

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра «Системы автоматического управления»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_/ В.И. Ширяев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Следящая система подчиненного регулирования с нечетким регулятором

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 09.03.01.2018.200.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы

к.т.н., доцент каф. САУ

\_\_\_\_\_/ Чернецкий В.О.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Автор работы

студент группы **КЭ-483**

\_\_\_\_\_/ Ионова Т.О.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтролер

к.т.н., доцент каф. САУ

\_\_\_\_\_/ Чернецкий В.О.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Ионова Т.О. Следящая система подчиненного регулирования с нечетким регулятором: ЮУрГУ (НИУ), ВШ ЭКН; 2018, 54 с. 21 ил., библиогр. список – 38 наим., 11 листов слайдов презентации ф. А4.

В данной выпускной квалификационной работе проведен сравнительный анализ классической следящей системы подчиненного регулирования и аналогичной системы с нечетким регулятором положения.

В работе выполнен синтез регулятора обеих систем. Проведено их имитационное моделирование в графической среде Simulink прикладного программного пакета MATLAB. Результаты моделирования свидетельствуют, что применение нечёткого регулятора положения позволяет уменьшить время переходных процессов на 7 – 28 % в зависимости от величины входного воздействия.

					<i>09.03.01.2018.200.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Ионова Т.О.</i>			<i>Следящая система подчиненного регулирования с нечетким регулятором</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Чернецкий В.О.</i>				<i>Д</i>	<i>4</i>	<i>54</i>
<i>Н. Контр.</i>		<i>Чернецкий В.О.</i>				<i>ЮУрГУ Кафедра САУ</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Ширяев В.И.</i>						

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 СИНТЕЗ КЛАССИЧЕСКОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ .....	10
1.1 Структура следящей системы .....	10
1.2 Контур управления .....	14
1.3 Расчёт параметров регуляторов системы.....	15
1.3.1 Расчёт параметров регулятора тока. ....	15
1.3.2 Расчёт параметров регулятора скорости. ....	16
1.3.3 Расчёт параметров регулятора положения.....	17
1.4 Моделирование.....	18
Вывод по разделу один .....	23
2 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЁТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ.....	24
2.1 История развития теории нечёткой логики .....	24
2.2 Основные термины теории нечётких множеств .....	25
2.3 Основные операции в нечёткой логике.....	26
2.4 Типы нечётких моделей.....	27
2.5 Функциональная схема классического нечеткого регулятора .....	28
2.6 Fuzzy Logic Toolbox .....	29
Вывод по разделу два.....	30
3 СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ПОЛОЖЕНИЯ.....	31
3.1 Работа с нечёткой логикой в программной среде MATLAB.....	31
3.2 Добавление нечёткой логики в Simulink-модель следящей системы.....	40
3.3 Анализ систем на основе классической и нечёткой логик .....	45
Вывод по разделу три.....	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	46
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	47

## ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Параметры двигателя ДПР72-Н5 и нагрузки ..... 50

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программа расчета показателя колебательности ..... 51

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ОУ – объект управления.

САУ – система автоматического управления.

СНЛ – система нечёткой логики.

СУ – система управления.

ДПТ – двигатель постоянного тока.

СО - симметричный оптимум.

МО - модульный оптимум.

СКО - скорректированный оптимум.

УУ – управляющее устройство.

ОБ – отрицательная большая.

ОМ – отрицательная малая.

Н – нулевая.

ПМ – положительная малая.

ПБ – положительная большая.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## ВВЕДЕНИЕ

Благосостояние общества неразрывно связано с повышением производительности труда. Это, при управлении современным производством, возможно только при широком использовании механизации и автоматизации. Механизация связана с внедрением различного рода машин и механизмов, а автоматизация — с использованием средств высокоточной техники и различных автоматических устройств для управления и контроля.

Обычно следящие системы предназначены для воспроизведения на выходе изменения управляющего воздействия, слежения за ним. Они представляют собой особый класс систем автоматического управления, в которых изменения происходят по любому закону. Входной сигнал непрерывно обрабатывается системой, при этом заданное входное воздействие, обрабатываемое системой, изменяется произвольно в широких пределах.

В настоящее время в системах управления используется принцип нечёткой логики, заложенные в 60-е года Л.А. Заде.[13,20]

Первоначально принципы нечёткого управления разрабатывались для систем математических моделей, которые были либо слишком сложные, либо не могли быть получены. Однако, в последнее время, появилось множество работ, где действующие на принципе нечёткой логики регуляторы используются в системах, которые вполне могут быть спроектированы исходя из классической системы теории управления. При этом в подавляющем большинстве случаев сравнительный анализ между нечеткими регуляторами и классическими системами управления подчиненного регулирования не проводился.

**Целью** данной выпускной квалификационной работы является сравнение следящих систем подчиненного регулирования с классической моделью регулятора и с использованием регулятора на основе нечеткой логики.

Для достижения означенной цели, в работе решаются следующие **задачи**:

1. Выполнить расчет классической следящей системы с подчиненным регулированием.
2. Изучить принципы построения нечетких регуляторов.
3. Осуществить синтез нечеткого регулятора и провести сравнительный анализ.

**Объект исследования:** следящая система подчиненного регулирования с двигателем постоянного тока.

**Предмет исследования:** нечеткий регулятор.

**Методы исследования:** исследования, проводимые в работе, основаны на комплексном использовании знаний из областей: теории автоматического управления, систем автоматизированного проектирования, современных вычислительных пакетов.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

При оценке качества разработанной системы управления применено моделирование в прикладном пакете MATLAB R2014b.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

# 1 СИНТЕЗ КЛАССИЧЕСКОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

**Следящая система управления** — вид системы автоматического управления, в которой заранее неизвестен вид управляющего воздействия. Обычно следящие системы предназначены для воспроизведения на выходе изменения управляющего воздействия, слежения за ним [23]. Они представляют собой особый класс систем автоматического управления, в которых изменения происходят по любому закону. Входной сигнал непрерывно обрабатывается системой, при этом заданное входное воздействие, обрабатываемое системой, изменяется произвольно в широких пределах.

В системах автоматического управления, которые состоят только из основных функционально необходимых элементов, служащих для реализации того или иного принципа регулирования, хотя и уменьшаются ошибки по сравнению с системами без регулятора, обычно не удаётся получить требуемых показателей качества [4,5,6].

В следящих системах управляющее воздействие также является величиной переменной, но математическое описание его во времени не может быть установлено, так как источником сигнала служит внешнее явление, закон изменения которого заранее неизвестен [18].

Так как следящие системы предназначены для воспроизведения на выходе управляющего воздействия с возможно большей точностью, то ошибка, так же как и в случае систем программного регулирования, является той характеристикой, по которой можно судить о динамических свойствах следящей системы [9,10]. Ошибка в следящих системах, как и в системах программного регулирования, является сигналом, в зависимости от величины которого осуществляется управление исполнительным двигателем [30].

## 1.1 Структура следящей системы

Система в общем случае условно разделяется на две части:

1. ОУ – объект управления
2. УУ – управляющее устройство

Взаимодействие указанных частей системы в общем виде представлено на рисунке 1.1. На данном рисунке введены следующие обозначения:

- х – выходные параметры ОУ,
- у – входные параметры управления.

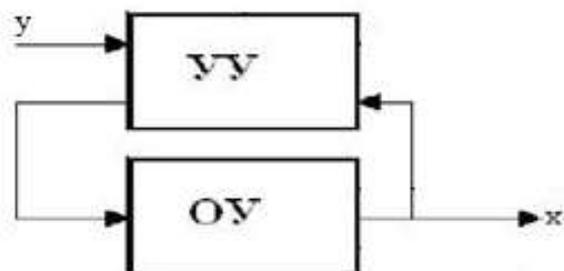


Рисунок 1.1 – Обобщенная функциональная схема

Выходные параметры системы могут подразделяться на исследуемые и не исследуемые, в свою очередь исследуемые параметры подразделяются на:

- контролируемые параметры,
- неконтролируемые параметры.

Контроль над второй группой параметров может быть затруднён в процессе производства, либо такие выходные параметры имеют значения, которыми в процессе управления системой можно пренебречь.

Прямые выходные параметры описывают непосредственное состояние системы в определенный промежуток времени. Косвенные выходные параметры после их измерения могут способствовать более точному регулированию и настройке системы.

Входящие (заданные) параметры, поступающие в управляющее устройство, изменяются с течением времени под действием внешнего возмущения [16]. Задачей автоматического управления является достижение поставленной цели, несмотря на внешние возмущения, и меняющиеся параметры состояния системы, возникающие из-за взаимодействия системы с окружающей средой.

**Объектами управления** могут являться части машин и механизмов, собственно машины и механизмы, производственные линии, технологические процессы, предприятия.

Любой технологический процесс подразумевает под собой совокупность действий, выполняемых по определенным правилам и ограниченный различными критериями.

**Процессом управления** называется такой процесс действий, который по заданным заранее параметрам приводит к достижению цели.

**Подчиненное регулирование** давно и прочно вошло в теорию и практику автоматического управления электроприводами как постоянного, так и переменного тока, и является наиболее востребованным видом управления.

Основными преимуществами данного регулирования являются простота ограничения промежуточных координат при возможности обеспечения высоких показателей качества управления [32].

Функциональная схема типовой системы подчиненного регулирования положения приведена на рисунке 1.2, где  $L$  – индуктивность (Гн) и  $R$  – активное сопротивление (Ом) якорной цепи;  $C$  – конструктивная постоянная электродвигателя, В;  $J$  – суммарный момент инерции механической части электропривода, кг·м<sup>2</sup>;  $K_{сп}$  – коэффициент усиления силового преобразователя;  $M_c(t)$  – внешний возмущающий момент, Н·м;  $I$  – ток цепи якоря, А;  $\Omega_3$  и  $\Omega$  – заданная и действительная частоты вращения ротора, рад/с<sup>-1</sup>; РТ, РП и РС – регуляторы тока, положения и скорости (частоты вращения) ротора.

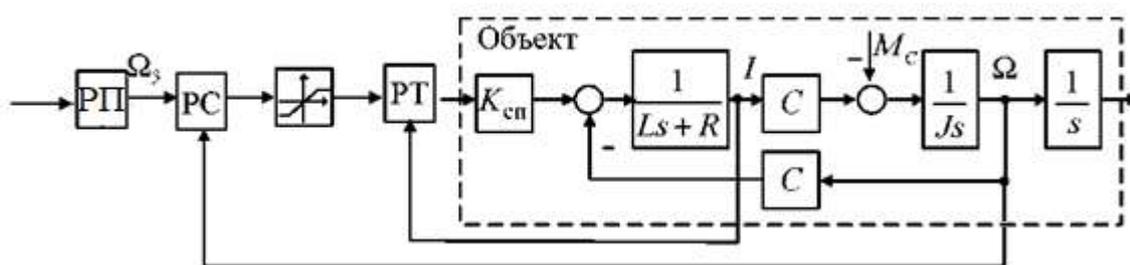


Рисунок 1.2 - Функциональная схема типовой системы подчиненного регулирования положения

В классическом подчиненном регулировании используются типовые настройки (СО – симметричный оптимум, МО – модульный оптимум или СКО – скорректированный оптимум), предполагающие определенные свойства замкнутой системы: быстроедействие, перерегулирование, астатизм.

Для ограничения по координатам регулятор соответствующего контура должен быть астатическим, т.е. появляется необходимость в повышении порядка астатизма системы, а это в результате приведёт к тому, что усложнится процесс получения требуемых показателей качества.

Составим структурную схему исследуемой следящей системы подчиненного регулирования с классическими регуляторами контура управления. Данная схема представлена на рисунке 1.3.



## 1.2 Контуры управления

В данной выпускной квалификационной работе рассматривается система, в которой доступны измерению следующие три величины: угловое положение по нагрузке, угловая скорость нагрузки и ток якоря двигателя. Поэтому, было принято решение сделать данную систему подчиненного регулирования трехконтурной:

- контур по току,
- контур по скорости,
- контур по положению.

### **Регулятор тока.**

Регулятор тока, в первую очередь, как правило, предназначен для ограничения тока якоря в переходных режимах. Рассмотрим его более подробно.

Классический регулятор тока представляет собой ПИ-регулятор [21] непосредственно в контуре, и нелинейность типа ограничение на входе данного контура.

Данная конструкция имеет следующее обоснование. Во-первых, из-за наличия ПИ-регулятора в нашем контуре, последний становится астатическим, а даже первый порядок астатизма (то есть, если представить, что интегратор в регуляторе является единственным во всей системе) позволяет ликвидировать статическую ошибку [28]. Во-вторых, поскольку на входе данного контура стоит нелинейность типа ограничение то в установившихся режимах величина тока не может превышать установленное ограничение (в нашем случае два ампера). Однако, несмотря на данную нелинейность, значения тока в переходных режимах могут кратковременно превышать установленное ограничение [37]. Поэтому необходимо обеспечить максимально возможное быстроедействие данного контура.

### **Регулятор скорости.**

Поскольку в исследуемой системе ограничивать угловую скорость нагрузки не требуется, то регулятор скорости может быть пропорциональным.

### **Регулятор положения.**

Мы можем взять П или ПИД регулятор, но ПИД используется, если требуется устранить статическую ошибку, обусловленную внешними возмущения. В нашем случае этого не требуется, поэтому будет выбран П-регулятор [21].

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

### 1.3 Расчёт параметров регуляторов системы

Расчет контуров по току и по скорости систем подчиненного регулирования широко освещен в большом количестве литературы [3,4,5,6,9,10,12].

#### 1.3.1 Расчёт параметров регулятора тока.

В соответствии с этим пропорционально интегральный регулятор тока с передаточной функцией параметры могут быть выбраны следующим образом: уровень ограничения на входе контура набирается исходя из максимально допустимых токов якоря. Исходя из этого принимаем  $I_{огр} = 2A$ ,  $K_{дт} = 1$ . Если он будет другой, то это все в контуре пересчитывается путем преобразования структурной схемы [33].

Большую постоянную времени брать нельзя, она не должна быть больше чем постоянная времени якоря. Так же примем следующие параметры:  $K_{дт}=K_{дс}=1$ ,  $T_{дт} = T_{дс}=0,005с$ ,  $U_{огр} = 30В$ .

$$W_{pm}(s) = K_{pm} \left( 1 + \frac{1}{T_{pm} \cdot s} \right) = K_{pm} \frac{1 + T_{pm} \cdot s}{T_{pm} \cdot s}.$$

где

$T_{pm}$  – постоянная времени регулятора тока, с;

$K_{pm}$  – коэффициент передачи регулятора тока.

Постоянная времени регулятора тока равна постоянной времени якоря электродвигателя:

$$T_{pm} = T_{я} = 0,01 [с].$$

Коэффициент передачи регулятора тока вычисляется по следующей формуле [14]:

$$K_{pm} = \frac{T_{я} \cdot R_{я}}{2T_{\mu l} \cdot K_{\partial m}},$$

где  $T_{\mu l} = T_{\partial m} = 0,005 [с]$ .

Подставим в данную формулу известные значения (приведены в приложении А) и выполним расчёт:

$$K_{pm} = \frac{0,01 [с] \cdot 6,8 [Ом]}{2 \cdot 0,005 [с] \cdot 1} = \frac{0,068}{0,01} = 6,8 [Ом].$$

Однако, в данной системе используется следующая модель регулятора тока:

$$W'_{pm}(s) = K'_{pm} \frac{1 + T_{pm} \cdot s}{s}.$$

Сравнивая данные модели можно определить коэффициент усиления для используемого регулятора:

$$K'_{pm} = \frac{K_{pm}}{T_{pm}} = \frac{6,8 [Ом]}{0,01 [с]} = 680 \left[ \frac{Ом}{с} \right].$$

### 1.3.2 Расчёт параметров регулятора скорости.

Поскольку единственным параметром регулятора скорости является его коэффициент усиления, выполним его расчёт по следующей формуле:

$$K_{pc} = \frac{T_{эм}}{T_{\mu\omega} \cdot K_{\delta c} \cdot K_p \cdot \frac{R_{я}}{C_e}}.$$

Выразим неизвестные параметры в приведённой выше формуле через известные:

$$T_{эм} = J_n \cdot \frac{R_{я}}{C_e^2 \cdot \Phi_n^2}, \text{ где } \Phi_n = \frac{M_n}{C_m \cdot l_n},$$

$$T_{\mu\omega} = T_{\delta c} + 2T_{\mu l},$$

$$J_n = J_{\delta} + J_n \cdot K_p^2.$$

Выполним расчёт:

$$\Phi_n = \frac{0,039 [H \cdot м]}{0,028 [B \cdot с] \cdot 1,4 [A]} = 0,995 \left[ \frac{H \cdot м}{B \cdot с \cdot A} \right],$$

$$J_n = 1,35 \cdot 10^{-5} [кг \cdot м^2] + 0,15 [кг \cdot м^2] \cdot 0,01^2 = 1,35 \cdot 10^{-5} [кг \cdot м^2] + 1,5 \cdot 10^{-5} [кг \cdot м^2] = 2,85 \cdot 10^{-5} [кг \cdot м^2],$$

$$T_{эм} = 2,85 \cdot 10^{-5} [кг \cdot м^2] \cdot \frac{6,8 [Ом]}{0,028^2 [B^2 \cdot с^2] \cdot 0,995^2 \left[ \frac{H^2 \cdot м^2}{B^2 \cdot с^2 \cdot A^2} \right]} =$$

$$= 2,85 \cdot 10^{-5} [кг \cdot м^2] \cdot 8760,859 \left[ \frac{Ом \cdot A^2}{H^2 \cdot м^2} \right] = 0,25 \left[ \frac{кг \cdot Ом \cdot A^2}{H^2} \right],$$

$$T_{\mu\omega} = 0,005 [с] + 2 \cdot 0,005 [с] = 0,015 [с],$$

$$K_{pc} = \frac{0,25 \left[ \frac{кг \cdot Ом \cdot A^2}{H^2} \right]}{0,015 [с] \cdot 1 \cdot 0,01 \cdot \frac{6,8 [Ом]}{0,028 [B \cdot с]}} = \frac{0,25 \left[ \frac{кг \cdot Ом \cdot A^2}{H^2} \right]}{0,0364 \left[ \frac{Ом}{B} \right]} = 6,8 \left[ \frac{кг \cdot B \cdot A^2}{H^2} \right] =$$

$$= 6,8 \left[ \frac{A}{с} \right].$$

### 1.3.3 Расчёт параметров регулятора положения

Расчет коэффициента пропорционального регулятора положения затруднен тем, что имеющаяся система является нелинейной. А известные методы касаются только линейных систем [25]. Поэтому была разработана программа рассчитывающая зависимость показателя колебательности системы в зависимости от коэффициента регулятора положения при различных степенях ограничения тока. Под степенью ограничения тока в данном случае подразумевается величина обратная коэффициенту гармонической линеаризации, нелинейности ограничивающей ток якоря.

Текст программы приведен в приложении Б, результаты работы программы представлены на рисунке 1.4.

Исходя из того, что в системе требуется обеспечить наименьшее регулирования во всем диапазоне входных воздействий, показатель колебательности должен быть равен 1 при любой степени ограничения тока якоря. Исходя из этого Крп целесообразно выбрать равным 10. Использовать меньшее значение не желательно, поскольку при этом будет увеличиваться время регулирования.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

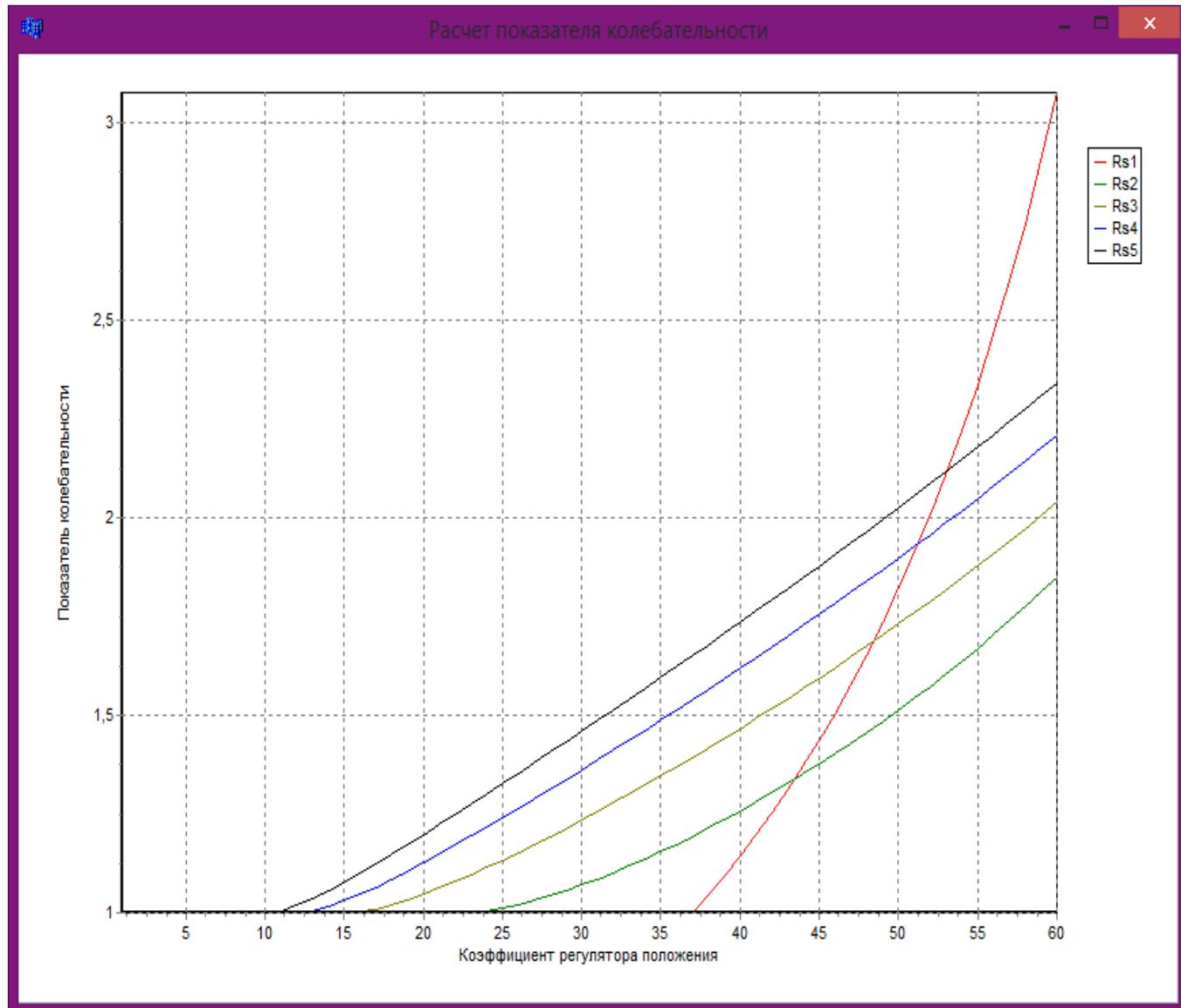


Рисунок 1.4 – Зависимость показателя колебательности от коэффициента регулятора положения

#### Итоги проделанных расчётов

Выше был проведён расчёт и определение всех неизвестных параметров рассматриваемой следящей системы подчинённого регулирования с классическими регуляторами. Параметры данных регуляторов: тока, скорости и положения в соответствии с формулами должны иметь следующие значения:  $K_{pm} = 680$ ,  $T_{pm} = 0,01$  с,  $K_{pc} = 6,8$ ,  $K_{pn} = 10$ .

#### 1.4 Моделирование

Моделирование осуществлялось с помощью прикладного пакета MATLAB, в котором реализована графическая среда имитационного моделирования Simulink. Модель готовой системы приведена на рисунке 1.5. Она полностью соответствует структурной схеме системы изображенной на рисунке 1.3.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

## Переходные процессы

Теперь, когда все параметры системы известны и построена структурная схема, проведём имитационное моделирование имеющейся системы при различных входных параметрах.

Реакция на ступенчатое воздействие, приложенное к нашей системе, изображена на рисунках ниже.

### **Моделирование при входном сигнале $G = 0.1 \text{ рад}$ .**

В результате проведённого моделирования показатели качества переходного процесса получились следующими: установившееся значение  $A = 0.1 \text{ рад}$ , перерегулирование отсутствует, время регулирования  $\tau = 0.332 \text{ с}$  [19]. Столь плавная переходная характеристика подтверждает оптимальный подбор значений параметров регуляторов, однако, если вид данной характеристики изменится при смене входного сигнала, то это значит, что параметры рассчитаны некорректно и требуют пересчёта. Соответствующая переходная характеристика приведена на рисунке 1.6.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

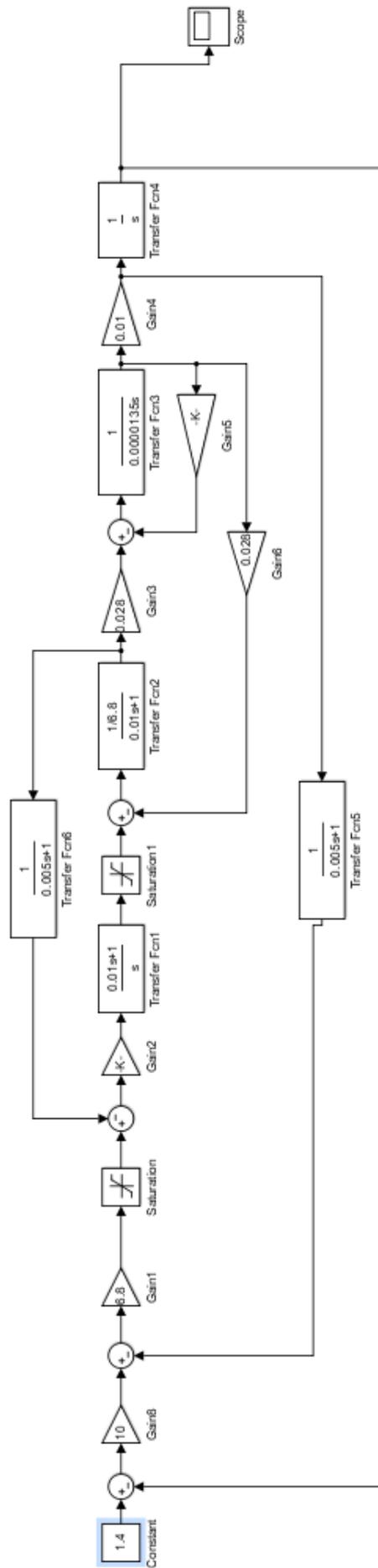


Рисунок 1.5 – Simulink-модель следящей системы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

09.03.01.2018.200.00 ПЗ

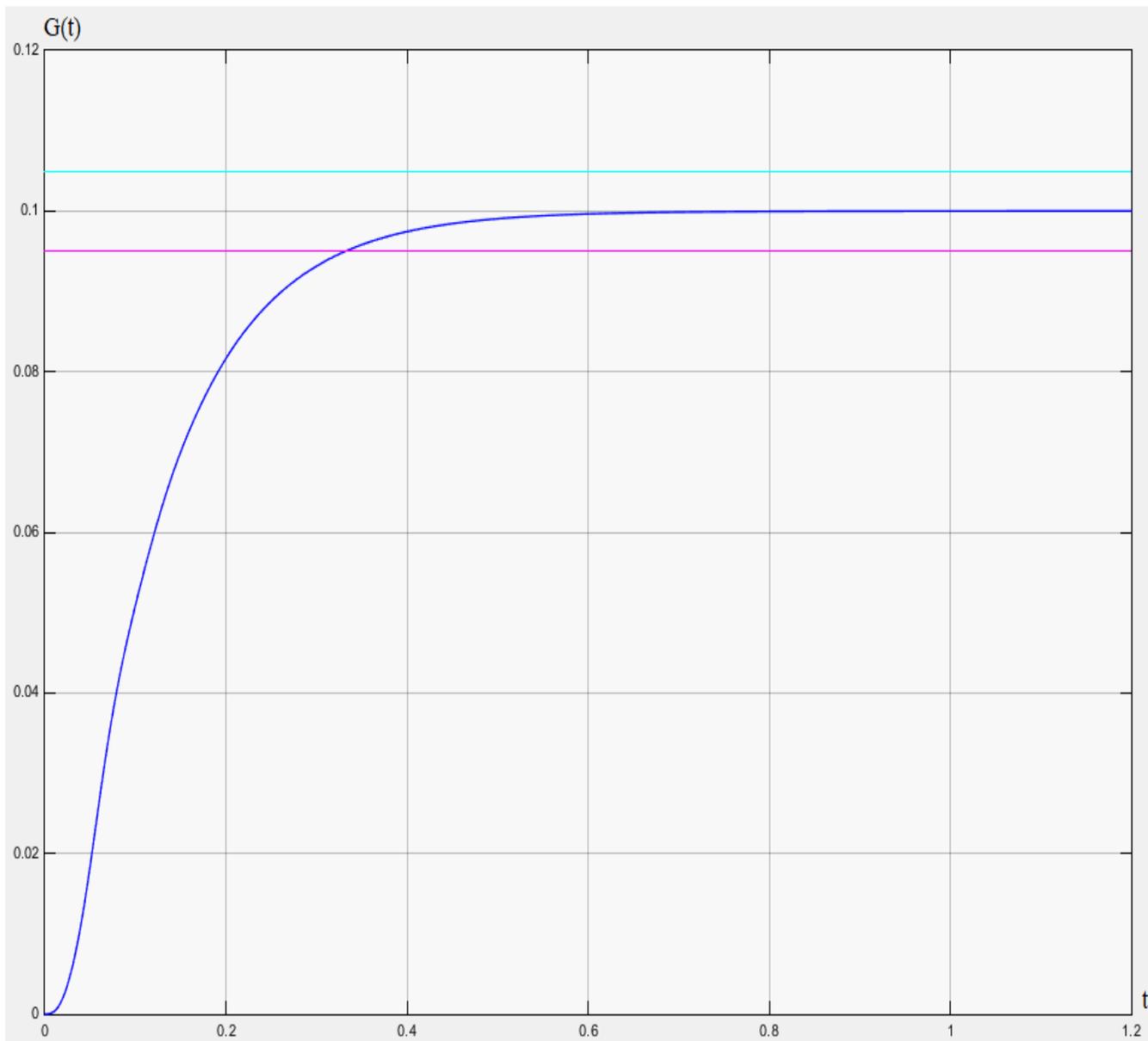


Рисунок 1.6 – Переходный процесс при ступенчатом входном воздействии  $G = 0.1 \text{ рад}$

**Моделирование при входном сигнале  $G = 0,5 \text{ рад}$ .**

В результате проведённого моделирования показатели качества переходного процесса получились следующими: установившееся значение  $A = 0.5 \text{ рад}$ , перерегулирование отсутствует, время регулирования  $\tau = 0.413 \text{ с}$ . Как видно из графика на рисунке 1.7, плавность переходного процесса сохраняется, единственное заметное изменение, что логично – увеличилось время переходного процесса. Однако, на всякий случай следует провести имитационное моделирование при ещё одном, отличном от уже используемых, входном сигнале. Соответствующая переходная характеристика приведена на рисунке 1.7.

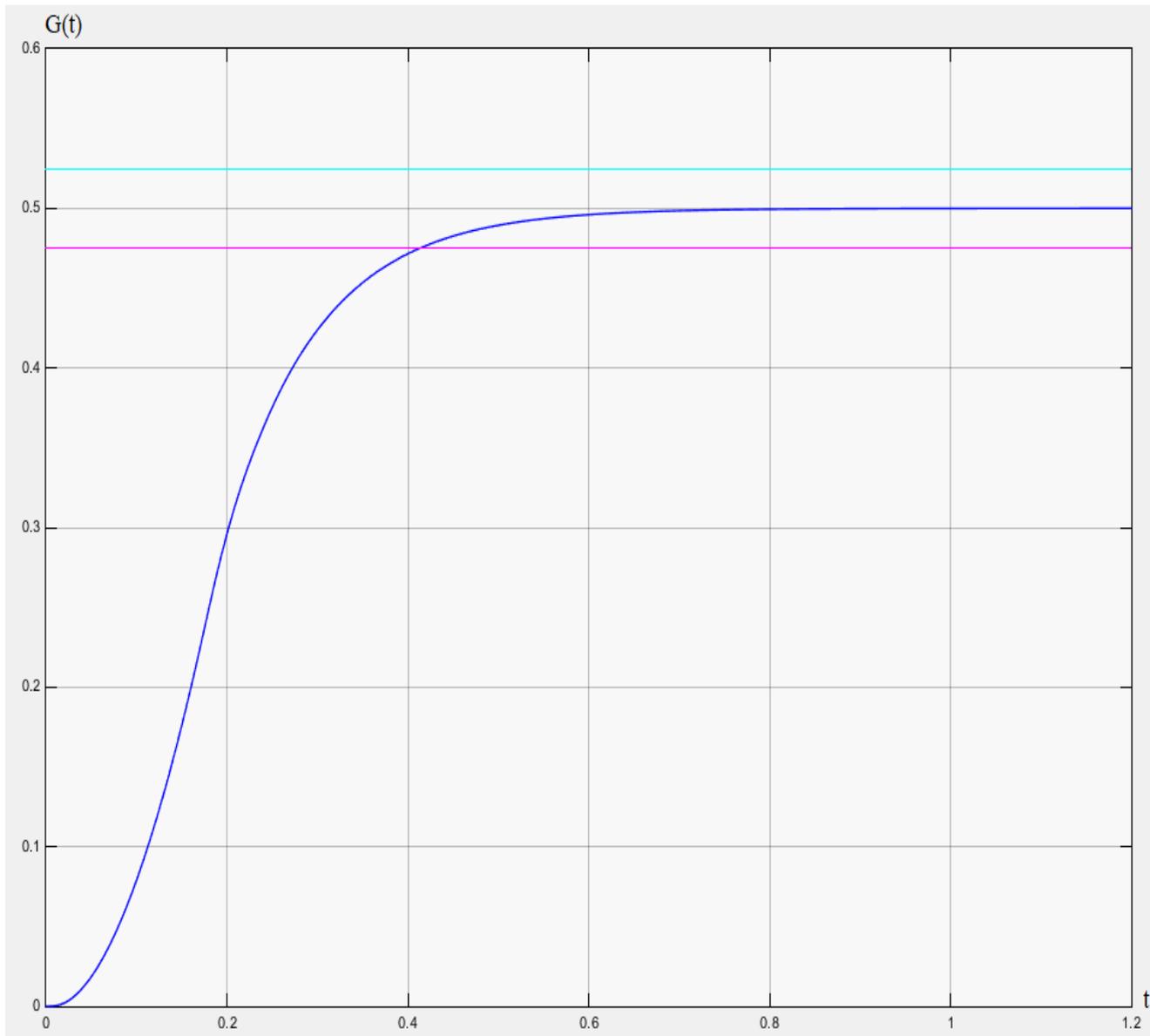


Рисунок 1.7 – Переходный процесс при ступенчатом входном воздействии  $G = 0.5 \text{ рад}$

**Моделирование при входном сигнале  $G = 1 \text{ рад}$ .**

В результате проведённого моделирования показатели качества переходного процесса получились следующими: установившееся значение  $A = 1 \text{ рад}$ , перерегулирование отсутствует, время регулирования  $\tau = 0.495 \text{ с}$ . Здесь время переходного процесса опять немного увеличилось, что, как было сказано ранее, нормально при увеличении значения входного сигнала. Плавность переходного процесса также сохранилось, что, собственно говоря, подтверждает сделанное выше предположение о корректности рассчитанных в пункте 1.3 данной выпускной квалификационной работы параметров регуляторов системы. Соответствующая переходная характеристика приведена на рисунке 1.8.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

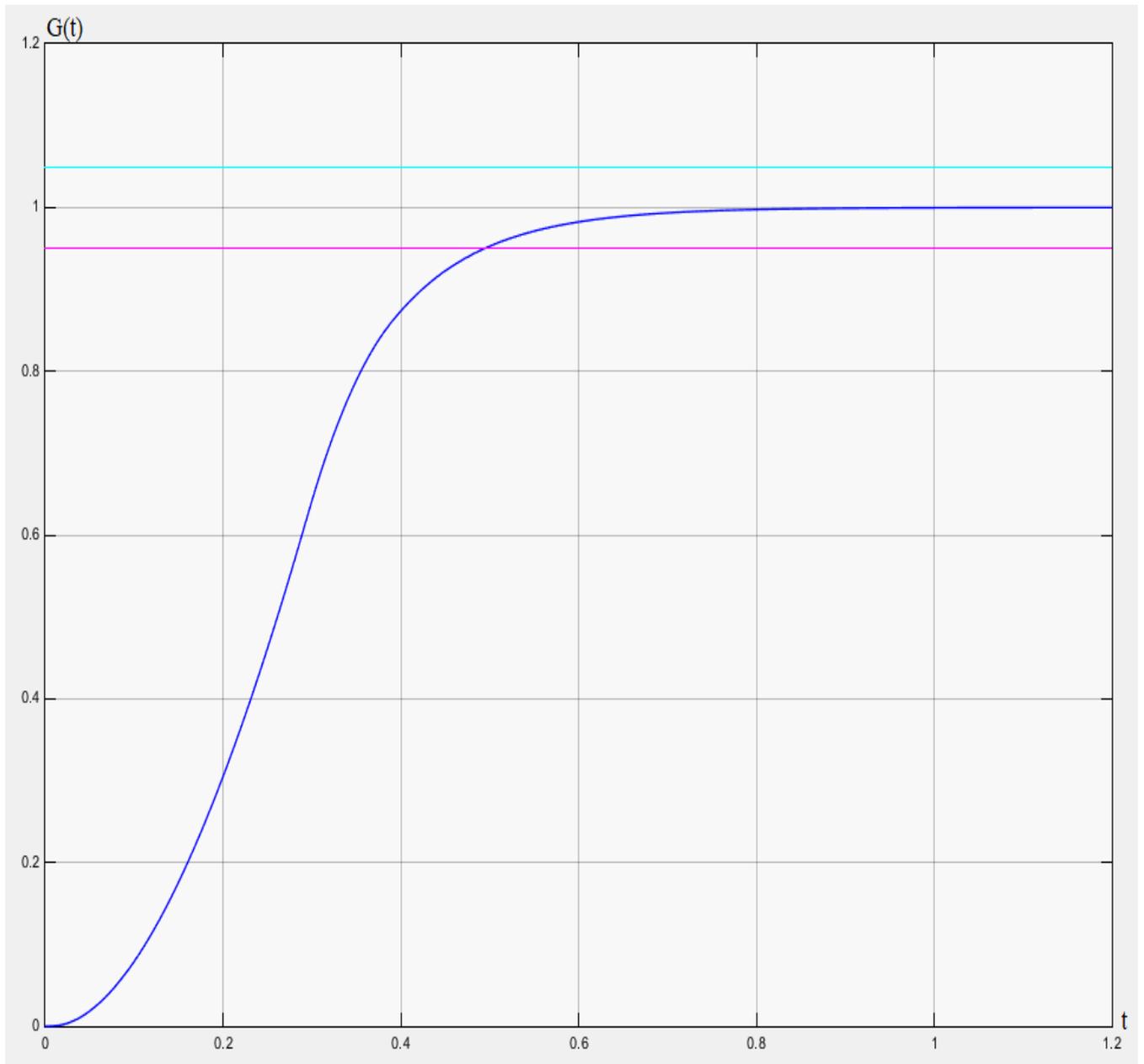


Рисунок 1.8 – Переходный процесс при ступенчатом входном воздействии  $G = 1 \text{ рад}$ .

Результаты свидетельствуют, что качество переходного процесса осталось на прежнем уровне, кроме времени регулирования, которое увеличилось, поскольку в системе ограничен ток якоря.

Вывод по разделу один

В данной главе проведен расчет регуляторов классической следящей системы подчиненного регулирования. Результаты моделирования свидетельствуют, что синтезированная система обеспечивает хорошее качество переходных процессов.

## 2 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЁТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

В работах Заде были предложены методы нечёткой логики. В основе данных методов лежит понятие нечёткого множества и функции принадлежности некоторых элементов к такому множеству. В работах введены понятия лингвистической переменной, применяемой для описания поведения трудно определяемых систем. Это достигается за счет возможности принимать значения фраз естественного или искусственного языка. Вводятся процедуры фаззификации для перевода количественных данных в качественные понятия и процедура дефаззификации, выполняющая обратную функцию [17].

Преимуществом регулятора на основе нечёткой логики является то, что с помощью естественно-языковых высказываний-правил «Если – то», с последующей их формализацией средствами теории нечётких множеств, можно сколь угодно точно отразить произвольную взаимосвязь «входы-выходы» без использования аппарата дифференциального и интегрального исчислений, традиционно применяемых при построении управления [15]. Это становится важным тогда, когда сложно по-другому описать процесс управления, а также при зависимости управляемого параметра от большого количества переменных.

Использование нечёткой логики для решения задач управления позволяет с достаточной степенью точности аппроксимировать нелинейную модель совокупностью линейных систем, для анализа которых применимы методы классической теории управления.

Недостатками метода являются трудности в достижении желаемых показателей качества системы и затрудненность анализа устойчивости системы.

### 2.1 История развития теории нечёткой логики

Профессором Лотфи Заде из США в 1965 году впервые был заложен «фундамент» теории нечётких множеств в опубликованной статье «Fuzzy sets» («Нечёткие множества»). В этой статье вводилось само понятие нечёткого множества и предлагались сама идея и первая концепция теории, дававшей возможность нечёткого описания реальных систем. Основным элементом теории нечётких множеств явилась нечёткая логика, применяемая для управления системами.

Первым опытом внедрения нечёткой логики стала система управления котельными установками электростанции – реализована в Европе. Однако практические результаты применения не вызвали какого-либо интереса как в Америке, так и в Европе. Страной, которая первой осознала огромный потенциал нечёткой логики и начала её повсеместное использование, стала Япония.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

Среди созданных в Японии прикладных нечётких САУ, наибольшую известность получила разработанная компанией Hitachi САУ поездами метрополитена. Проект реализован с помощью опытного машиниста, на основе знаний и опыта которого была разработана модель управления. САУ осуществляла снижение скорости поезда при подъезде его к станции, останавливаясь в требуемом месте. Стремительное развитие нечёткой логики в Японии стало причиной того, что нечёткую логику стали использовать как в промышленности, так и в производимых в Японии товарах народного потребления. Так, например, была создана видеокамера, оборудованная нечёткой подсистемой стабилизации изображения. Другой пример – автоматическая стиральная машина, управляемая одним нажатием кнопки. Только компания Omron из города Киото за 1993г. запатентовала более 700 изделий [24].

Повсеместное использование нечёткой логики в продуктах японской промышленности привлекло внимание в мире и, начиная с 1990-х годов, наблюдается интенсивное развитие методов нечёткой логики. Исследуются возможности применения нечёткой логики в медицине, управлении транспортом, системах климат-контроля, системах теплоснабжения и прочие.

## 2.2 Основные термины теории нечётких множеств

Качественно оценивая действительность, люди выработали логические и интеллектуальные способности, которыми не обладает искусственный интеллект, несмотря на интенсивное совершенствование его возможностей. На основе этого учеными и инженерами ведутся работы по созданию такого искусственного интеллекта, который имитировал бы человеческий интеллект и использовал сходные с человеческими принципы принятия решений. Главнейшим условием создания такого интеллекта является перевод нечётких, качественных оценок, используемых людьми, на язык математики. Это позволит преобразовывать чёткие и точные показания приборов в терминологию качественных оценок, и использовать их в алгоритмах искусственного интеллекта, основанных на правилах, наподобие тех, что лежат в основе людских рассуждений, а также реализовывать в системах обработки информации математические модели ОУ и алгоритмах управления величины, определяемые человеческим разумом [8].

Формализацию качественных оценок позволяет реализовать теория нечётких множеств, использующая следующие основные понятия:

**Лингвистическая переменная** – переменная с лингвистическими значениями, выражающими качественные оценки (давление, скорость, сопротивление)

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

**Лингвистическое значение** – является значением лингвистической переменной, выраженное в словесной форме. Присутствует в выражении совместно с лингвистической переменной (сильный, слабый, малый).

**Нечёткие числа** – нечёткое подмножество множества действительных чисел, имеющее нормальную и выпуклую функции принадлежности (примерно 10, не больше 30).

**Лингвистическая область** – множество всех лингвистических значений, используемых для определения некой лингвистической переменной.

**Нечёткое множество** – множество пар  $A = \{\mu_A(x), x\}$ ,  $\forall x \in X$  где для каждого элемента степень принадлежности  $\mu_A$  его множеству  $A$  задаётся функцией принадлежности  $\mu_A(x)$  такой, что  $\mu_A \in [0,1]$ .

**Функция принадлежности** – ставит в соответствие каждому  $x$  заданной переменной некоторое число из интервала  $[0,1]$ .

**Степень принадлежности** – характеризует степень, с которой элемент  $x$  принадлежит нечёткому множеству  $A$  [11].

### 2.3 Основные операции в нечёткой логике

Основными элементами нечётких моделей являются логические правила вида:

ЕСЛИ ( $x_1$  среднее) И ( $x_2$  большое) ТО ( $y$  малое)

Для обработки такого типа информации необходимо использовать ряд операций, в основном логического характера. Совокупность этих операций и связанные с ними понятия объединены общим названием «нечёткая математика».

Реальную систему можно описать, используя логические правила, описывающие её функционирование. Таким образом строится нечёткая модель.

Если нечёткие множества, такие как «среднее», «большое», используются для вычисления входных и выходных состояний системы, то логические связки задают качественные отношения между этими состояниями. Точность модели зависит от способа задания в ней нечётких множеств и от используемых логических связок (базы правил) [11].

Логическими связками называются операторы:

- И,  $\cap$ ,  $\wedge$  - оператор конъюнкции;
- ИЛИ,  $\cup$ ,  $\vee$  - оператор дизъюнкции
- НЕ,  $\neg$  - оператор инверсии

## 2.4 Типы нечётких моделей

По мере развития нечёткой логики идёт разработка новых типов нечётких моделей. Целью создания новых нечётких моделей является обеспечение большей точности при наиболее упрощённой структуре. Необходимость разработки новых моделей также вызвана большим разнообразием существующих систем, получением различной информации об этих системах, разной степенью её доступности.

Основное преимущество нечётких моделей, в сравнении с математическими, связано с возможностью использования для их разработки значительно меньших объёмов информации о системе, при этом информация может иметь приближённый характер. Существует два основополагающих типа нечётких моделей [29].

Наиболее часто используемой является модель Мамдани. Сама концепция нечёткой модели, имитирующей человеческий образ мышления, была изложена в работах Заде, но идея применения этой модели к нечёткому управлению динамическими объектами принадлежит Мамдани. Предложенный Мамдани метод отличается простотой и доступностью. В рамках этого метода объект управления рассматривается как чёрный ящик, характерной особенностью которого является неполнота информации о происходящих внутри процессах.

Цель метода – разработка модели, выполняющей такое отображение входов  $X$  в выход  $Y$ , которое обеспечивало бы наиболее точную аппроксимацию реальной системы. Модель Мамдани представляется множеством правил. Значение на выходе модели получают путём последовательного вычисления значений отдельных её элементов при известном векторе значений  $X$ . Обычно, в силу большого числа входов и функций принадлежности, точные формулы, задающие интерполяционную поверхность, неизвестны.

В настоящее время этот метод является наиболее распространённым, хотя и были разработаны другие методы, среди которых выгодно отличается метод Сугено. Модели на основе этого метода также называются нечёткими линейными моделями. От моделей Мамдани они отличаются формой правил. Вместо нечёткого множества, заключение каждого правила имеет функцию  $f(x)$ , которая может быть, как линейной, так и нелинейной. Модели Сугено позволяют наиболее удобным способом описывать регуляторы. В настоящее время существуют различные методики проектирования линейных регуляторов, позволяющие аппроксимировать сложную нелинейную модель множеством плоских линейных сегментов. Каждый такой сегмент можно задать правилом в модели Сугено. Вследствие локальной линейности модели, её использование в представлении регуляторов упрощает доказательство устойчивости СУ. Модель

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

Мамдани можно назвать простейшей формой модели Сугено, а модель Сугено, в свою очередь – обобщение модели Мамдани.

## 2.5 Функциональная схема классического нечеткого регулятора

Функциональная схема системы автоматического управления на базе нечёткой логики (системы управления с нечётким регулятором или системы фаззи-управления) приведена на рисунке 2.1.

Схема состоит из устройства сравнения, нечёткого регулятора НР, объекта управления ОУ и цепи обратной связи.

Нечёткий регулятор (фаззи-регулятор, fuzzy-controller) включает три основных блока – блок фаззификации (fuzzyfication), блок формирования логического решения (inference) и блок дефаззификации (de-fuzzyfication).

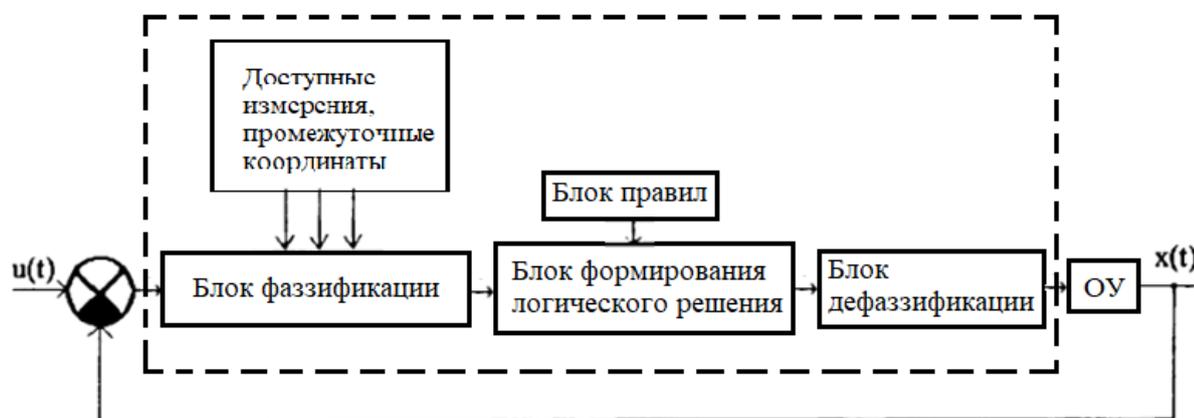


Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы управления с нечетким регулятором

Блок фаззификации осуществляет преобразование измеренных реальных данных (например, скорости, температуры, давления и т.д.) в подходящие для этого значения лингвистических переменных. Он выполняет функцию преобразования четких значений входных переменных в нечеткие. Такое преобразование фактически является своего рода нормированием, необходимым для перевода измеренных данных в субъективные оценки. Следовательно, оно может быть определено как отображение наблюдаемых значений входных переменных в соответствующие нечеткие.

База правил (база нечетких правил) содержит опытные данные о процессе управления и знания экспертов в данной области. Правила нечеткой логики представляются набором нечетких конструкций, в которых предпосылки и заключения подразумевают использование лингвистических переменных. Этот набор управляющих правил нечеткой логики (или нечетких управляющих утверждений) характеризует связь входа системы с ее выходом.

Блок формирования логического решения является ядром СНЛ, он моделирует процедуру принятия решения человеком. Организация вывода основана на проведении рассуждений по нечетким входным данным в целях достижения необходимой стратегии управления или принятия решения. Блок вывода представляет собой ядро СНЛ, используемое для моделирования приближенных рассуждений и процесса принятия решений человеком в сложных ситуациях. Нечёткие выводы, нечёткие или приближенные рассуждения — это наиболее важные моменты при использовании средств нечёткой логики в управлении сложными объектами. Почти все реально работающие прикладные системы, использующие промежуточные нечёткие отношения, это системы, основанные на нечётких продукционных правилах.

Блок дефаззификации применяется для выработки чёткого решения или управляющего воздействия в ответ на результаты, полученные в блоке вывода. Под дефаззификацией понимается процедура преобразования нечётких величин, получаемых в результате нечёткого вывода, в чёткие. Эта процедура является необходимой в тех случаях, где требуется интерпретация нечётких выводов конкретными чёткими величинами.

В настоящее время отсутствует систематическая процедура выбора стратегии дефаззификации. На практике часто используют два наиболее общих метода: метод центра тяжести (ЦТ центроидный), метод максимума (ММ) [26].

## 2.6 Fuzzy Logic Toolbox

Fuzzy Logic Toolbox – это пакет расширения MATLAB, содержащий инструменты для проектирования систем нечеткой логики. Пакет позволяет создавать экспертные системы на основе нечеткой логики, проводить кластеризацию нечеткими алгоритмами, а также проектировать нечеткие нейросети.

Пакет включает графический интерфейс для интерактивного пошагового проектирования нечетких систем, функции командной строки для разработки программ, а также специальные блоки для построения систем нечеткой логики в Simulink.

Все функции пакета написаны на открытом языке MATLAB, что позволяет контролировать исполнение алгоритмов, изменять исходный код, а также создавать свои собственные функции и процедуры.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

### Вывод по разделу два

В данной главе рассмотрены принципы построения регуляторов на базе нечёткой логики. Из вышеизложенного следует, что подобные регуляторы могут быть применены в следящих системах подчиненного регулирования.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 3 СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ПОЛОЖЕНИЯ

Соответствующая структурная схема следящей системы подчиненного регулирования с нечетким регулятором положения изображена на рисунке 3.1. Как видно из данной схемы единственными отличиями от схемы системы с классическим регулятором является альтернативный блок самого регулятора (нечёткий регулятор вместо П-регулятора [35]), а также подведения к регулятору ещё одного входа – от обратной связи по скорости.

#### 3.1 Работа с нечёткой логикой в программной среде MATLAB

На начальном этапе нам необходимо определиться со значениями наших лингвистических переменных, а также с их количеством. Возьмём пять различных лингвистических значений для каждой переменной [22]: отрицательная большая, отрицательная малая, нулевая, положительная малая, положительная большая. В данном случае было выбрано пять переменных, поскольку использование только трёх – слишком мало для адекватной работы нечёткого регулятора, а семи и выше является чрезмерно трудоёмким процессом. В таблице 1 представлены соответствия лингвистических значений нечётких переменных и их численных эквивалентов нечёткого регулятора положения.

Таблица 1 – Лингвистические значения и их численные эквиваленты

Лингвистическое значение переменной $X_1$	<i>ОБ</i>	<i>ОМ</i>	<i>Н</i>	<i>ПМ</i>	<i>ПБ</i>
Численный эквивалент лингвистического значения $X_1$	-1	-0,5	0	+0,5	+1
Лингвистическое значение переменной $X_2$	<i>ОБ</i>	<i>ОМ</i>	<i>Н</i>	<i>ПМ</i>	<i>ПБ</i>
Численный эквивалент лингвистического значения $X_2$	-4	-2	0	+2	+4
Лингвистическое значение выхода $U$	<i>ОБ</i>	<i>ОМ</i>	<i>Н</i>	<i>ПМ</i>	<i>ПБ</i>
Численный эквивалент лингвистического значения выхода $U$	-10	-5	0	+5	+10

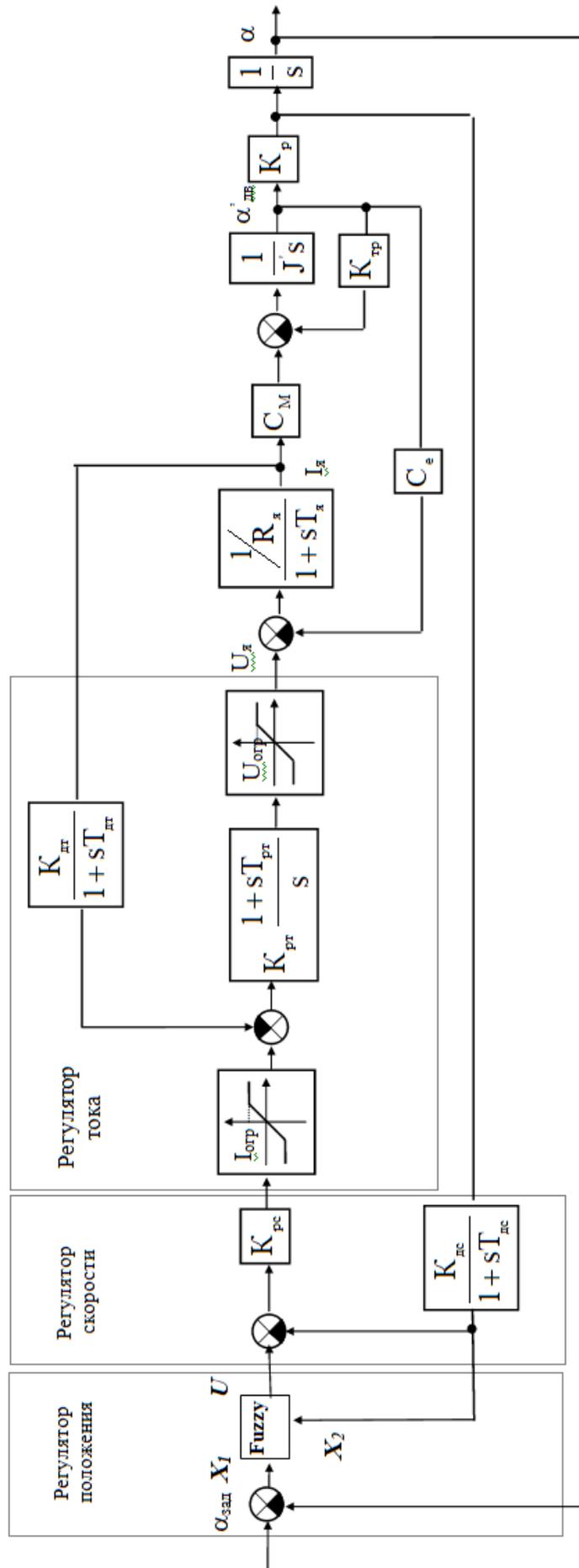


Рисунок 3.1 - Структурная схема следящей системы подчиненного регулирования с нечетким регулятором положения

Работа начинается с команды `fuzzy` в командной строке программы MATLAB. Далее открывается пользовательский интерфейс или по-другому FIS редактор, показанный на рисунке 3.2.

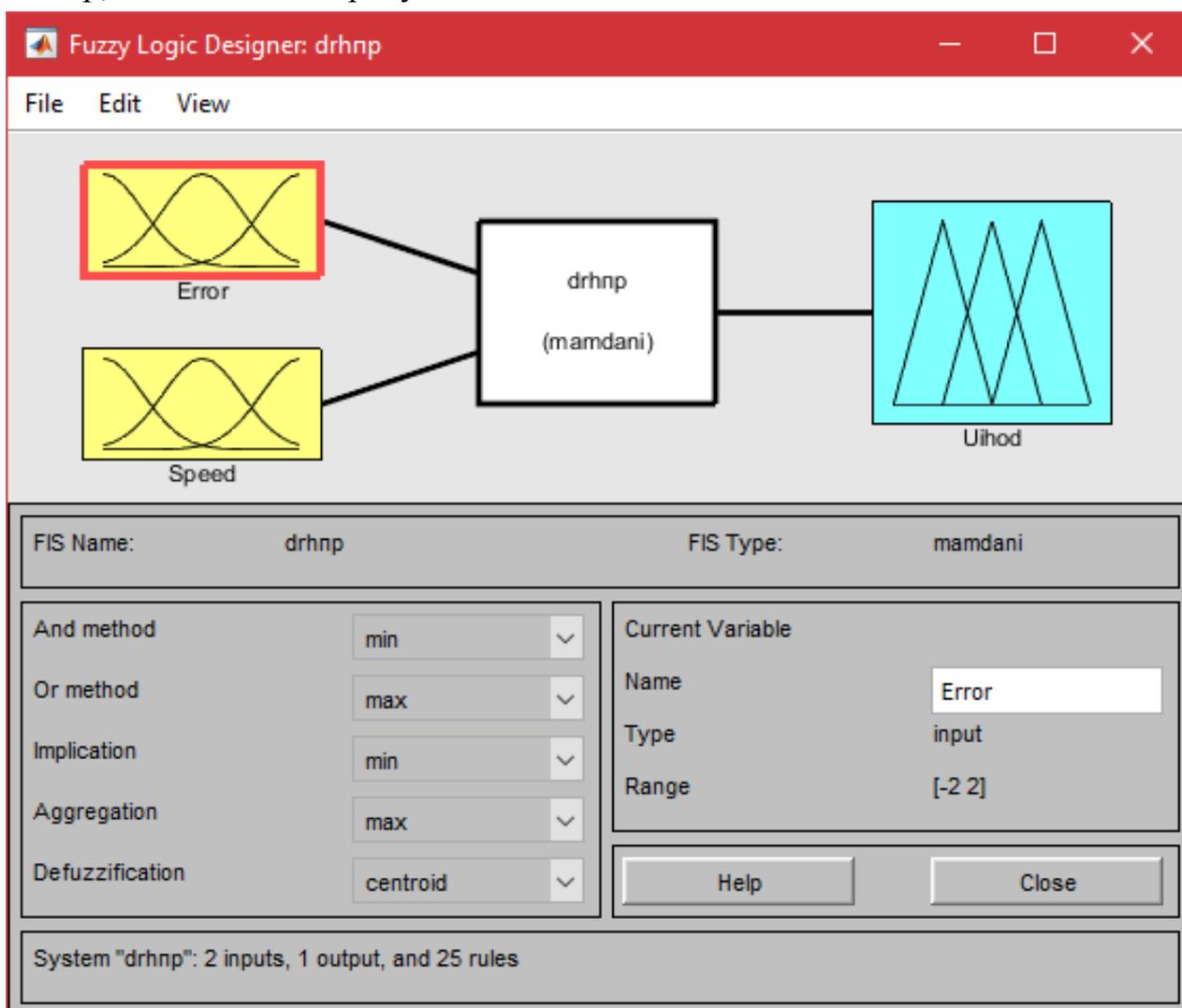


Рисунок 3.2 – Пользовательский интерфейс fuzzy logic

Этот редактор позволяет создавать входы, выходы, редактировать функции принадлежности, редактировать правила, смотреть работу правил и отображать поверхность отклика. Поначалу предлагается алгоритм логического вывода Мамдани, которым мы и будем использовать. Выполним настройку функций принадлежности.

### Настройка функций принадлежности входа ошибки.

Работа с редактором функции принадлежности начинается с двойного щелчка мыши по значку, отображающим переменные. С самого начала указывается диапазон изменения значений. В нашем случае с графиком по ошибке он будет от -2 до 2. Затем задаем 3 функций принадлежности треугольного типа с заданными в таблице 1 вершинами и 2 типа `zmf` с установкой в единицу, начиная с указанного в той же таблице значения, соответствующего той лингвистической переменной, за которую данная функция отвечает. Для

более простого ориентирования мы зададим свои названия для вершин. Как можно понять, здесь каждая функция принадлежности отвечает за одну определённую лингвистическую переменную [34]. Настроенные функции принадлежности для входа ошибки показаны на рисунке 3.3.

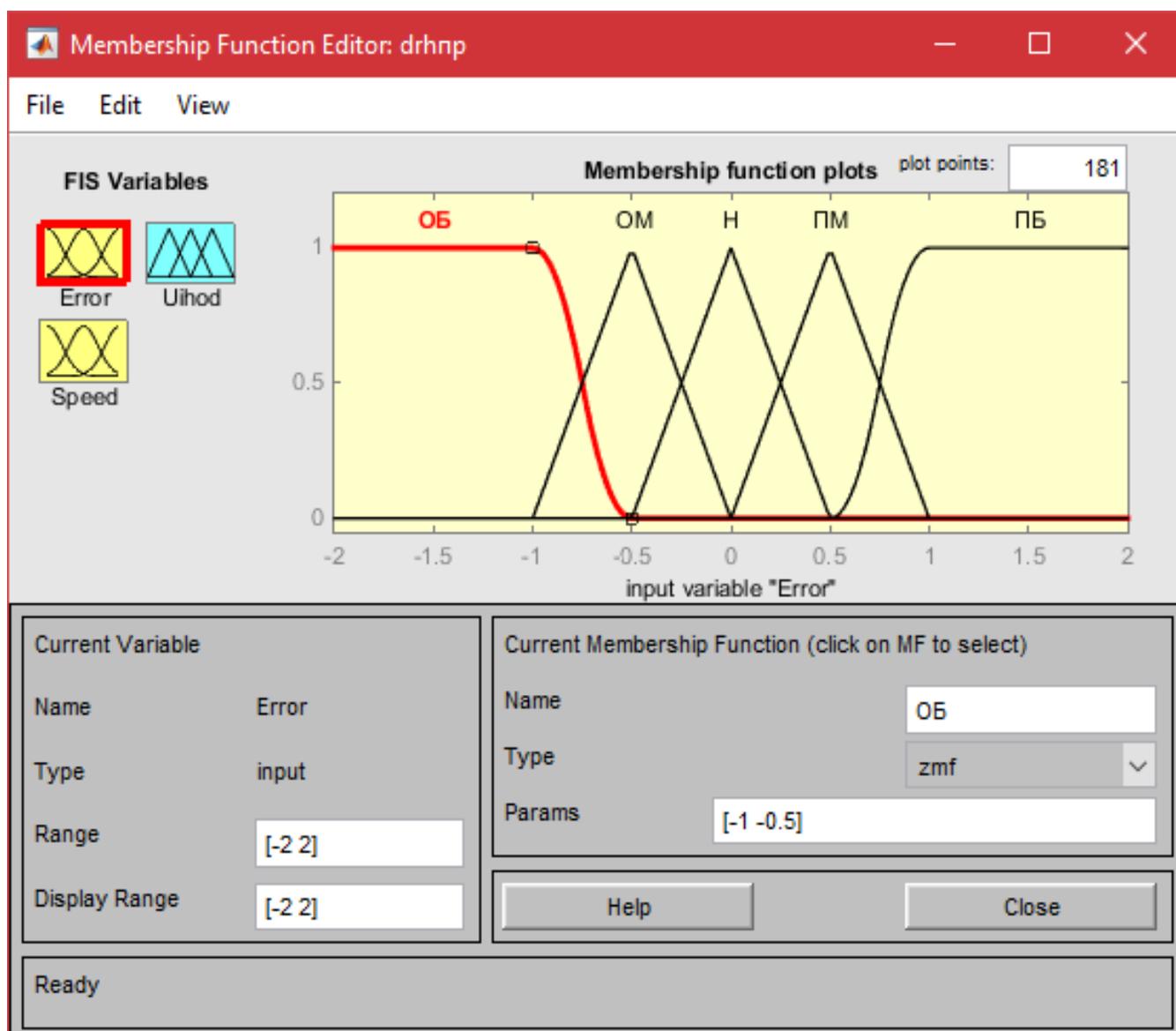


Рисунок 3.3 – Функция принадлежности для ошибки

### Настройка функций принадлежности входа скорости.

Как и в случае входа ошибки, настройка функций принадлежности входа скорости начинается с установки диапазона изменения значений. В случае графика по скорости он будет от -5 до 5. Затем, также, как и для предыдущего входа, задаем 3 функций принадлежности треугольного типа с соответствующими для своих лингвистических переменных вершинами и, аналогично, 2 типа zmf. Для более простого ориентирования мы зададим свои названия для вершин. Настроенные функции принадлежности для входа скорости показаны на рисунке 3.4.



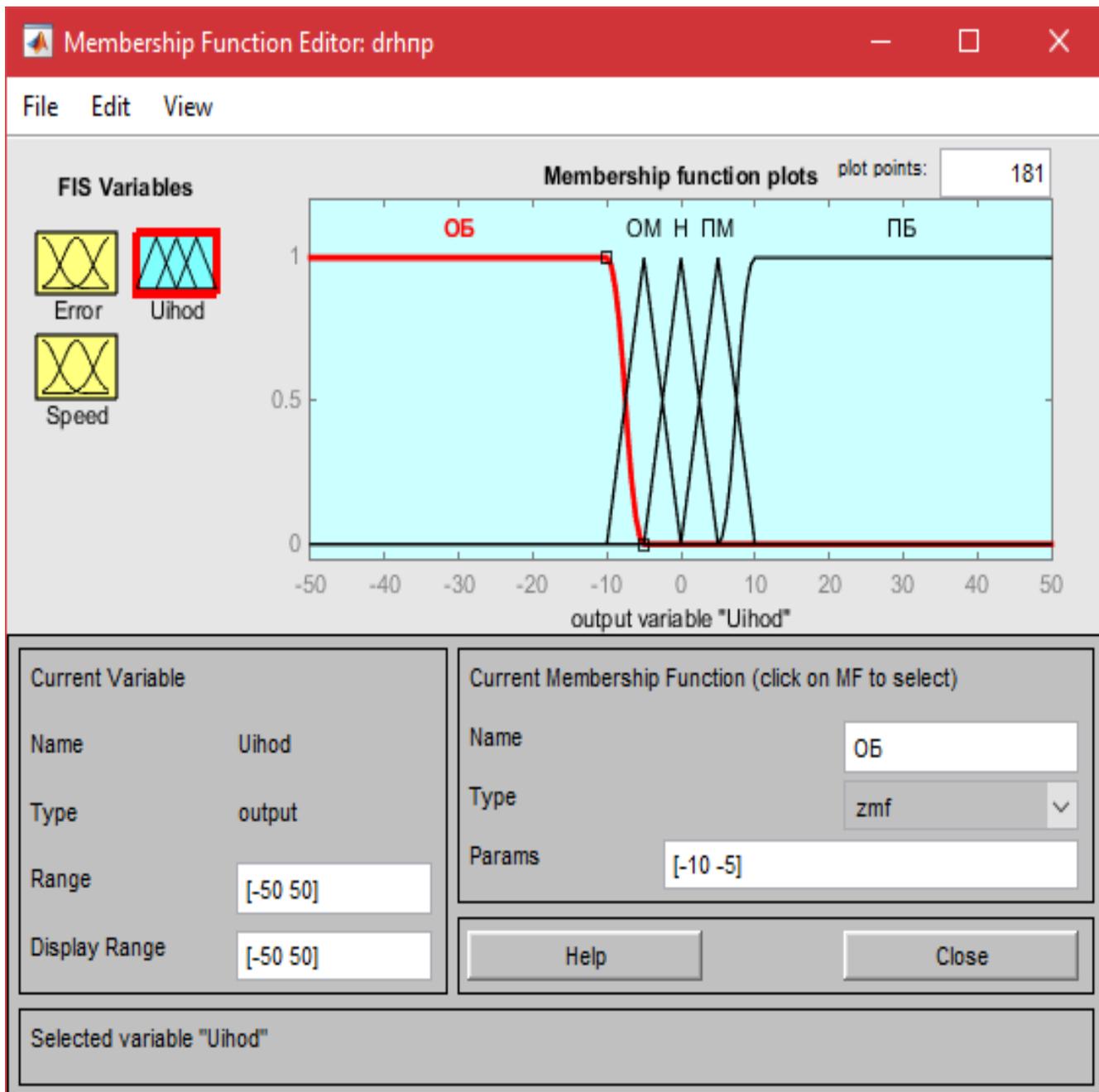


Рисунок 3.5 – Функция принадлежности для выходного сигнала

После того как сформированы все функции принадлежности необходимо составить базу правил. База правил систем нечёткого вывода предназначена для формального представления эмпирических знаний экспертов в той или иной предметной области в форме нечетких продукционных правил. Таким образом, база нечетких продукционных правил системы нечеткого вывода – это система нечетких продукционных правил, отражающая знания экспертов о методах управления объектом в различных ситуациях, характере его функционирования в различных условиях и т.п., т.е. содержащая формализованные человеческие знания [38].

Правила для нашей системы представлены в таблице 2. На основе представленного блока правил регулятора положения мы составляем таблицу

правил, представленных на рисунке 3.6. Редактор позволяет представлять правила в различных форматах отображения. В данном случае использовался формат подробней (verbose).

Таблица 2 – Блок правил в лингвистических значениях.

$X_1$	<i>ОБ</i>	<i>ОМ</i>	<i>Н</i>	<i>ПМ</i>	<i>ПБ</i>
$X_2$	Выход				
<i>ОБ</i>	<i>ОМ</i>	<i>ПМ</i>	<i>ПБ</i>	<i>ПБ</i>	<i>ПБ</i>
<i>ОМ</i>	<i>ОБ</i>	<i>Н</i>	<i>ПМ</i>	<i>ПБ</i>	<i>ПБ</i>
<i>Н</i>	<i>ОБ</i>	<i>ОМ</i>	<i>Н</i>	<i>ПМ</i>	<i>ПБ</i>
<i>ПМ</i>	<i>ОБ</i>	<i>ОБ</i>	<i>ОМ</i>	<i>Н</i>	<i>ПБ</i>
<i>ПБ</i>	<i>ОБ</i>	<i>ОБ</i>	<i>ОБ</i>	<i>ОМ</i>	<i>ПМ</i>

После того как таблица правил завершена, можно посмотреть на ее реализацию. Здесь можно посмотреть, как будет вести себя система при разных входных данных. На рисунке 3.7 представлена работа системы с параметрами скорости и ошибки равными нулю.

1. If (Error is ОБ) and (Speed is ОБ) then (Uihod is OM) (1)
2. If (Error is ОБ) and (Speed is OM) then (Uihod is ОБ) (1)
3. If (Error is ОБ) and (Speed is H) then (Uihod is ОБ) (1)
4. If (Error is ОБ) and (Speed is ПМ) then (Uihod is ОБ) (1)
5. If (Error is ОБ) and (Speed is ПБ) then (Uihod is ОБ) (1)
6. If (Error is OM) and (Speed is ОБ) then (Uihod is ПМ) (1)
7. If (Error is OM) and (Speed is OM) then (Uihod is H) (1)
8. If (Error is OM) and (Speed is H) then (Uihod is OM) (1)
9. If (Error is OM) and (Speed is ПМ) then (Uihod is ОБ) (1)
10. If (Error is OM) and (Speed is ПБ) then (Uihod is ОБ) (1)
11. If (Error is H) and (Speed is ОБ) then (Uihod is ПБ) (1)
12. If (Error is H) and (Speed is OM) then (Uihod is ПМ) (1)
13. If (Error is H) and (Speed is H) then (Uihod is H) (1)
14. If (Error is H) and (Speed is ПМ) then (Uihod is OM) (1)
15. If (Error is H) and (Speed is ПБ) then (Uihod is ОБ) (1)
16. If (Error is ПМ) and (Speed is ОБ) then (Uihod is ПБ) (1)
17. If (Error is ПМ) and (Speed is OM) then (Uihod is ПБ) (1)
18. If (Error is ПМ) and (Speed is H) then (Uihod is ПМ) (1)
19. If (Error is ПМ) and (Speed is ПМ) then (Uihod is H) (1)
20. If (Error is ПМ) and (Speed is ПБ) then (Uihod is OM) (1)
21. If (Error is ПБ) and (Speed is ОБ) then (Uihod is ПБ) (1)
22. If (Error is ПБ) and (Speed is OM) then (Uihod is ПБ) (1)
23. If (Error is ПБ) and (Speed is H) then (Uihod is ПБ) (1)
24. If (Error is ПБ) and (Speed is ПМ) then (Uihod is ПБ) (1)
25. If (Error is ПБ) and (Speed is ПБ) then (Uihod is OM) (1)

Рисунок 3.6 – Окно редактора правил

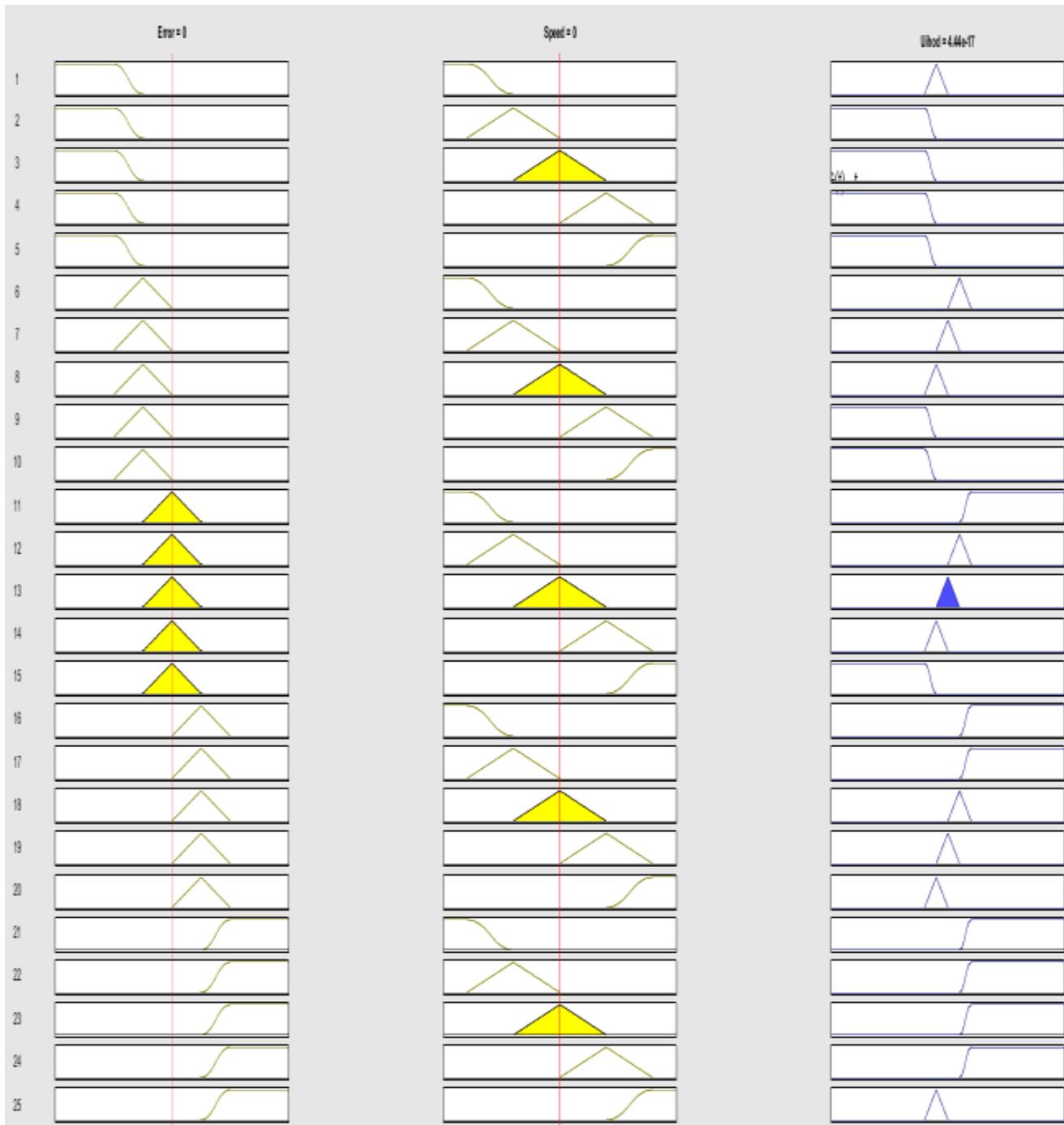


Рисунок 3.7 – Окно просмотра правил

В зависимости от полученных входных и выходных значений можно получить поверхность отклика, представленную на рисунке 3.8. При этом возможно менять параметры отображения.

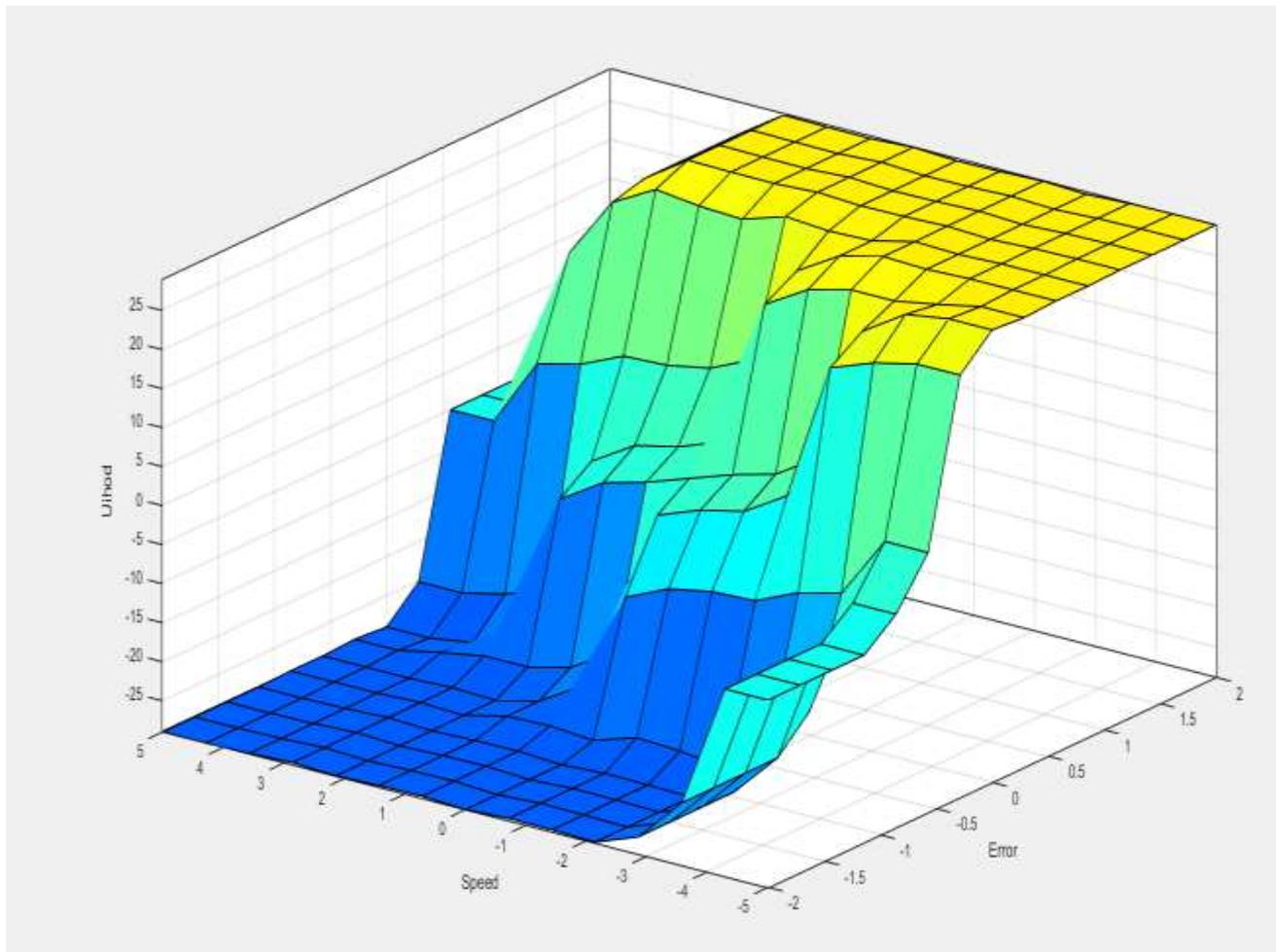


Рисунок 3.8 – Окно поверхности отклика

### 3.2 Добавление нечёткой логики в Simulink-модель следящей системы.

Для проведения моделирования необходимо составить схему моделирования системы с нечётким регулятором в прикладном пакете MATLAB. Данная схема была составлена аналогично пункту 1.4 данной выпускной квалификационной работы и приведена на рисунке 3.9.

Теперь, когда регулятор на базе нечёткой логики настроен, проведём имитационное моделирование системы при различных входных параметрах. Реакции на ступенчатое воздействие, приложенное к нашей системе, включающей нечеткую логику [7], изображены на рисунках ниже.

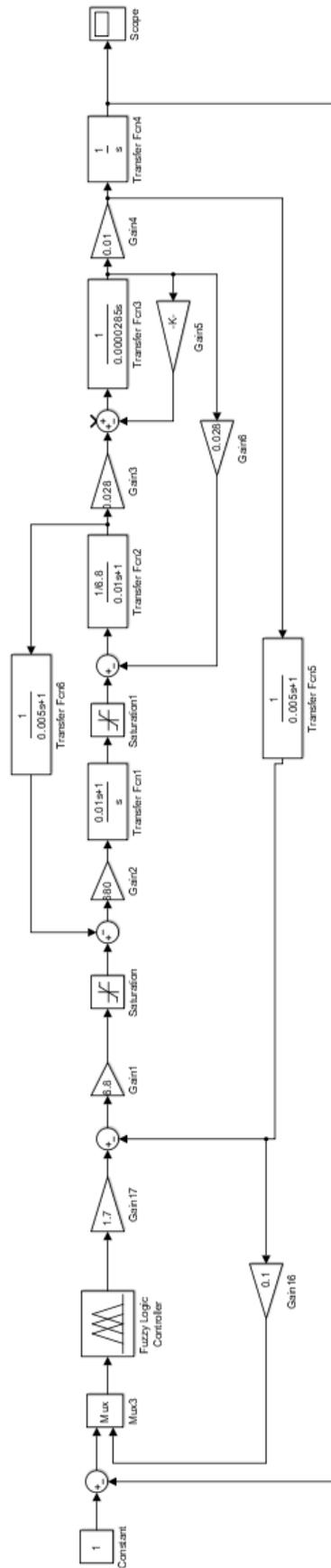


Рисунок 3.9 Схема Simulink-модели следящей системы с добавлением блока fuzzy logic

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

### Моделирование при входном сигнале $G = 0.1 \text{ рад}$ .

В результате проведённого моделирования показатели качества переходного процесса получились следующими: установившееся значение  $A = 0.1 \text{ рад}$ , перерегулирование отсутствует, время регулирования  $\tau = 0.238 \text{ с}$ . Столь плавная переходная характеристика подтверждает оптимальную настройку нечёткого регулятора, однако, если вид данной характеристики изменится при смене входного сигнала, то это значит, что нечёткий регулятор настроен некорректно и требует перенастройки. Соответствующая переходная характеристика приведена на рисунке 3.10. Также следует отметить, что по сравнению с классическим регулятором время переходного процесса значительно уменьшилось.

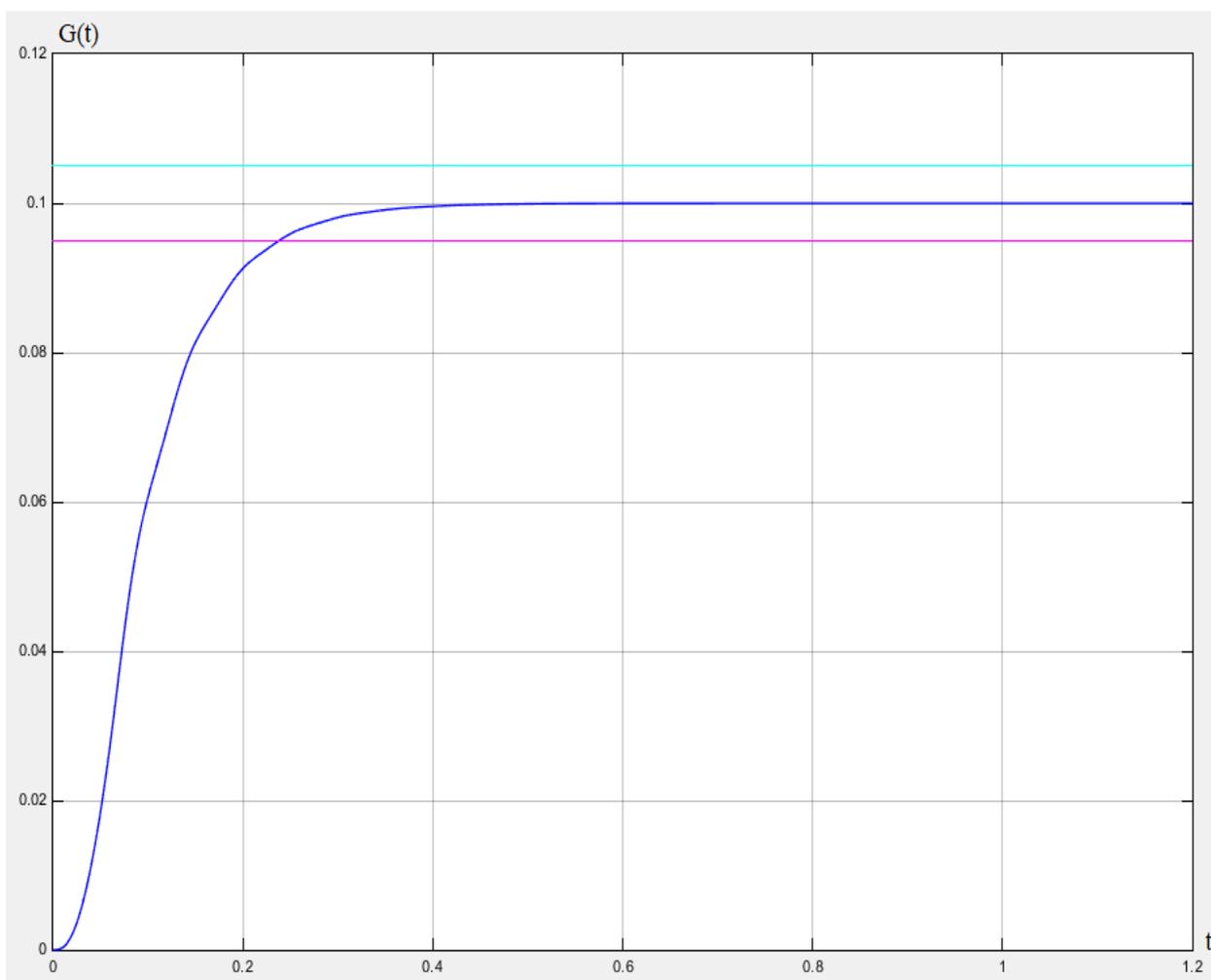


Рисунок 3.10 – Переходная характеристика контура тока при  $G = 0.1 \text{ рад}$

### Моделирование при входном сигнале $G = 0.5 \text{ рад}$ .

В результате проведённого моделирования показатели качества переходного процесса получились следующими: установившееся значение  $A = 0.5 \text{ рад}$ , перерегулирование отсутствует, время регулирования  $\tau = 0.351 \text{ с}$ . Как видно из графика на рисунке 19, плавность переходного процесса сохраняется, единственное заметное изменение, что логично – увеличилось время переходного процесса. Однако, на всякий случай следует провести имитационное моделирование при ещё одном, отличном от уже используемых, входном сигнале. Соответствующая переходная характеристика приведена на рисунке 3.11. Несмотря на увеличение времени переходного процесса, оно, по сравнению с системой с классическим регулятором, всё равно меньше.

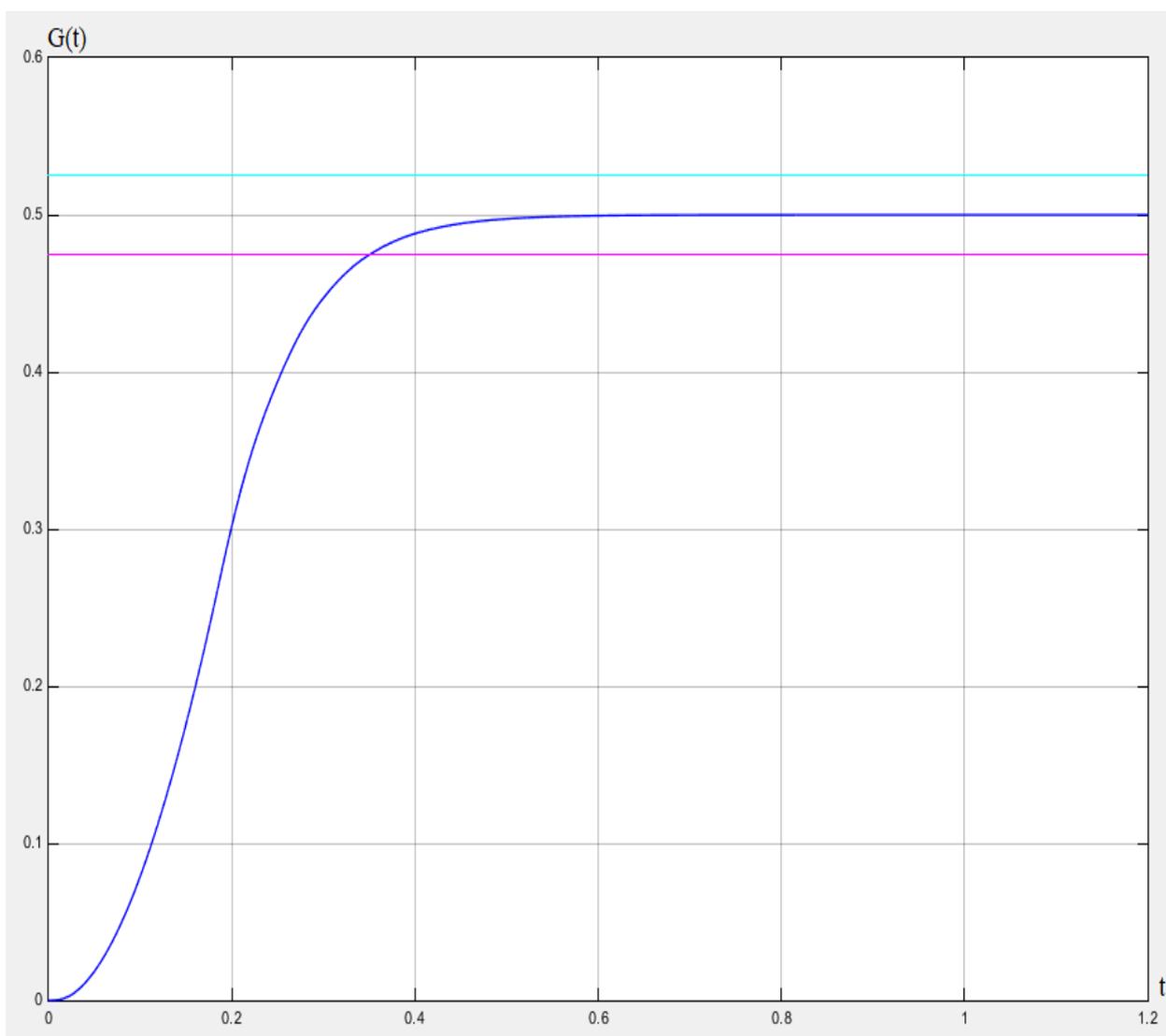


Рисунок 3.11 – Переходная характеристика контура тока при  $G = 0.5 \text{ рад}$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

### Моделирование при входном сигнале $G = 1 \text{ рад}$ .

В результате проведённого моделирования показатели качества переходного процесса получились следующими: установившееся значение  $A = 1 \text{ рад}$ , перерегулирование отсутствует, время регулирования  $\tau = 0.457 \text{ с}$ . Здесь время переходного процесса опять немного увеличилось, что, как было сказано ранее, нормально при увеличении значения входного сигнала. Плавность переходного процесса также сохранилось, что, собственно говоря, подтверждает сделанное выше предположение о корректности выполненной в данной главе настройки нечёткого регулятора. Соответствующая переходная характеристика приведена на рисунке 3.12. Здесь опять, несмотря на увеличение времени переходного процесса, в связи с увеличением входного сигнала, данное время всё равно меньше, чем у системы с классическим регулятором.

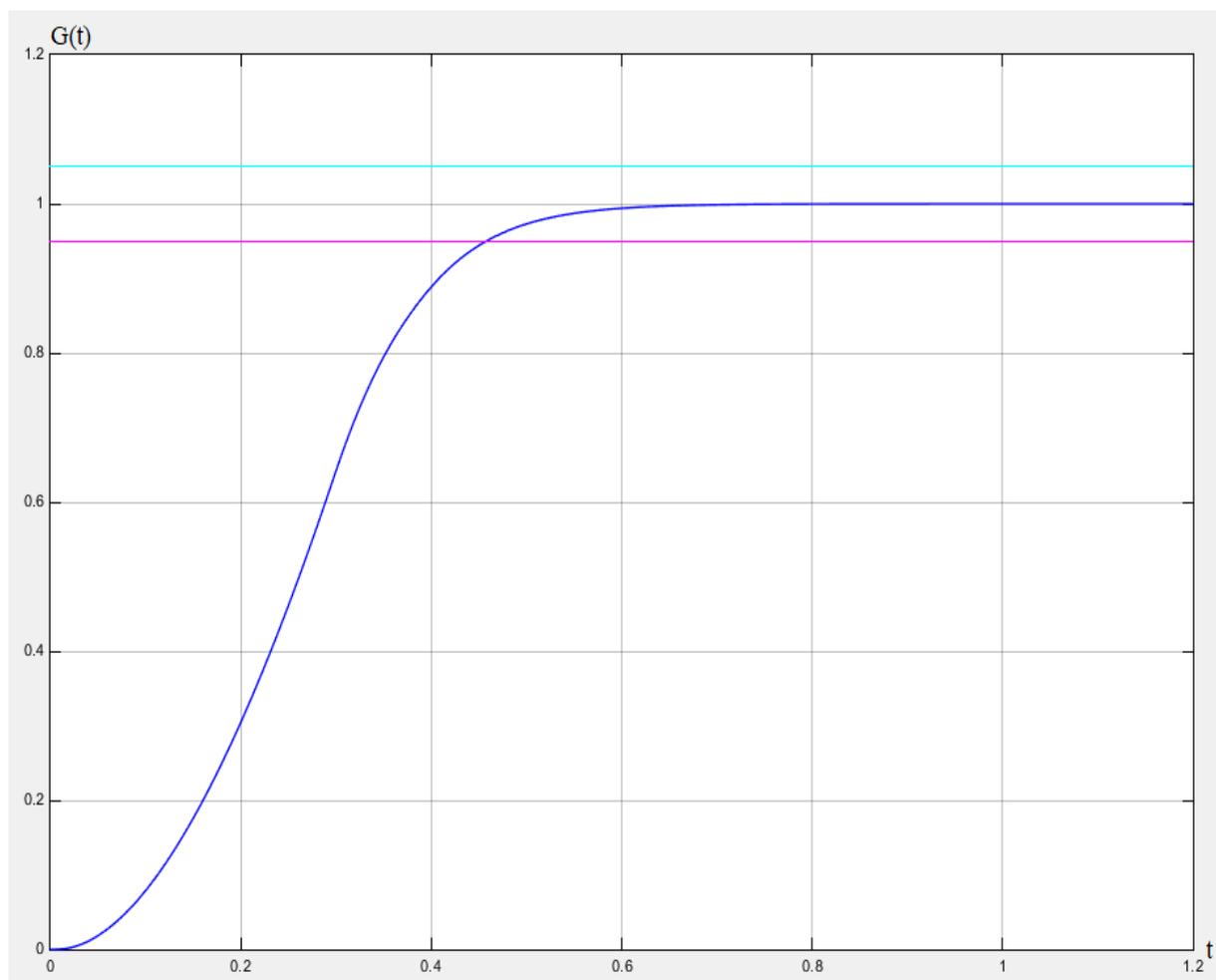


Рисунок 3.12 – Переходная характеристика контура тока при  $G = 1 \text{ рад}$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Результаты свидетельствуют, что качество переходного процесса осталось на прежнем уровне, кроме времени переходного процесса, которое сократилось по сравнению с системой с классическими регуляторами.

### 3.3 Анализ систем на основе классической и нечёткой логик

Проведём сравнительный анализ следящих систем подчинённого регулирования с классическим регулятором и с регулятором на базе нечёткой логики. Согласно результатам моделирования данных систем, обе показывают гладкий переходный процесс без перерегулирования, также отработку тестовых входных сигналов без статической ошибки, однако, система с нечётким регулятором выходит на установившееся значение раньше своего аналога с классическим регулятором, то есть обладает меньшим временем переходного процесса, что является безусловным её достоинством перед системой с классическим регулятором. Для сравнения время регулирования обеих систем для всех трёх опытов приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение времени переходных процессов

G, рад	Время переходного процесса, с	
	Классическая	Нечеткая логика
0.1	0,332	0,238
0.5	0,413	0,351
1	0,495	0,457

Однако, следует отметить, что здесь рассматривался нечёткий регулятор на пять лингвистических переменных, при их увеличении можно добиться более серьёзных результатов, но всё же даже настройка регулятора на пять переменных является более сложной, чем расчёт параметров классических регуляторов.

#### Вывод по разделу три

В данной главе осуществлен синтез нечеткого регулятора положения следящей системы подчиненного регулирования. Результаты моделирования свидетельствуют, что применение данного регулятора позволяет уменьшить время регулирования на 7 – 28 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель выпускной квалификационной работы заключалась в сравнительном анализе следящих систем подчиненного регулирования, одна из которых выполнена по классической схеме, а вторая содержит нечеткий регулятор положения.

В работе осуществлен расчет регуляторов обеих систем и проведено имитационное моделирование. Результаты моделирования свидетельствуют, что система подчиненного регулирования с нечетким регулятором положения позволяет получить время регулирования меньше на 7 – 28 %, по сравнению с системой, выполненной по классической схеме во всем диапазоне допустимых значений.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Андриевский, Б.Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2000. – 470 с.

2 Ануфриев, И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

3 Башарин, А.В. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

4 Бесекерский, В.А. Руководство по проектированию систем автоматического управления / В.А. Бесекерский. – М.: Высш. Школа, 1983. – 296 с.

5 Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления. 4-е изд. / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.

6 Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.Л. Шпов. – СПб.: Наука, 1972. – 768 с.

7 Бичаев, И.Е. Моделирование следящей системы управления с применением многокаскадного нечёткого регулятора / И.Е. Бичаев, С.П.Черный // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – Н.1. – С.47-54.

8 Бойчук, Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления / Л.М. Бойчук. – М.: Энергия, 1971. – 112 с.

9 Гайдук, А.Р. Системы автоматического управления. Примеры, анализ и синтез / А.Р. Гайдук. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 414 с.

10 Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления / А.Р. Гайдук. – М.: Высшая школа, 2010. – 415 с.

11 Гостев, В.И. Нечёткие регуляторы в системах автоматического управления / В.И. Гостев. – Киев: Радиоаматор, 2008. – 972 с.

12 Дылевский, А.В. Синтез линейных систем управления с заданным характеристическим многочленом / А.В. Дылевский, Г.И. Лозгачёв // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. – 2003. – Н.4. – С.17-20.

13 Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к понятию приближённых решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

14 Клавдиев, А.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах / А.А. Клавдиев, СПб: СЗТУ, 2005. – 74 с.

15 Колемаев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика / В.А. Колемаев, В.Н. Калинина. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 352 с.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

- 16 Колесников, А.А. Современные методы синтеза систем управления / А.А. Колесников, М.Ю. Медведев. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 128 с.
- 17 Кораблёв, Ю.А. Системы управления с нечёткой логикой: Учебное пособие / Ю.А. Кораблёв, М.Ю. Шестопалов. – СПб: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. – 58 с.
- 18 Красовский, А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами / А.А. Красовский, В.Н. Буков, В.С. Шендрик. – М.: Наука, 1977. – 272 с.
- 19 Кузовков, К.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / К.Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
- 20 Леоненков, А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
- 21 Летов, А.М. Аналитическое конструирование регуляторов / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. – 1960. – Н.4. – С. 425-435.
- 22 Медведев, М.Ю. Аналитический синтез управлений нелинейными многосвязными объектами в условиях неопределённости / М.Ю. Медведев. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 400 с.
- 23 Пупков, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб.: в 5 т. / К.А. Пупков, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.
- 24 Мирошник, И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков. – СПб: Наука, 2000. – 549 с.
- 25 Мирошник, И.В. Теория автоматического управления: Линейные системы: учеб. пособие для вузов / И.В. Мирошник. – СПб: ПИТЕР, 2005. – 337 с.
- 26 Мирошник, И.В. Теория автоматического управления: Нелинейные и оптимальные системы: учеб. пособие для вузов / И.В. Мирошник. – СПб: ПИТЕР, 2006. – 272 с.
- 27 Николис, Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление / Дж. Николис. – М.: Мир, 1989. – 488 с.
- 28 Олейников, В.А. Основы оптимального и экстремального управления / В.А. Олейников, Н.С. Зотов, А.М. Пришвин. – М.: Высшая школа, 1969. – 296 с.
- 29 Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: Бином, 2009. – 800 с.
- 30 Подчукаев, В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы) / В.А. Подчукаев – М.: Физматлит, 2005. – 392 с.

31 Суздорф, В.И. Электропривод малой мощности с улучшенными энергетическими характеристиками / В.И. Суздорф, А.С. Мешков, Н.А. Сюй // Вестник ТОГУ. – 2013. – Н.1(28). – С. 115-124.

32 Фельдбаум, А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А.А. Фельдбаум. – М.: Наука, 1966. – 623 с.

33 Фомин, В.И. Адаптивное управление динамическими объектами / В.И. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович. – М.: Наука, 1981. – 286 с.

34 Чернецкий, В.О. Анализ и синтез систем управления с нечёткой логикой: Учебное пособие / В.О. Чернецкий, И.В. Чернецкая. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 41 с.

35 Черный, С.П. Многокаскадные нечеткие системы управления мобильной установкой пиролиза древесины / С.П. Черный, В.А. Соловьев, А.И. Малюкова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – Н.3(19). – С. 45-51.

36 Черный, С.П. Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С.П. Черный, Д.А. Новак // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – Н.4(28). – С. 56-60.

37 Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.О. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

38 Яхьяева, Г.Э. Нечёткие множества и нейронные сети / Г.Э. Яхьяева. – М.: БИНОМ, 2006. – 316 с.

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ А. Параметры двигателя ДПР72-Н5 и нагрузки

номинальный момент	$M_n = 0,039 \text{ Н}\cdot\text{м},$
номинальный ток	$I_n = 1,4 \text{ А},$
постоянная времени якоря	$T_y = 0,01 \text{ с},$
сопротивление якоря	$R_y = 6,8 \text{ Ом},$
момент инерции якоря	$J_d = 1,35 \cdot 10^{-5} \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$
коэффициенты момента и противо-ЭДС	$C_m = C_e = 0,028 \text{ В}\cdot\text{с}$
момент инерции нагрузки	$J_n = 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$
приведенный коэффициент трения	$K_{тр} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с},$
коэффициент передачи редуктора	$K_p = 0,01$

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программа расчета показателя колебательности

```
// Файл Unit1.h
#ifndef Unit1H
#define Unit1H
#include <Classes.hpp>
#include <Controls.hpp>
#include <StdCtrls.hpp>
#include <Forms.hpp>
#include <Chart.hpp>
#include <ExtCtrls.hpp>
#include <Series.hpp>
#include <TeEngine.hpp>
#include <TeeProcs.hpp>
class TForm1 : public TForm
{
__published:      // IDE-managed Components
    TChart *Chart1;
    TLineSeries *Rs1;
    TLineSeries *Rs2;
    TLineSeries *Rs3;
    TLineSeries *Rs4;
    TLineSeries *Rs5;
    void __fastcall FormCreate(TObject *Sender);
private:          // User declarations

public:           // User declarations
    __fastcall TForm1(TComponent* Owner);
};
extern PACKAGE TForm1 *Form1;
#endif
```

					09.03.01.2018.200.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

```

// Файл Unit1.cpp
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
using namespace std;
#include "Unit1.h"
#include <complex>
#include <math.h>

#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"

TForm1 *Form1;

__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
: TForm(Owner)
{
}

#define Krs (complex<double>(6.8,0.))
#define Krt (complex<double>(680.,0.))
#define Kdt (complex<double>(1.,0.))
#define Kds (complex<double>(1.,0.))
#define Ktr (complex<double>(0.00008,0.))
#define Kr (complex<double>(0.01,0.))
#define Ra (complex<double>(6.8,0.))
#define Ce (complex<double>(0.028,0.))
#define Cm (complex<double>(0.028,0.))
#define J (complex<double>(2.85e-5,0.))
#define Ta (complex<double>(0.01,0.))

```

```
#define Tdt      (complex<double>(0.005,0.))
#define Tds      (complex<double>(0.005,0.))
#define Trt      (complex<double>(0.01,0.))
#define One      (complex<double>(1.,0.))
```

```
double Mod_W (double w, double K, double L)
```

```
{
complex<double> jw(0.,w);
complex<double> W,W1,W2,W3;
complex<double> W4,W5,W6,W7,W8,W9;
W1 = Cm*(One/J/jw)/(One+Ktr/J/jw);
W2 = (One/Ra)/(One+Ta*jw);
W3 = W1*W2/(One+Ce*W1*W2);
W4 = Krt*(One+Trt*jw)/jw;
W5 = Kdt/(One+Tdt*jw);
W6 = W4*W3/(One+W4*W3*W5/W1);
W7 = Kds/(One+Tds*jw);
W8 = L*Krs*Kr*W6/(One+L*Krs*Kr*W6*W7);
W9 = K*W8/jw;
W = W9/(One+W9);
```

```
return abs(W);
}
```

```
void __fastcall TForm1::FormCreate(TObject *Sender)
```

```
{
TLineSeries *Rs[5];
double R[] = {1., 2., 3., 4., 5.};
double K, w, M, Mod;
```

```
int i;
Rs[0] = Rs1;
Rs[1] = Rs2;
Rs[2] = Rs3;
Rs[3] = Rs4;
Rs[4] = Rs5;
for (K=1.; K<60.1; K+=1.)
{
  for (i=0; i<5; i++)
  {
    M = 1.;
    for (w=0.5; w<1000.; w+=0.5)
    {
      Mod = Mod_W(w,K,1./R[i]);
      if (Mod>M) M = Mod;
    }
    Rs[i]->AddXY(K,M);
  }
}
```