$. В приводе с ПИ-регулятором наклон механической характеристики составляет порядка $-1 \frac{\text{об/мин}}{\text{Н*м}}$, а также отклонение значения скорости при максимальном моменте составляет приблизительно $0,34 \%$.

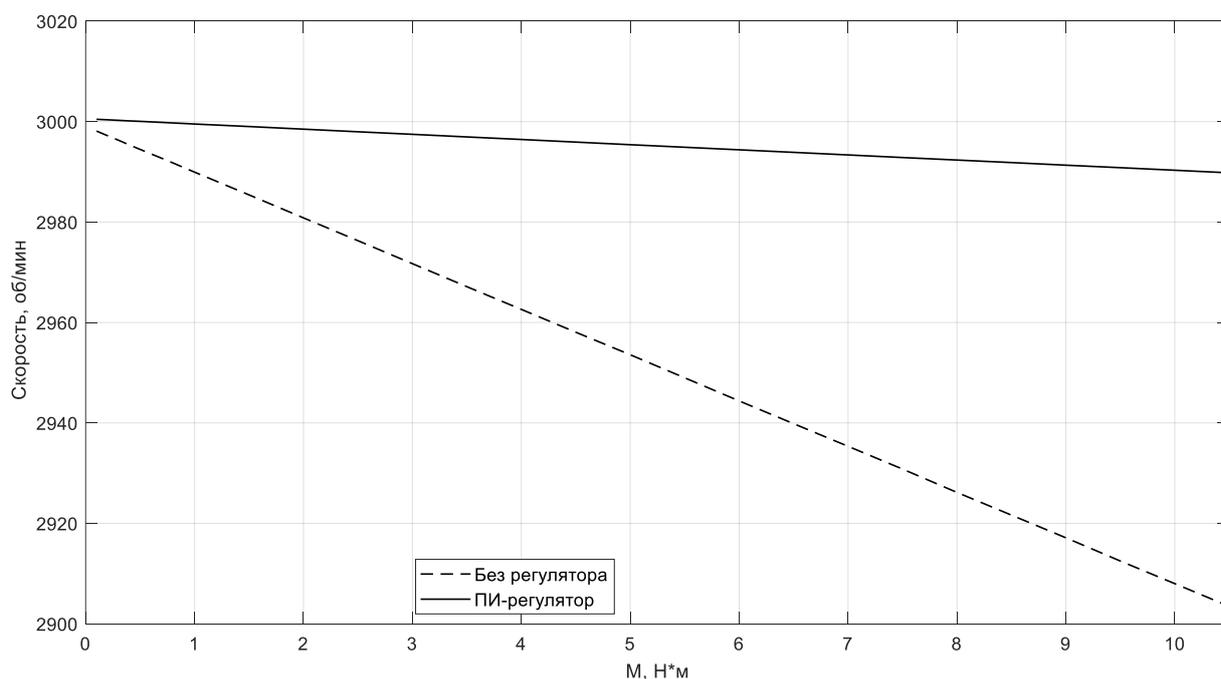


Рис. 6.15. Механическая характеристика привода с ПИ-регулятором и без регулятора

На рисунке 6.16 показана схема для снятия рабочих характеристик вентильного двигателя. В данной схеме были добавлены датчик тока постоянного источника питания, а также блок Fourier, выполняющий разложение сигнала с датчика тока в ряд Фурье.

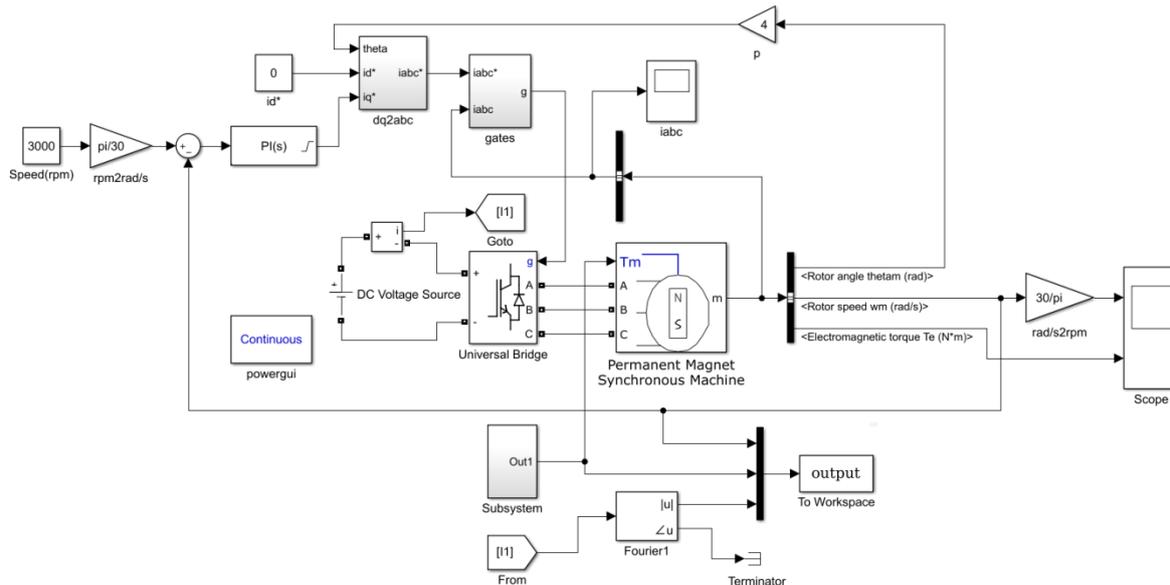


Рис. 6.16. Схема для снятия рабочих характеристик электропривода

Снятые и рассчитанные данные для построения рабочих характеристик приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Данные рабочих характеристик с ПИ- регулятором

| Idc, A | ω , рад/с | M, Н*м | P1, Вт | P2, Вт | КПД. |
|--------|------------------|--------|----------|----------|--------|
| 0,057 | 314,209 | 0,1 | 32,112 | 31,421 | 0,9785 |
| 0,113 | 314,198 | 0,2 | 63,396 | 62,840 | 0,9912 |
| 0,169 | 314,186 | 0,3 | 94,728 | 94,256 | 0,9950 |
| 0,225 | 314,176 | 0,4 | 126,220 | 125,670 | 0,9956 |
| 0,282 | 314,165 | 0,5 | 157,786 | 157,083 | 0,9955 |
| 0,338 | 314,153 | 0,6 | 189,375 | 188,492 | 0,9953 |
| 0,395 | 314,144 | 0,7 | 221,097 | 219,901 | 0,9946 |
| 0,451 | 314,132 | 0,8 | 252,795 | 251,306 | 0,9941 |
| 0,508 | 314,119 | 0,9 | 284,517 | 282,707 | 0,9936 |
| 0,565 | 314,110 | 1 | 316,373 | 314,110 | 0,9928 |
| 0,854 | 314,056 | 1,5 | 478,049 | 471,084 | 0,9854 |
| 1,146 | 314,001 | 2 | 641,769 | 628,003 | 0,9785 |
| 1,441 | 313,949 | 2,5 | 807,200 | 784,873 | 0,9723 |
| 1,740 | 313,894 | 3 | 974,183 | 941,682 | 0,9666 |
| 2,042 | 313,841 | 3,5 | 1143,656 | 1098,443 | 0,9605 |
| 2,347 | 313,788 | 4 | 1314,308 | 1255,150 | 0,9550 |

| | | | | | |
|-------|---------|------|----------|----------|--------|
| 2,656 | 313,734 | 4,5 | 1487,593 | 1411,802 | 0,9491 |
| 2,969 | 313,680 | 5 | 1662,787 | 1568,400 | 0,9432 |
| 3,284 | 313,626 | 5,5 | 1839,117 | 1724,944 | 0,9379 |
| 3,603 | 313,574 | 6 | 2017,736 | 1881,441 | 0,9325 |
| 3,926 | 313,520 | 6,5 | 2198,354 | 2037,881 | 0,9270 |
| 4,252 | 313,468 | 7 | 2381,318 | 2194,277 | 0,9215 |
| 4,581 | 313,414 | 7,5 | 2565,541 | 2350,603 | 0,9162 |
| 4,914 | 313,362 | 8 | 2751,661 | 2506,897 | 0,9110 |
| 5,249 | 313,308 | 8,5 | 2939,634 | 2663,119 | 0,9059 |
| 5,590 | 313,254 | 9 | 3130,356 | 2819,282 | 0,9006 |
| 5,933 | 313,200 | 9,5 | 3322,274 | 2975,404 | 0,8956 |
| 6,278 | 313,148 | 10 | 3515,924 | 3131,476 | 0,8907 |
| 6,629 | 313,093 | 10,5 | 3712,454 | 3287,480 | 0,8855 |

Проведем моделирование и исследование вентильного двигателя с регулятором скорости на основе нейронных сетей. Рассмотрим схему вентильного двигателя с нейрорегулятором скорости.

Роль нейрорегулятора в данной схеме заключается в анализе текущего значения скорости системы и формировании на его основе оптимального сигнала задания, который затем подается на вход системы. Выбор данной конструкции обусловлен следующими причинами: простота исполнения схемы, не требующая внесения значительных изменений в структуру электропривода; простота обучения нейронной сети контроллера. В качестве структуры нейрорегулятора был выбран нейрорегулятор на основе модели нелинейной авторегрессии со скользящим средним (Nonlinear Autoregressive-Moving Average – NARMA-L2). Данный выбор был мотивирован высокой производительностью и удовлетворительной точностью работы регулятора.

Схема цифровой модели вентильного двигателя с регулятором скорости на основе искусственных нейронных сетей, построенная в среде Simulink, показана на рис. 6.17. Данная модель представляет собой модель вентильного двигателя из рис. 6.1. В данной модели был добавлен блок NARMA-L2 Controller, роль которого заключается в симуляции работы нейрорегулятора на основе модели нелинейной авторегрессии со скользящим средним. Также ПИ-регулятор был заменен

блоком Saturation, роль которого заключается в простом ограничении сигнала ошибки в пределах $[-30;30]$.

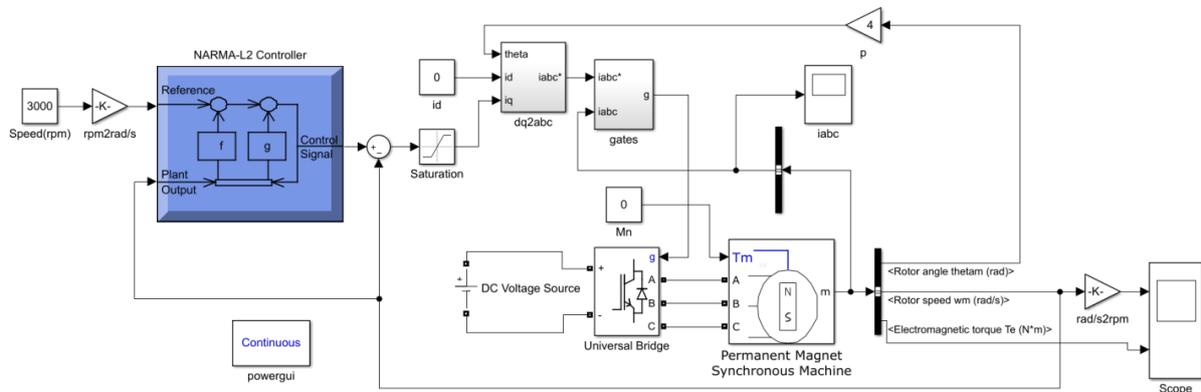


Рис. 6.17. Модель вентильного двигателя с нейрорегулятором скорости

Перед началом моделирования необходимо выполнить настройку параметров нейрорегулятора, а также выполнить обучение его нейронной сети. Для этого необходимо активизировать блок NARMA-L2 Controller двойным щелчком левой кнопки мыши в окне системы Simulink. Это вызовет окно Plant Identification – NARMA - L2 (рис. 6.18).

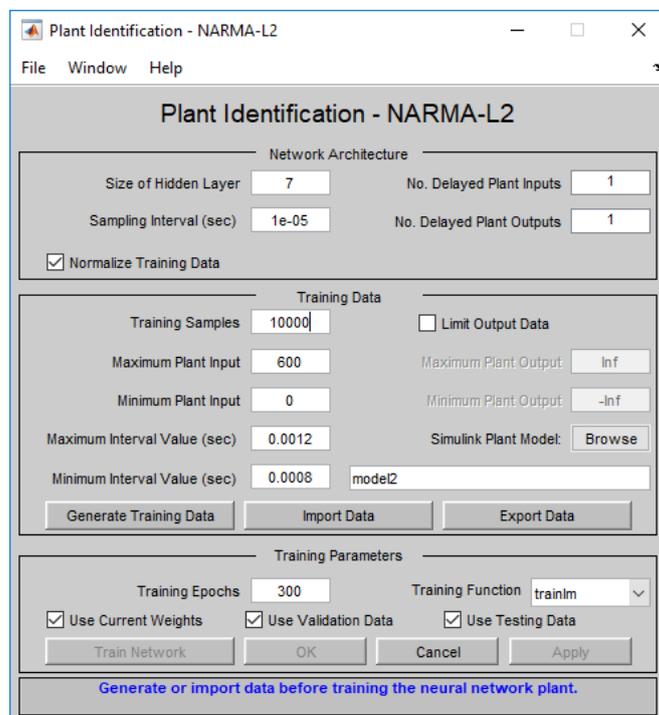


Рис. 6.18. Окно идентификации модели управляемого процесса

Прежде чем установить параметры контроллера, нужно идентифицировать модель управляемого процесса. Целью идентификации является построение нейронной сети, которая способна должным образом моделировать динамику управляемого процесса.

Процедура идентификации требует задания следующих параметров:

- Size of Hidden Layer – размер скрытого слоя. Определяется количеством используемых нейронов. В данной задаче было установлено, что размер скрытого слоя, равный 7 нейронам является оптимальный по времени обучения и точности работы нейронной сети;

- Sampling Interval – такт дискретности в секундах между двумя последовательными моментами съема данных. Установлен в значение 10^{-5} с. для повышения точности работы;

- No. Delayed Plant Inputs – количество элементов запаздывания на входе модели. Установлено в значение 1;

- No. Delayed Plant Outputs – количество элементов запаздывания на выходе модели. Установлено в значение 1;

- Normalize Training Data – окно контроля нормирования обучающих данных к диапазону [0 1].

Параметры обучающей последовательности:

- Training Samples – длина обучающей выборки (количество точек съема информации). Установлена в значение 10000 точек для повышения качества обучения;

- Maximum Plant Input – максимальное значение входного сигнала. Установлено в значение 600 рад/с;

- Minimum Plant Input – минимальное значение входного сигнала. Установлено в значение 0 рад/с;

- Maximum Interval Value (sec) – максимальный интервал идентификации в секундах. Установлен в значение 1,2 мс.;

- Minimum Interval Value (sec) – минимальный интервал идентификации в секундах. Установлен в значение 0,8 мс.;

- Simulink Plant Model – задание модели Simulink с указанием входных и выходных портов, используемых при построении нейросетевой модели управляемого процесса;

В качестве обучающей модели для нейрорегулятора была выбрана модель апериодического звена, показанная на рис. 6.19. Данный выбор обусловлен тем, что целью обучения нейросети регулятора было получение управления скоростью электропривода, являющегося оптимального по времени и степени перерегулирования. Параметры апериодического звена были подобраны экспериментально.

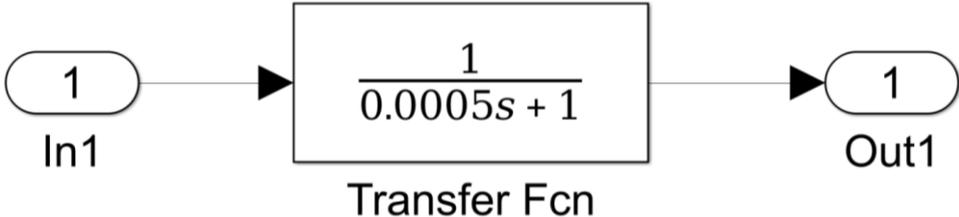


Рис. 6.19. Обучающая модель нейрорегулятора

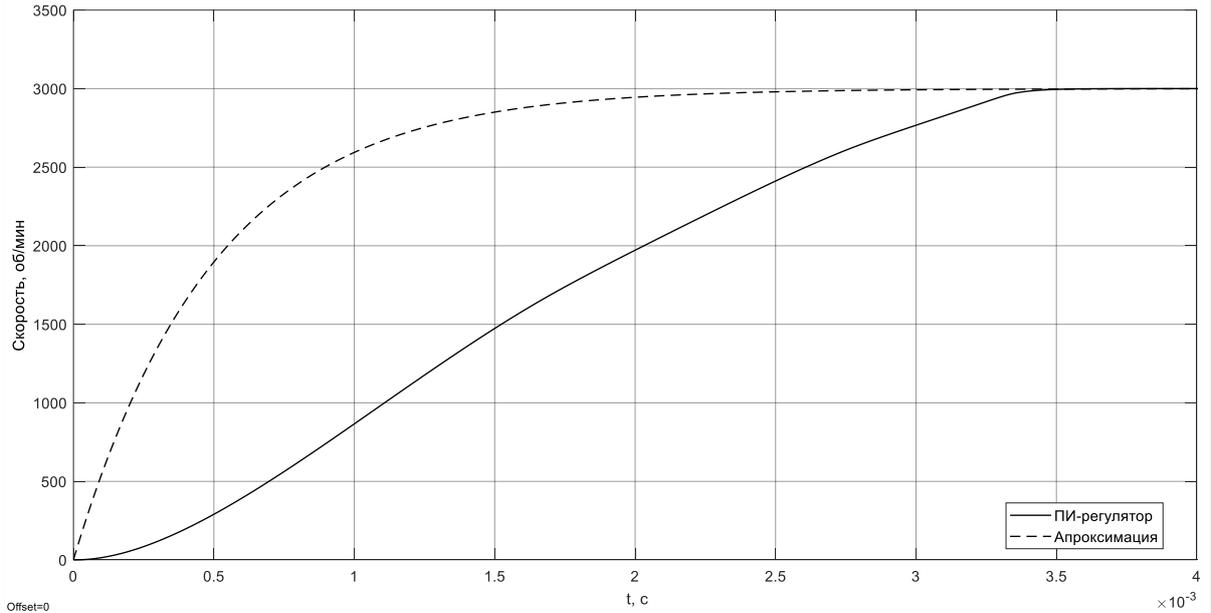


Рис. 6.20. Сравнение процессов по скорости ВД с ПИ-регулятором и идеализированной модели в виде звена первого порядка

После выбора необходимых параметров и модели обучения следующим шагом является генерация обучающей последовательности, инициируемая нажатием кнопки Generate Training Data. Это вызовет окно Plant Input-Output Data (рис. 6.21).

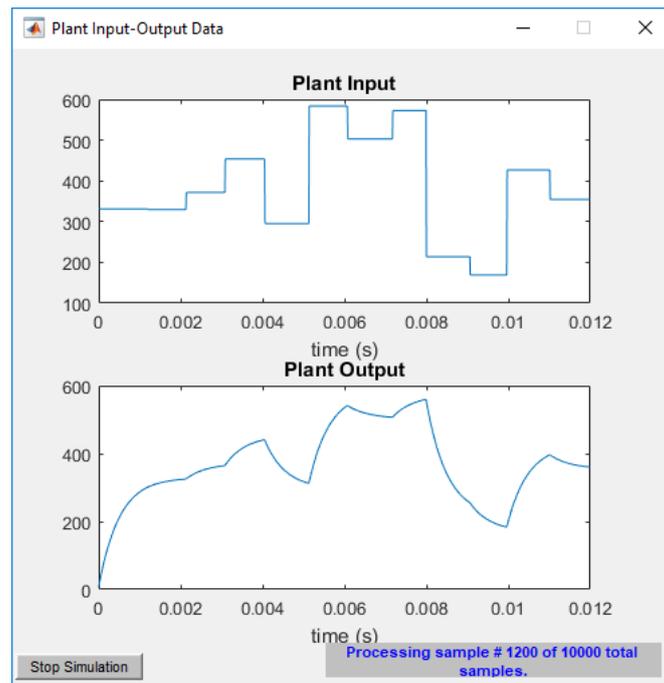


Рис. 6.21. Окно генерации обучающей последовательности

Следующим шагом является обучение нейронной сети. Параметры обучения следующие:

- Training Epochs – количество циклов обучения. Установлено в значение 300;
- Training function – задание обучающей функции. В качестве данной функции был выбран алгоритм Левенберга-Марквардта;
- Use Current Weights – окно контроля, позволяющее подтвердить использование текущих весов нейронной сети;
- Use Validation/Testing for Training – выбор этих окон контроля означает, что 25 % данных из обучающей последовательности будет использовано для формирования контрольного и тестового множеств соответственно.

Обучение нейросети начинается нажатием кнопки Train Network. После завершения обучения нейрорегулятор готов к применению. Выходная динамическая характеристика модели по скорости при поступлении на вход регулятора случайного сигнала задания показана на рис. 6.22. Сравнение динамических характеристик системы с нейрорегулированием скорости с системой с ПИ-регулированием показаны на рис. 6.23.

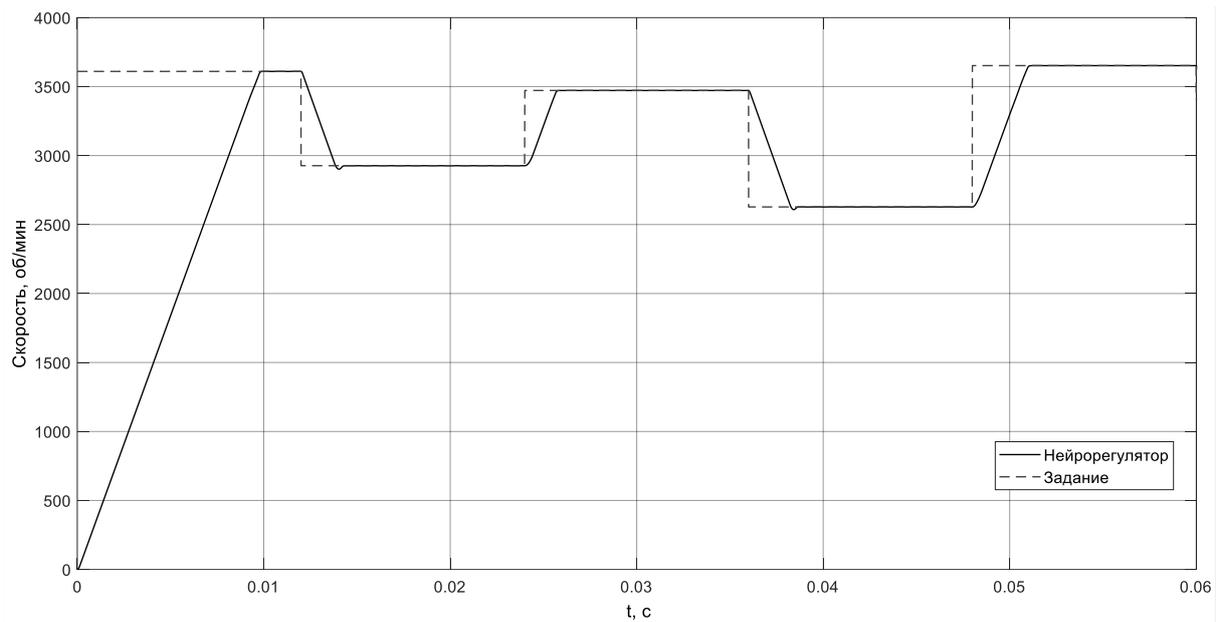


Рис. 6.22. Переходные процессы при случайном сигнале задания

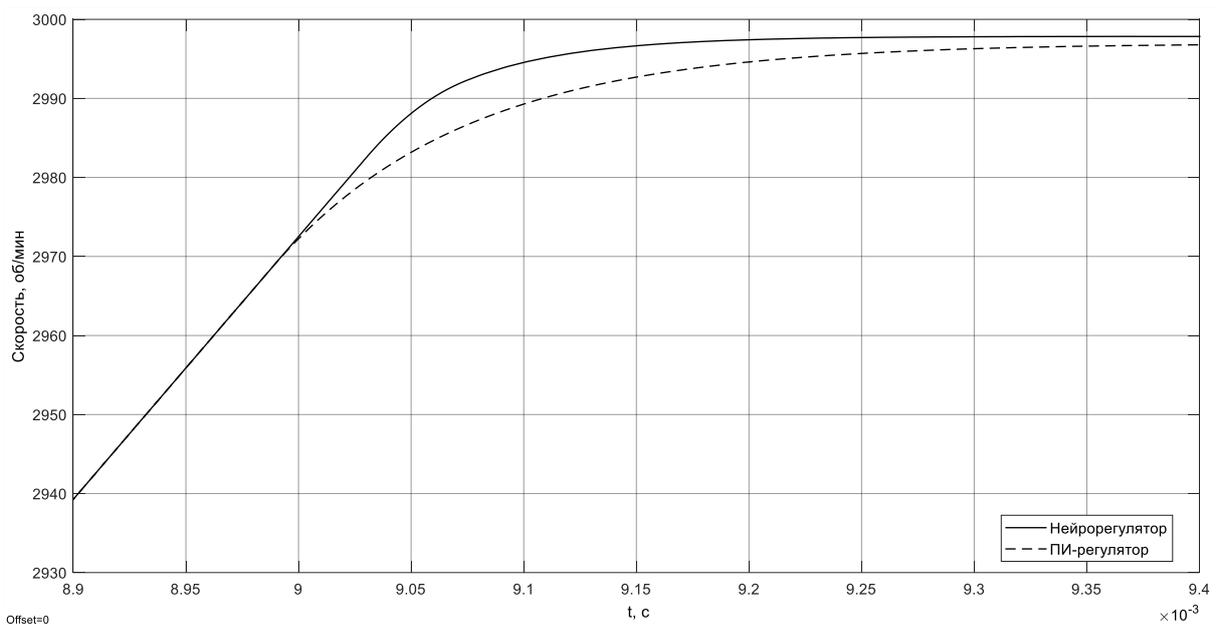


Рис. 6.23. Сравнение переходного процесса системы с ПИ-регулятором и системы с нейроконтроллером

Из данного сравнения можно сделать вывод, что применение нейрорегулятора позволило улучшить некоторые характеристики системы. В частности, уменьшается время выхода скорости на заданную величину с 9,5927 мс до 9,1668 мс (при зоне точности 0,1%).

Проведем исследование статических характеристик вентильного двигателя. Компьютерная модель для снятия механической характеристики $n = f(M)$ вентильного электропривода с нейрорегулятором показана на рис. 6.24. Данные, полученные при помощи данной модели приведены в таблице 6.5.

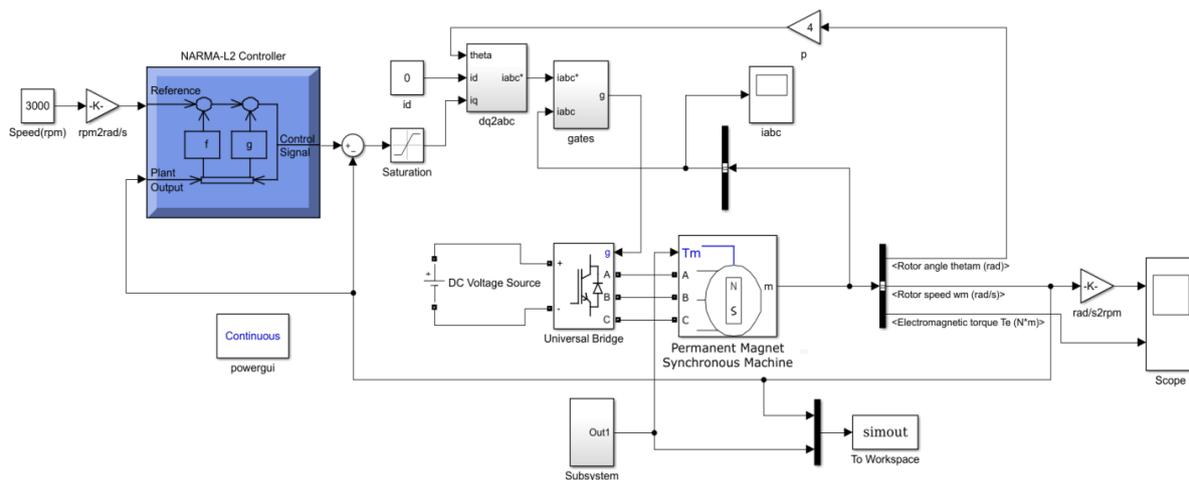


Рис. 6.24. Схема для снятия механической характеристики электропривода с нейрорегулятором

Таблица 6.5

| Момент, Н*м | Скорость, об/мин |
|-------------|------------------|
| 0,1 | 2999,859 |
| 0,2 | 2999,864 |
| 0,3 | 2999,807 |
| 0,4 | 2999,741 |
| 0,5 | 2999,688 |
| 0,6 | 2999,629 |
| 0,7 | 2999,564 |
| 0,8 | 2999,509 |
| 0,9 | 2999,444 |
| 1 | 2999,387 |
| 1,5 | 2999,329 |
| 2 | 2999,029 |
| 2,5 | 2998,436 |
| 3 | 2998,146 |

| | |
|------|----------|
| 3,5 | 2997,845 |
| 4 | 2997,545 |
| 4,5 | 2997,251 |
| 5 | 2996,952 |
| 5,5 | 2996,657 |
| 6 | 2996,360 |
| 6,5 | 2996,060 |
| 7 | 2995,762 |
| 7,5 | 2995,471 |
| 8 | 2995,168 |
| 8,5 | 2994,873 |
| 9 | 2994,577 |
| 9,5 | 2994,292 |
| 10 | 2994,006 |
| 10,5 | 2993,715 |

Сравнения механических характеристик вентильного двигателя с нейрорегулятором скорости (сплошная линия) и с ПИ-регулированием (пунктирная линия) показаны на рис. 6.25. Из данных характеристик можно сделать вывод, что наклон механической характеристики вентильного электропривода с нейрорегулятором составляет примерно $-0,493 \frac{\text{об/мин}}{\text{Н*м}}$, а отклонение значения скорости от заданной величины составляет 0,06 %. Данные показатели превосходят аналогичные показания системы с ПИ-регулятором.

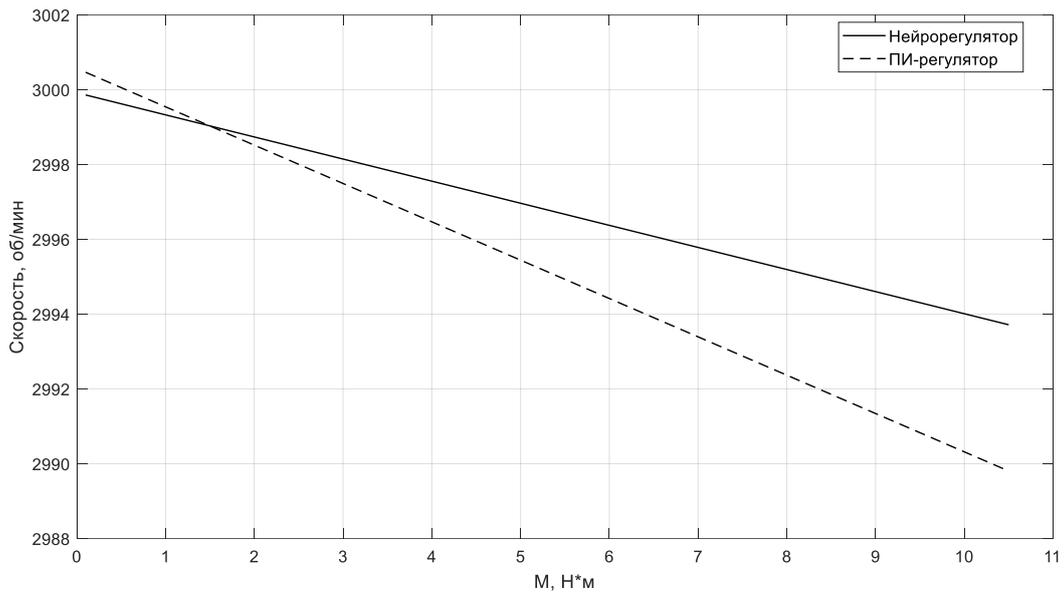


Рис. 6.25. Механические характеристики привода с нейрорегулятором и с ПИ-регулятором

Компьютерная модель для снятия рабочих характеристик вентильного электропривода с нейрорегулятором показана на рис. 6.26. Данная схема работает аналогично схеме, приведенной на рис. 6.24. Данные, полученные при помощи данной модели, приведены в таблице 6.6.

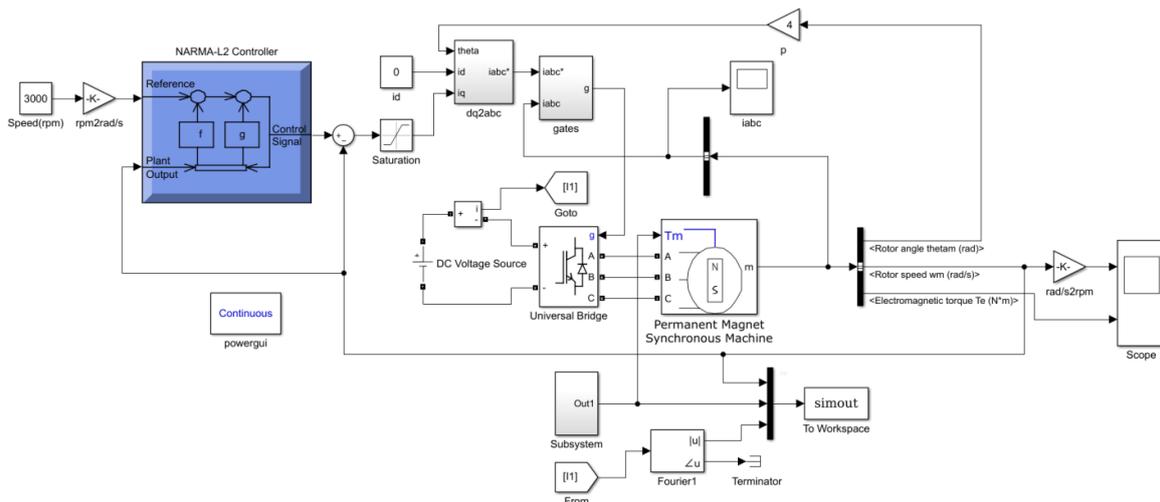


Рис. 6.26. Схема для снятия рабочих характеристик электропривода с нейрорегулятором

Таблица 6.6

| Idc, А | ω , рад/с | М, Н*м | P1, Вт | P2, Вт | К.п.д. |
|--------|------------------|--------|----------|----------|--------|
| 0,057 | 314,145 | 0,1 | 32,144 | 31,415 | 0,9773 |
| 0,113 | 314,139 | 0,2 | 63,544 | 62,828 | 0,9887 |
| 0,169 | 314,132 | 0,3 | 94,912 | 94,240 | 0,9929 |
| 0,226 | 314,127 | 0,4 | 126,412 | 125,651 | 0,9940 |
| 0,282 | 314,120 | 0,5 | 158,011 | 157,060 | 0,9940 |
| 0,339 | 314,114 | 0,6 | 189,759 | 188,469 | 0,9932 |
| 0,395 | 314,108 | 0,7 | 221,427 | 219,875 | 0,9930 |
| 0,452 | 314,101 | 0,8 | 253,126 | 251,281 | 0,9927 |
| 0,509 | 314,096 | 0,9 | 285,131 | 282,687 | 0,9914 |
| 0,566 | 314,089 | 1 | 316,986 | 314,089 | 0,9909 |
| 0,855 | 314,058 | 1,5 | 478,547 | 471,087 | 0,9844 |
| 1,147 | 314,027 | 2 | 642,296 | 628,054 | 0,9778 |
| 1,443 | 313,996 | 2,5 | 807,965 | 784,991 | 0,9716 |
| 1,741 | 313,964 | 3 | 975,037 | 941,892 | 0,9660 |
| 2,044 | 313,932 | 3,5 | 1144,493 | 1098,762 | 0,9600 |
| 2,350 | 313,903 | 4 | 1316,219 | 1255,610 | 0,9540 |
| Idc, А | ω , рад/с | М, Н*м | P1, Вт | P2, Вт | К.п.д. |
| 2,659 | 313,871 | 4,5 | 1488,970 | 1412,419 | 0,9486 |
| 2,972 | 313,839 | 5 | 1664,282 | 1569,197 | 0,9429 |
| 3,288 | 313,810 | 5,5 | 1841,364 | 1725,953 | 0,9373 |
| 3,606 | 313,778 | 6 | 2019,511 | 1882,670 | 0,9322 |
| 3,932 | 313,748 | 6,5 | 2201,772 | 2039,365 | 0,9262 |
| 4,257 | 313,716 | 7 | 2383,888 | 2196,012 | 0,9212 |
| 4,587 | 313,685 | 7,5 | 2568,672 | 2352,639 | 0,9159 |
| 4,920 | 313,655 | 8 | 2755,109 | 2509,237 | 0,9108 |
| 5,258 | 313,624 | 8,5 | 2944,698 | 2665,801 | 0,9053 |
| 5,598 | 313,593 | 9 | 3134,938 | 2822,338 | 0,9003 |
| 5,943 | 313,563 | 9,5 | 3327,829 | 2978,844 | 0,8951 |
| 6,289 | 313,532 | 10 | 3521,813 | 3135,317 | 0,8903 |
| 6,641 | 313,500 | 10,5 | 3718,681 | 3291,751 | 0,8852 |

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры использования системы в промышленности.
2. Какие достоинства и недостатки имеет ВД по сравнению двигателями асинхронными и постоянного тока?
3. Какие марки постоянных магнитов используются в ВД?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Без базовых знаний законов электромеханики и управления достаточно сложно обеспечить эффективное использование современного оборудования. Изучение основ электромеханики и управления напрямую связано с экспериментальными исследованиями, а перспективное развитие – с виртуальным моделированием.

В пособии рассмотрено моделирование электротехнических и электромеханических устройств автоматики: моделирование и исследование системы автоматического регулирования температуры; применение методов нейронных сетей для управления следящим электроприводом; моделирование и исследование системы регулирования уровня жидкости в реакторе; моделирование и исследование системы регулирования давления в реакторе; моделирование и исследование автоматической системы регулирования скорости двигателя постоянного тока; регулирование скорости и вращающего момента вентильного электропривода с применением искусственных нейронных сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование и расчет автоматических систем: С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. Учеб. пособие / Издательство «Посад»; Владимир, 2003. – 200 с. – ISBN 5-86953-132-2.
2. MATLAB 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6. в математике и моделировании. В. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс. 2005. – 806 с. – ISBN 5-98003-181-2.
3. Герман-Галкин. С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб. : КОРОНА-Век, 2008. – 468 с. – ISBN 978-5-904484-49-9.
4. Теория автоматического управления. : учебник для студентов вузов / С. Е. Душин [и др.] ; под ред. В. Б. Яковлева. - Изд. 3-е, стер. - М. : Высшая шко-ла, 2009. - 567 с.- ISBN 5-06-004096-8.
5. Брускин Д. Э. Зорохович А. Е. Хвостов Е. С. Электрические машины и микромашины. Издательство «Высшая школа». 1990. – 529 с. – ISBN 5-06-000725-1.
6. Чернодуб А. Н., Дзюба Д. А. Обзор методов нейроуправления. Проблемы программирования. – 2011. – № 2. – С. 79 – 94.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М. : «Высшая школа». 1996. – 638 с.
8. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е. Овчинников : Курс лекций. — СПб.: КОРОНА-Век, 2006. 336 с.
9. Вентильный электропривод: шанс для российских производителей // Оборудование: рынок, предложение, цены, 2004. - №1.
10. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М.: Горячая линия-Телеком, 2003. - 94 с.

Учебное электронное издание

ЛИХОДЕЕВ Сергей Иванович

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Практикум

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru