



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН»
(ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»)

Институт автоматизации и

робототехникиКафедра

«Робототехника и мехатроника»

Учебный курс «Современные методы управления в робототехнике и
мехатронике»

Лабораторная работа №1

«Управление перевёрнутым маятником с помощью контроллера на
основе принципов нечёткой логики»

Выполнил: студент группы АДМ-21-05

Абдулзагиров М.М.

Проверил :

Колесниченко Р. В.

Оценка: _____

Дата: _____

Москва 2022

Цель: научиться управлять перевёрнутым маятником с помощью систем управления на основе ПД-регулятора и нечёткого регулятора в пакете прикладных программ *Matlab*. Определить преимущества и недостатки системы управления с нечётким регулятором по сравнению с классическим методом управления на основе ПД-регулятора.

Задачи: на основе полученных уравнений движения перевёрнутого маятника и тележки построить структурную схему системы управления на основе ПД-регулятора и регулятора нечёткой логики в пакете прикладных программ *Matlab* и сравнить получившиеся в обоих случаях переходные процессы.

Ход выполнения работы

На рис. 1 приведена расчетная схема системы, состоящей из перевёрнутого маятника на тележке.

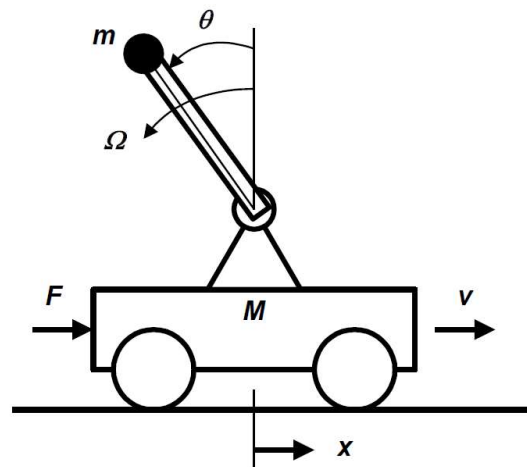


Рис. 1 Расчетная схема механической системы

При исследовании данной схемы будем использовать следующие параметры:

φ – угол наклона маятника относительно вертикали, проходящей через шарнир, которым маятник соединён с тележкой (угол положительный при повороте маятника против часовой стрелки);

Ω – угловая скорость движения маятника (угловая скорость положительна при вращении маятника против часовой стрелки);

x – положение тележки (положительное при смещении тележки вправо);

v – скорость движения тележки (положительная при движении тележки вправо);

F – сила, действующая на тележку (положительная сила действует слева направо);

l – длина маятника;

m – масса маятника;

M – масса тележки;

g – ускорение свободного падения.

Полная система уравнений в нормальной форме Коши, необходимая для компьютерного моделирования механической системы, выглядит так:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Omega;$$

$$\frac{dx}{dt} = v;$$

$$\frac{dv}{dt} = D^{-1}[Fl - ml^2 \sin\varphi(\Omega^2) + mgl \sin\varphi \cos\varphi];$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = D^{-1}[F \cos\varphi - ml \sin\varphi \cos\varphi(\Omega^2) + (M + m)gl \sin\varphi],$$

где $D = Ml + ml \sin^2\varphi$.

На основе приведенных выше уравнений была сформирована нелинейная динамическая модель перевернутого маятника (рис. 2-10).

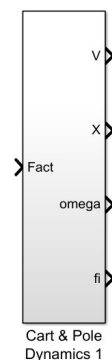


Рис. 2 Блок, содержащий динамическую модель

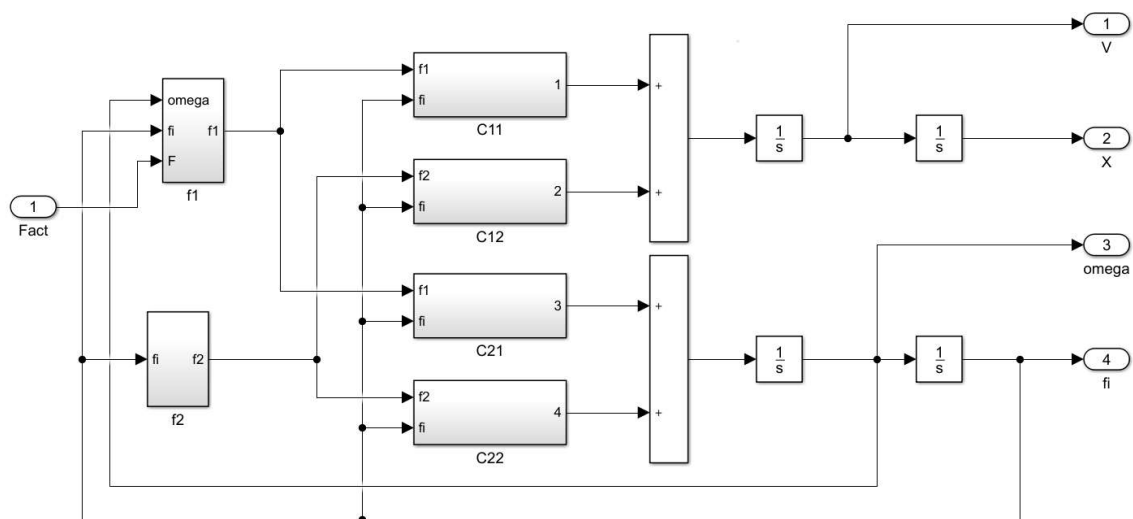


Рис. 3 Динамическая модель перевернутого маятника

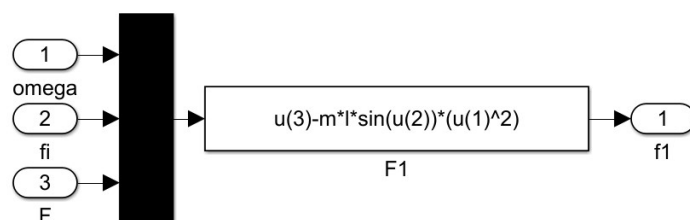


Рис. 4 Блок f1

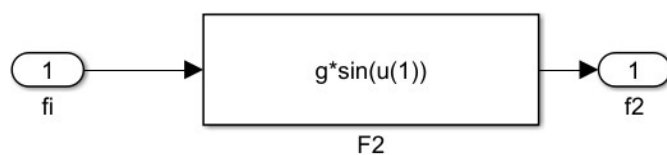


Рис. 5 Блок f2

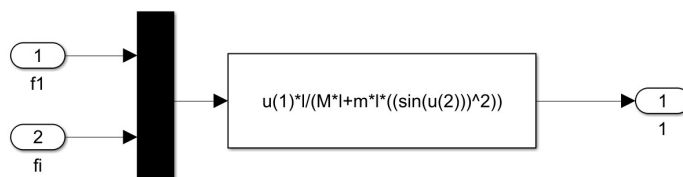


Рис. 6 Блок C₁₁

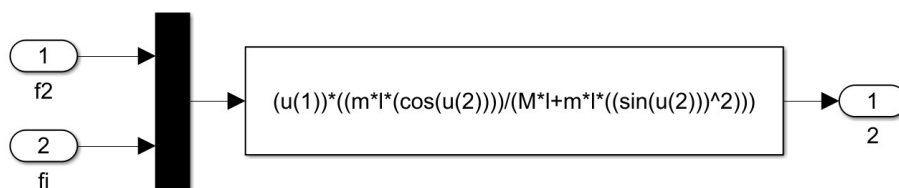


Рис. 7 Блок C₁₂

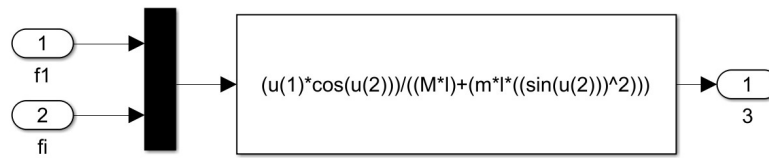


Рис. 8 Блок C₂₁

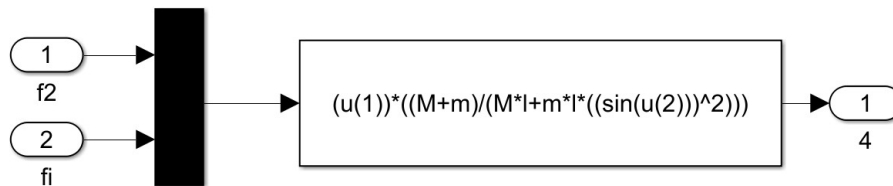


Рис. 9 Блок C₂₂

Система управления с ПД-регулятором

Запустим Matlab и Simulink. Загрузим файл “lab1_only_pendulum.mdl”, содержащий нелинейную динамическую модель перевёрнутого маятника, полученную выше. Построим систему управления этим маятником на основе ПД-регулятора (рис.10).

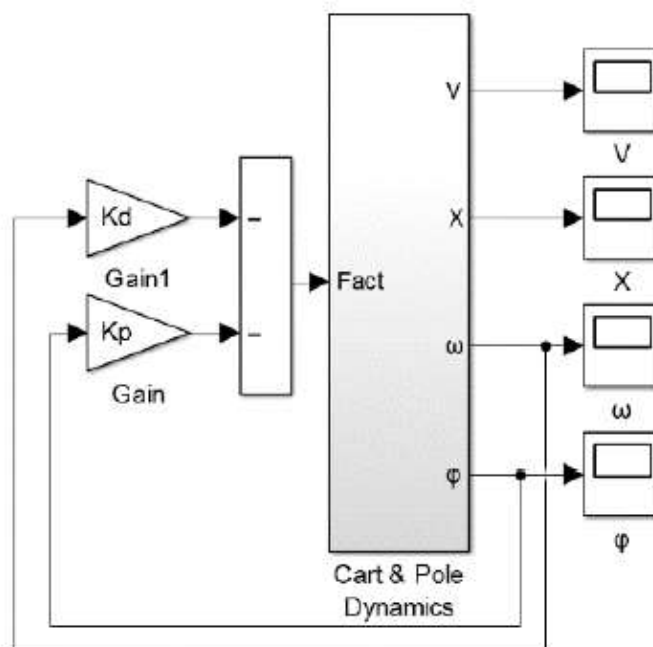


Рис.10 Система управления перевёрнутым маятником

Обратный маятник имеет значения параметров, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные

переменная	параметр	значение	ед. измерения
M	масса тележки	10	кг
m	масса маятника	1	кг
l	длина маятника	1	м
ω_0	частота свободных колебаний системы	10	рад/с
q_0	начальное отклонение маятника от вертикали	0.1	рад

Так как математическая модель, приведенная выше в нормальной форме Коши, является нелинейной, линеаризуем эти уравнения. Будем считать, что выполняются условия

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi; \quad \Omega = \Omega_0 + \Delta\Omega; \quad x = x_0 + \Delta x; \quad v = v_0 + \Delta v.$$

Линеаризацию выполним в предположении, что значения величин φ_0 , Ω_0 , x_0 , v_0 характеризующих точку линеаризации, близки к 0. Тогда описание механической системы будет состоять из следующих уравнений:

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = \Delta\Omega;$$

$$\frac{d\Delta x}{dt} = \Delta v;$$

$$\frac{d\Delta v}{dt} = M^{-1}[F + mg\Delta\varphi];$$

$$\frac{d\Delta\Omega}{dt} = (Ml)^{-1}[F + (M + m)g\Delta\varphi].$$

Стабилизация нулевого положения маятника возможна благодаря отрицательным обратным связям по переменным φ и Ω . При этом сила, пропорциональная углу отклонения маятника от вертикали, формируется в соответствии с уравнением

$$F = -k_{\Pi}\Delta\varphi - k_{\Delta}\Delta\Omega,$$

где k_{Π} и k_{Δ} – коэффициенты усиления обратных связей по положению и скорости маятника соответственно.

В соответствии с линеаризованными уравнения механической системы для стабилизации нулевого положения перевернутого маятника коэффициенты обратной связи по углу поворота и по скорости маятника определяются по формулам

$$k_{\Pi} = \omega_0^2 Ml + (M + m)g = 10^2 \cdot 10 \cdot 1 + (10 + 1) \cdot 9,8 = 1108;$$

$$k_d = 2\xi_0\omega_0 Ml = 2 \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 10 \cdot 10 \cdot 1 = 141,$$

где $\xi_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}$ – оптимальное значение, полученное с помощью критерия интеграла от внешнего модуля ошибки.

Запустим моделирование системы в течение 5 секунд и пронаблюдаем процессы изменения угла отклонения маятника от вертикали (φ) и положения тележки (X).

Таблица 2. Параметры переходных процессов системы управления с ПД-регулятором

	Угол отклонения маятника от вертикали			Положение тележки, м	
	Время установления ($\dot{\varphi} \leq 0.005$ рад), с	Максимальное перерегулирование, рад	Установившаяся ошибка, рад	Положение тележки через 5с, м	Характер перемещения тележки; направление
Без двигателя	0,28	$4,303 \cdot 10^{-3}$	0	-0,7953	Монотонный, неограниченный, влево
$\tau_{\text{aum}} = 0.001\text{с}$	0.292	$4.05 \cdot 10^{-3}$	0	-0.7958	Монотонный, неограниченный, влево
$\tau_{\text{aum}} = 0.02\text{с}$	0.415	$5.4 \cdot 10^{-3}$	0	-0.797	Монотонный, неограниченный, влево
$\tau_{\text{aum}} = 0.1\text{с}$	3.52	$0.0466 \cdot 10^{-3}$	0	-0.803	Колебательный, неограниченный, влево

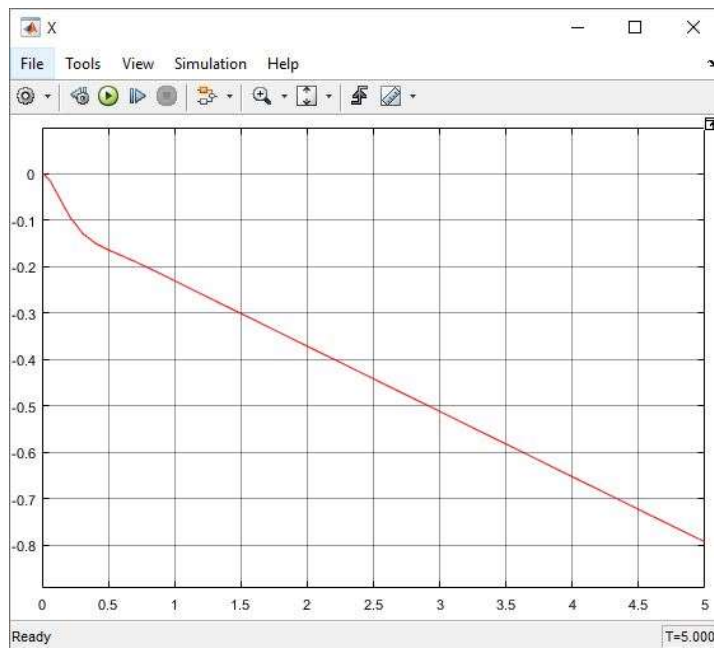


Рис. 11 Изменение положения тележки без двигателя

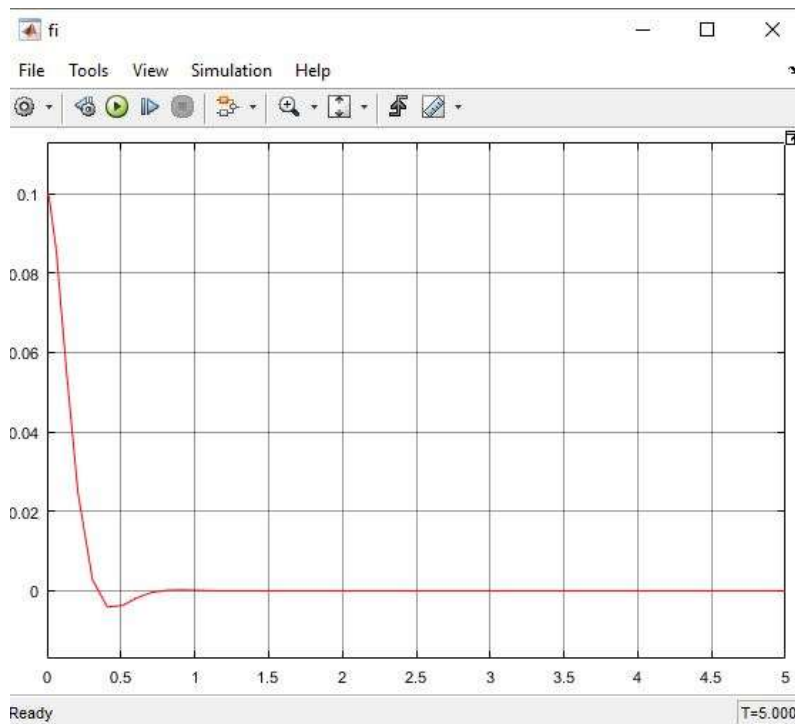


Рис. 12 Изменение угла отклонения маятника от вертикали без двигателя

Дополним полученную модель системы управления с помощью **ПД-регулятора** блоком апериодического звена, представляющим собой двигатель с постоянной времени τ_{aum} (рис.13).

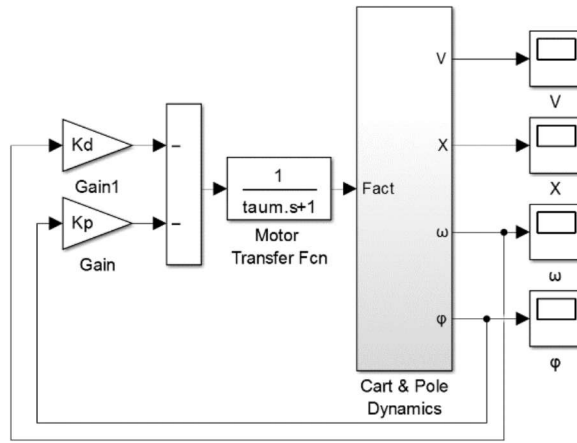


Рис. 13 Дополненная модель СУ перевернутым маятником

Также получим реакцию системы на отклонение маятника от вертикали на угол q_0 при $taum = 0.001, 0.02, 0.1$ с.

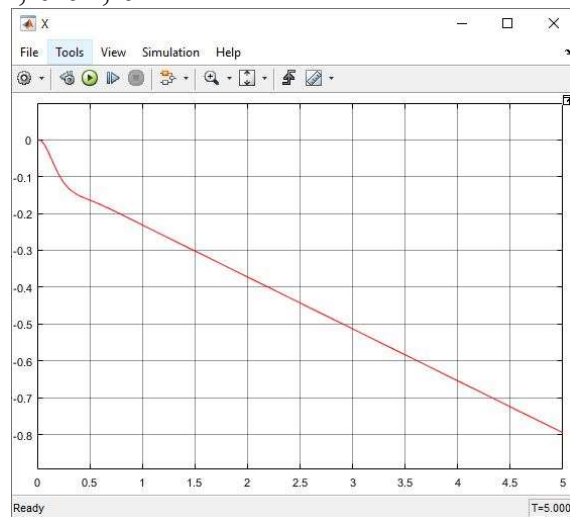


Рис. 14 Изменение положения тележки при $taum = 0.02$ с

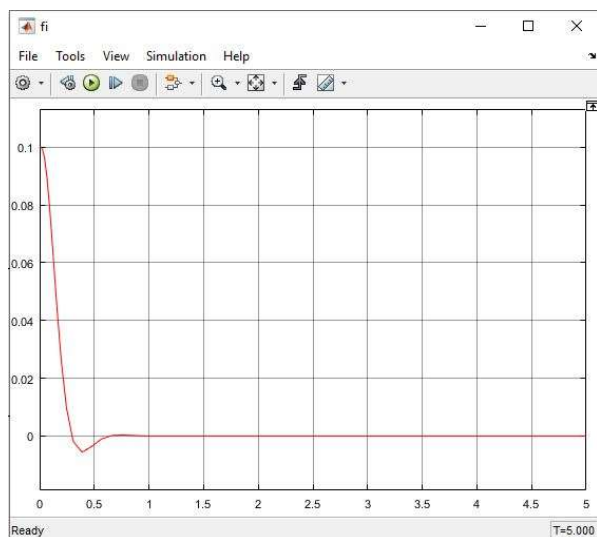


Рис.15 Изменение угла отклонения маятника от вертикали при $\tau_{aum} = 0.02\text{c}$

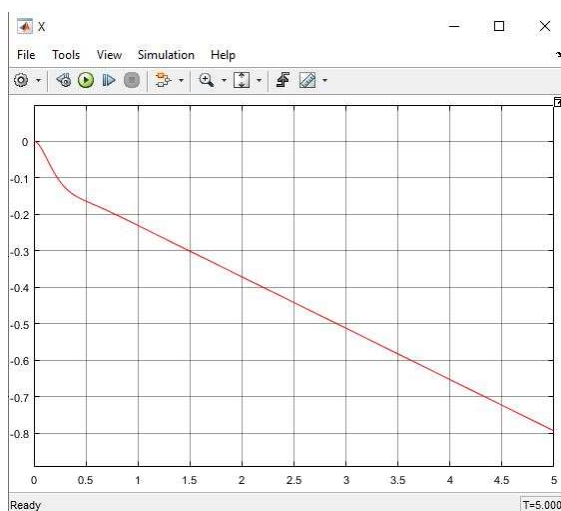


Рис.16 Изменение положения тележки при $\tau_{aum} = 0.001\text{c}$

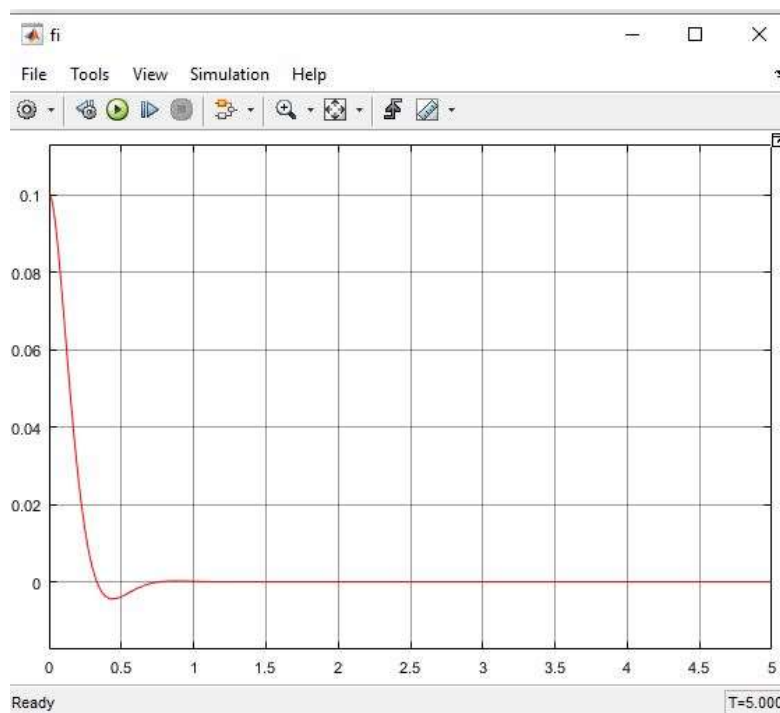


Рис.17 Изменение угла отклонения маятника от вертикали при $\tau_{aum} = 0.001\text{c}$

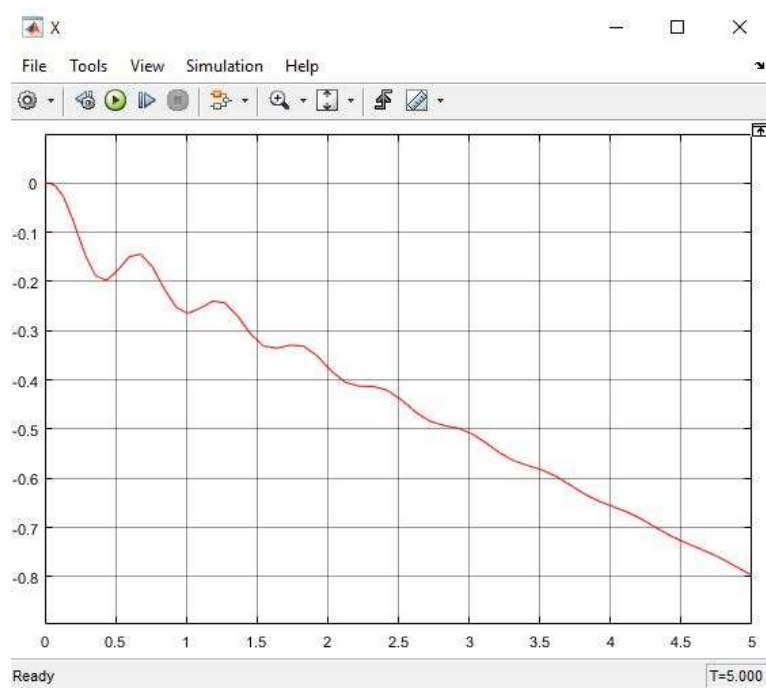


Рис.18 Изменение положения тележки при $\tau_{\text{aum}} = 0.1\text{c}$

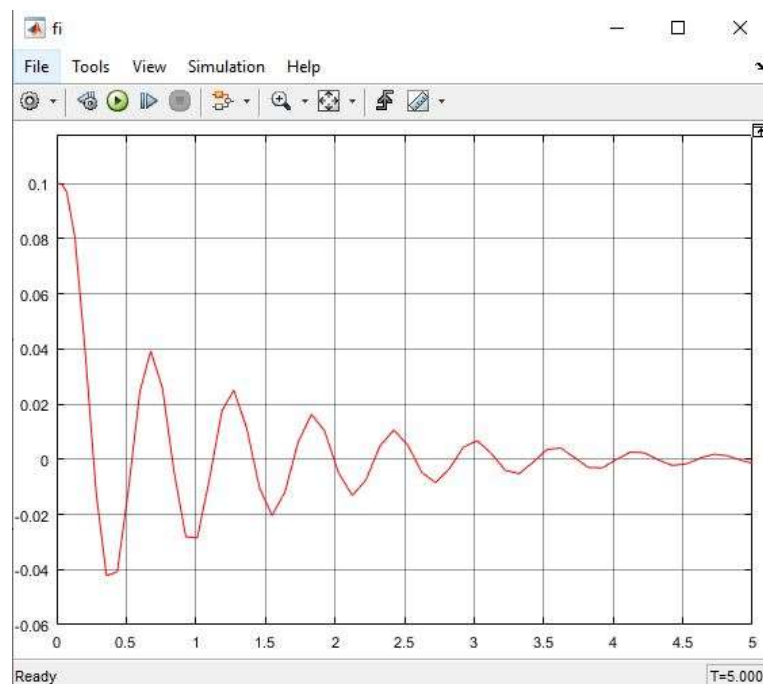


Рис.19 Изменение угла отклонения маятника от вертикали при $\tau_{\text{aum}} = 0.1\text{c}$

Вывод: из таблицы можем заметить, что при увеличении постоянной времени двигателя, переходный процесс ухудшается.

Система управления с регулятором нечёткой логики

1. Построим модель системы управления перевёрнутым маятником с помощью **нечёткого регулятора** развиваемой силы, приложенной к тележке маятника.

Модель нечёткого регулятора с 9 правилами (на каждую лингвистическую переменную по 3 термина) на рис. 20.

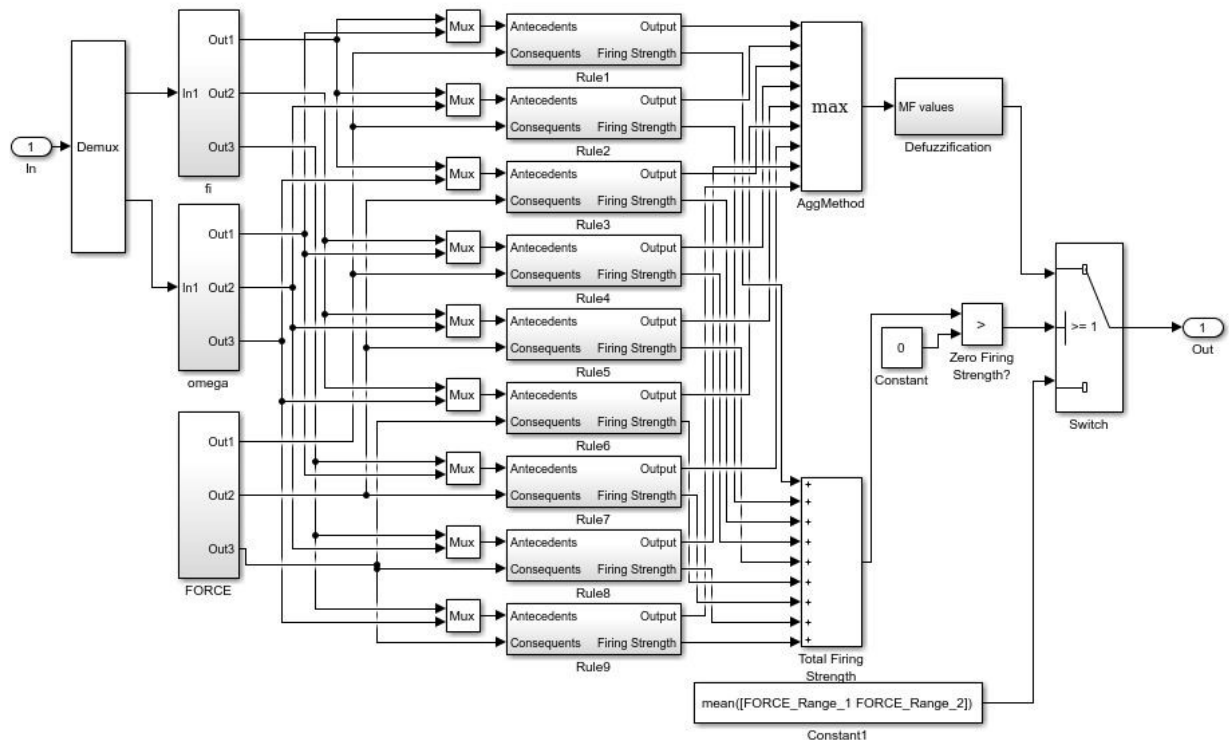


Рис. 20 Модель нечёткого регулятора с 9 правилами

В модели переменные φ , ω , F имеют треугольные функции принадлежности (рис. 21-22).

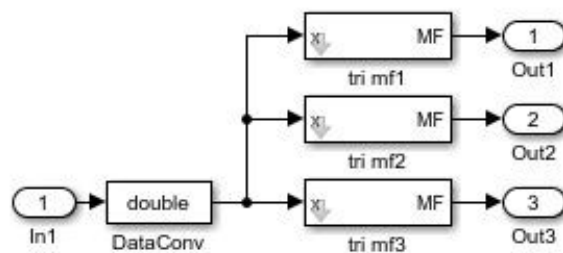


Рис.21 Блок с треугольными функциями принадлежности переменных φ и ω

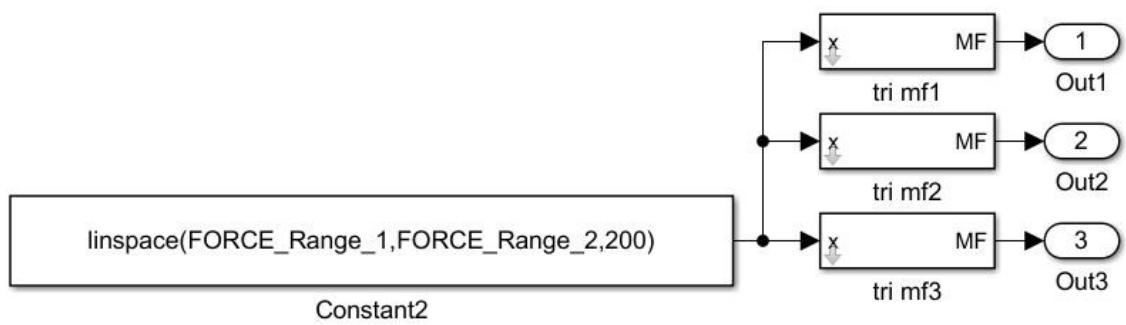


Рис.22 Блок с функциями принадлежности переменной F

Модель блока, содержащего правило (рис. 23).

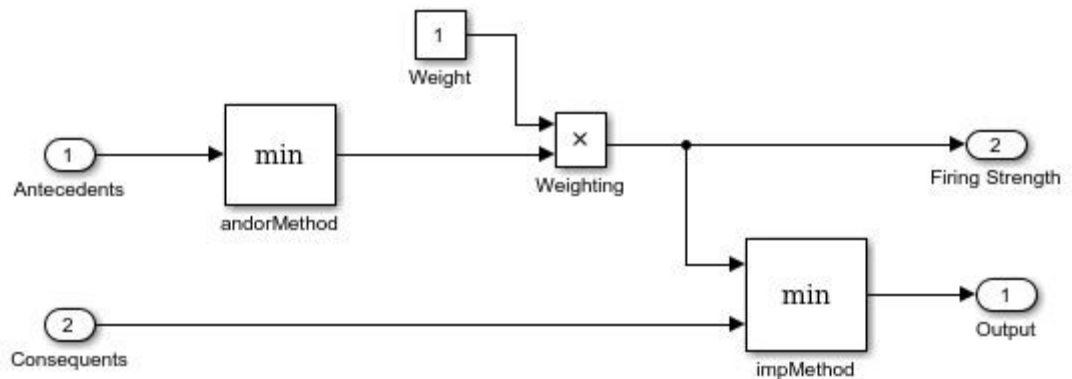


Рис. 23 Блок с правилом

На рис. 24-26 представлены функции принадлежности всех трех переменных.

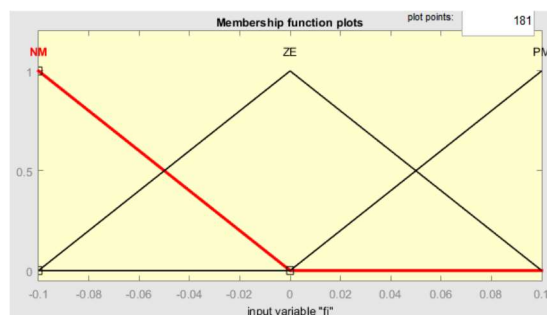


Рис.24 Треугольный тип функции принадлежности переменной φ с 3 термами

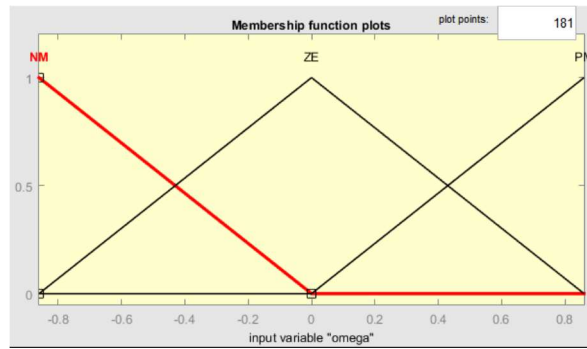


Рис.25 Треугольный тип функции принадлежности переменной ω с 3 термами

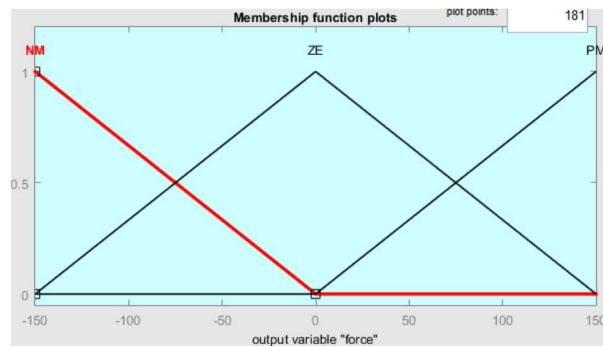


Рис.26 Треугольный тип функции принадлежности переменной F с 3 термами

Отметим, что треугольная функция принадлежности зависит от трех параметров a , b , c . Такой вид функции принадлежности описывается следующей функцией:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

В таблице 3 приведена таблица правил переменной F для 3 термов переменных φ и ω .

Таблица 3

	φ			
	NM	ZE	PM	
ω	NM	NM	NM	ZE
	ZE	NM	ZE	PM
	PM	ZE	PM	PM

Параметры функции принадлежности входных и выходных переменных содержатся в следующем файле

fuzzy_controller_3_trmf_params.m:

```
% параметры функций принадлежности входной переменной fi
fi_1_a = -0.786;
fi_1_b = -0.786;
fi_1_c = 0;
fi_2_a = -0.786;
fi_2_b = 0;
fi_2_c = 0.786;
fi_3_a = 0;
fi_3_b = 0.786;
fi_3_c = 0.786;
% параметры функций принадлежности входной переменной omega
omega_1_a = -1.57;
omega_1_b = -1.57;
omega_1_c = 0;
omega_2_a = -1.57;
omega_2_b = 0;
omega_2_c = 1.57;
omega_3_a = 0;
omega_3_b = 1.57;
omega_3_c = 1.57;
% диапазон изменения выходной переменной force
FORCE_Range_1 = -150;
FORCE_Range_2 = 150;
% параметры функций принадлежности выходной переменной force
FORCE_1_a = -160;
FORCE_1_b = -150;
FORCE_1_c = 0;
FORCE_2_a = -150;
FORCE_2_b = 0;
FORCE_2_c = 150;
FORCE_3_a = 0;
FORCE_3_b = 150;
FORCE_3_c = 160;
```

2. Копируем нечёткий регулятор в модель системы управления перевёрнутым маятником (рис. 27).

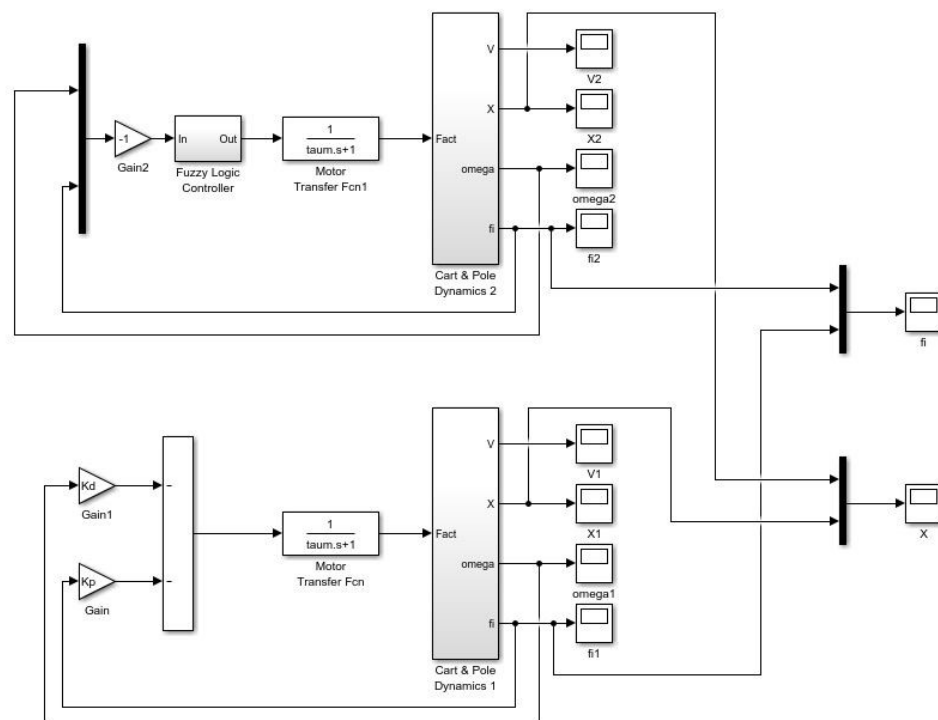


Рис. 27 Сравнение двух систем управления

3. Установим значения переменных в соответствии с таблицей 1. Установим значение переменной $\tau_{\text{aum}} = 0,001\text{с}$ и запустим моделирование системы. Сравним переходные процессы обеих систем управления и занесем параметры этих процессов в соответствующие столбцы таблицы 4.

Таблица 4. Сравнение СУ с ПД-регулятором и нечётким регулятором с различным количеством правил

	Время переходного процесса, с	Максимальное перерегулирование f_i , рад	Установившаяся ошибка ($t = 5.0$ с), рад	Положение тележки через $t = 5.0$ с, м
СУ с ПД-регулятором	0,292	$4,35 \cdot 10^{-3}$	0	-0,7952
СУ с нечётким регулятором (9 правил)	-	-	-	-20,188
СУ с нечётким регулятором (25 правил)	2,1	0	$2 \cdot 10^{-4}$	-11.51
СУ с нечётким регулятором (49 правил)	-	-	-	0,786

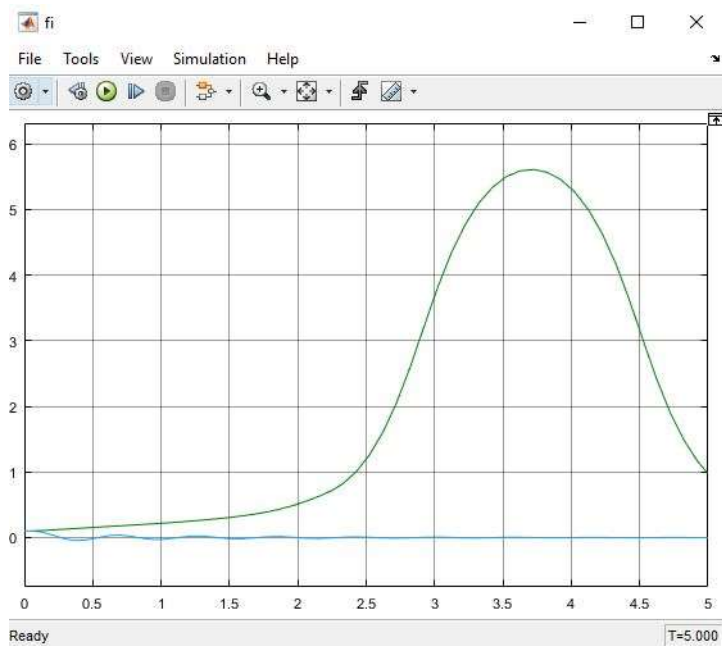


Рис.28 Изменение угла отклонения маятника от вертикали (9 правил)

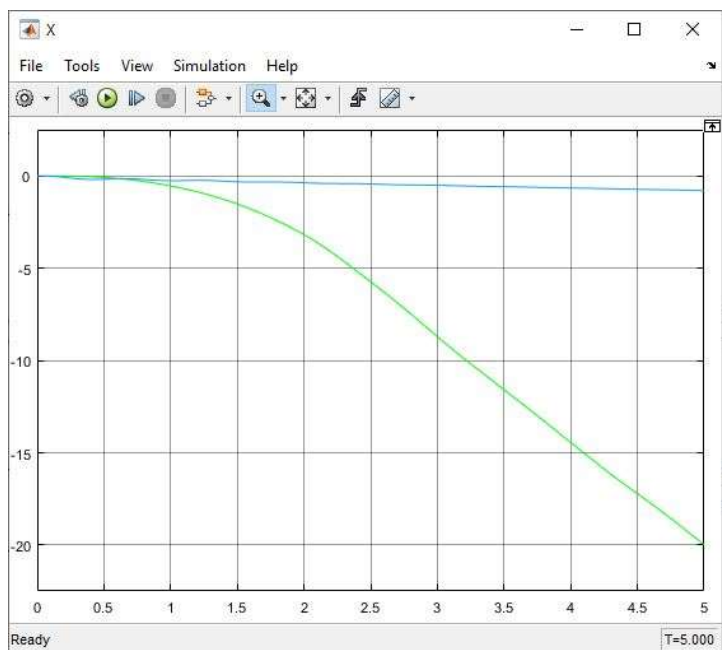


Рис.29 Изменение положения тележки (9 правил)

4. Теперь рассмотрим СУ с помощью нечёткого регулятора с 25 правилами. Функция принадлежности переменных содержит по 5 терм (рис. 30-32), а общее количество правил, заданных в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5

	φ				
	NB	NM	ZE	PM	PB

	NB	NB	NB	NB	NM	ZE
ω	NM	NB	NB	NM	ZE	PM
	ZE	NB	NM	ZE	PM	PB
	PM	NM	ZE	PM	PB	PB
	PB	ZE	PM	PB	PB	PB

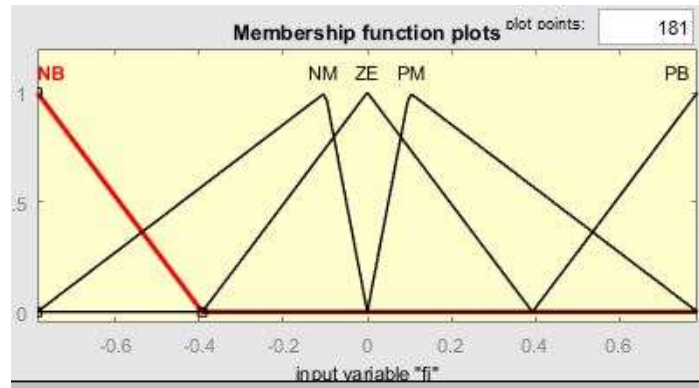


Рис.30 Треугольный тип функции принадлежности переменной φ с 5 термами

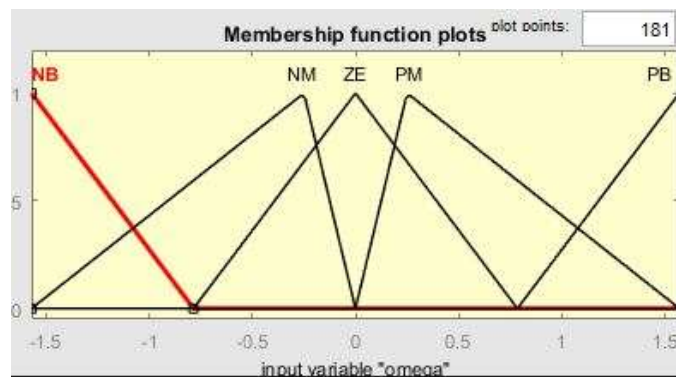


Рис.31 Треугольный тип функции принадлежности переменной ω с 5 термами

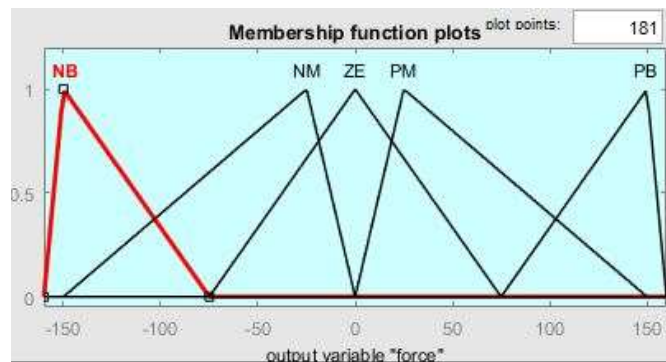


Рис.32 Треугольный тип функции принадлежности переменной F с 5 термами

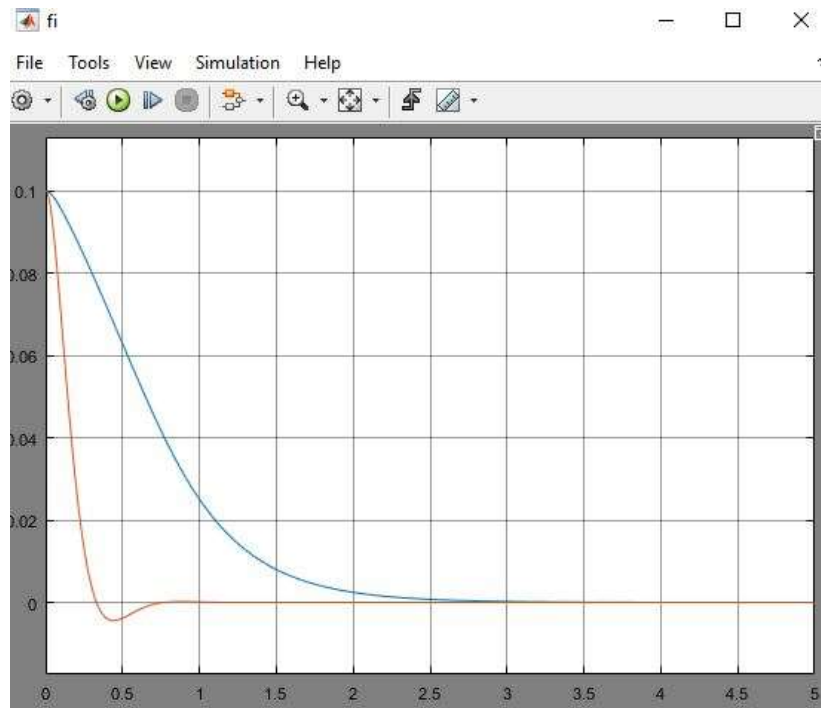


Рис.33 Изменение угла отклонения маятника от вертикали (25 правил)

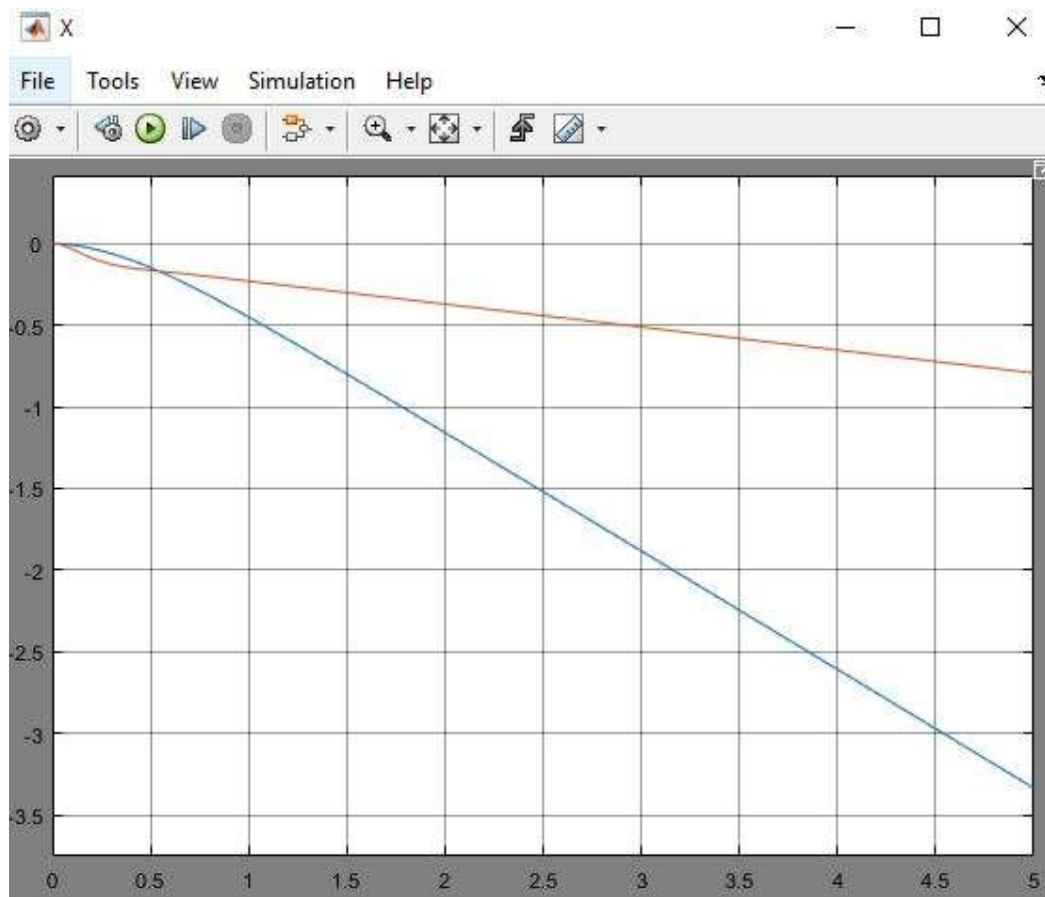


Рис.34 Изменение положения тележки (25 правил)

5. Теперь рассмотрим СУ с помощью нечёткого регулятора с 49 правилами. Функция принадлежности переменных содержит по 7 терм (рис. 35-37), а общее количество правил, заданных в соответствии с таблицей 6.

Таблица 6

		φ						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ω	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

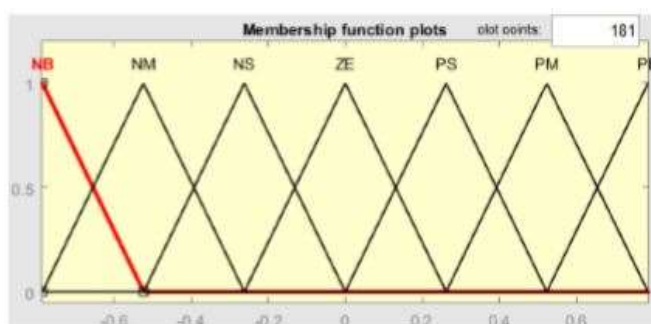


Рис.35 Треугольный тип функции принадлежности переменной φ с 7 термами

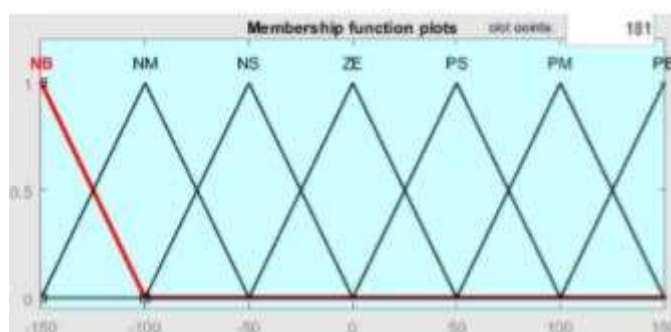


Рис.36 Треугольный тип функции принадлежности переменной ω с 7 термами

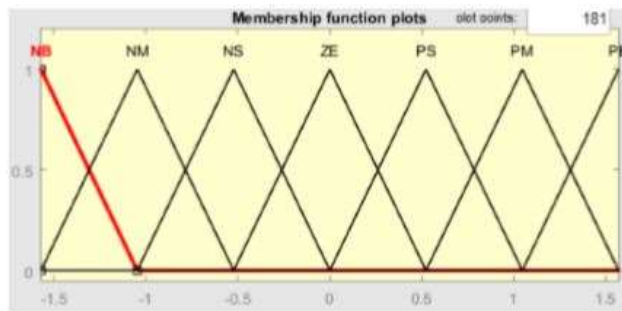


Рис.37 Треугольный тип функции принадлежности переменной F с 7 термами

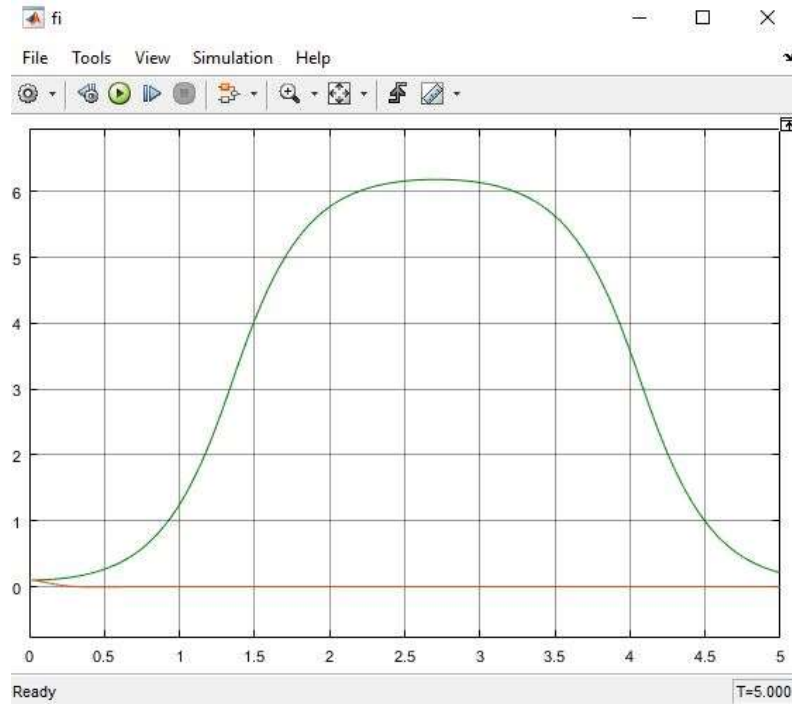


Рис.38 Изменение угла отклонения маятника от вертикали (49 правил)

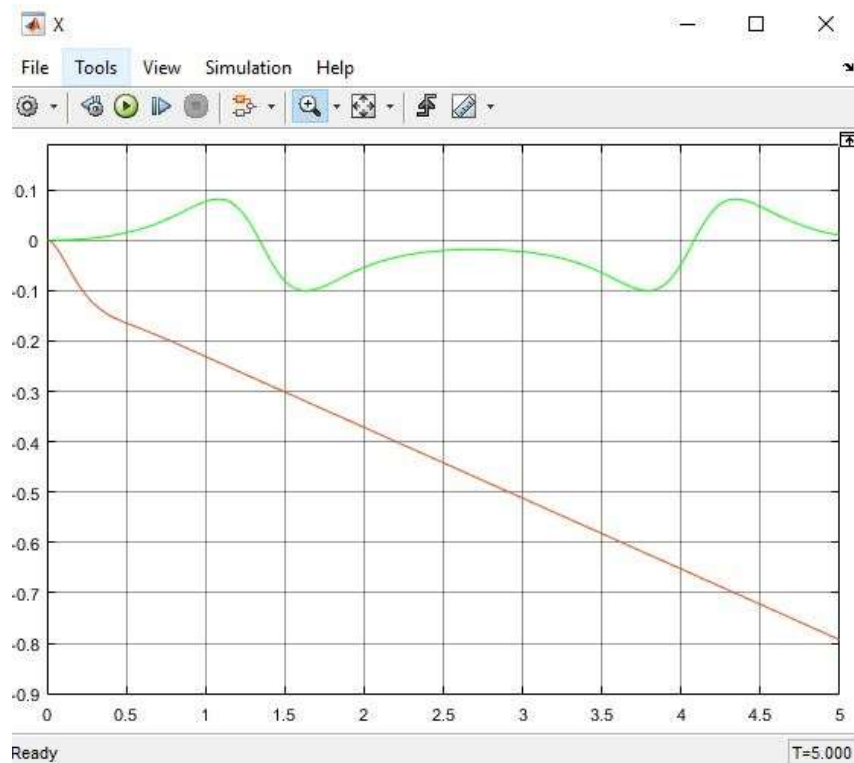


Рис.39 Изменение положения тележки (49 правил)

Вывод: из таблицы 4 видно, что наилучшими свойствами обладает система управления с ПД-регулятором (с точки зрения быстродействия и качества переходного процесса).

Выберем систему управления на основе нечёткой логики с оптимальным количеством правил и сравним влияние различных типов функций принадлежности на переходные процессы и выберем оптимальные, исходя из следующих: треугольные, гауссовы, колоколообразные.

Системой управления с оптимальным количеством правил является СУ с 25 правилами.

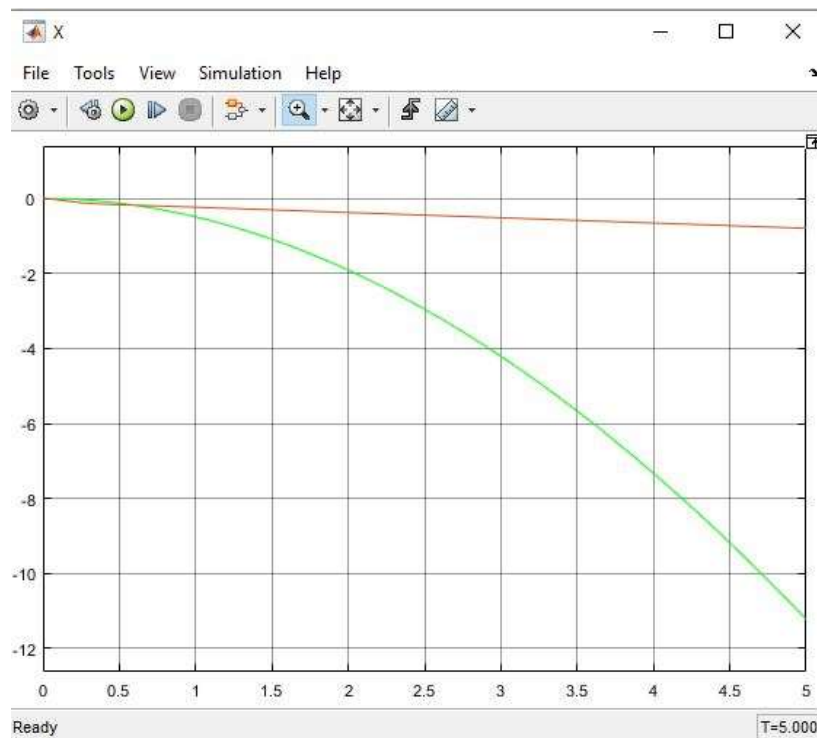


Рис.40 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип (X).

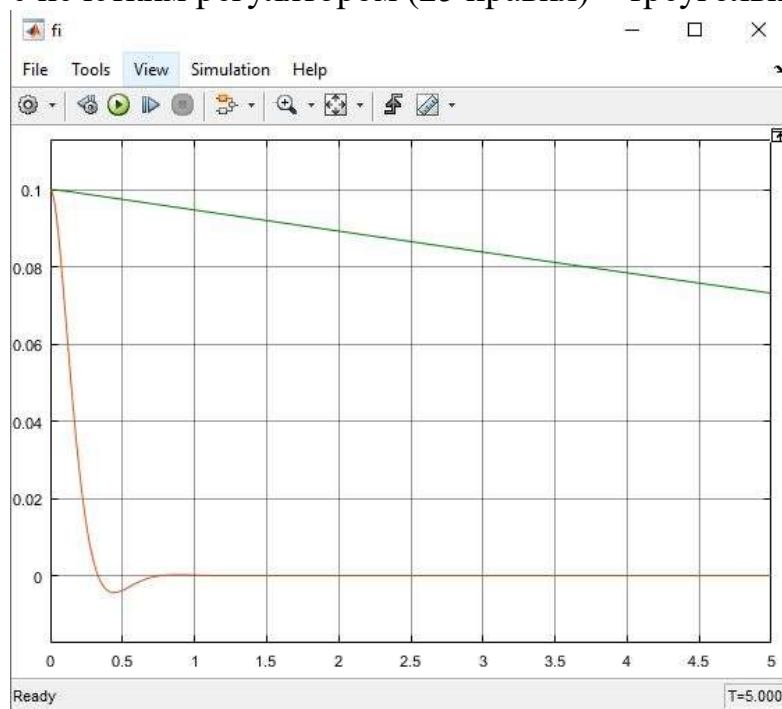


Рис.41 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип (ф).

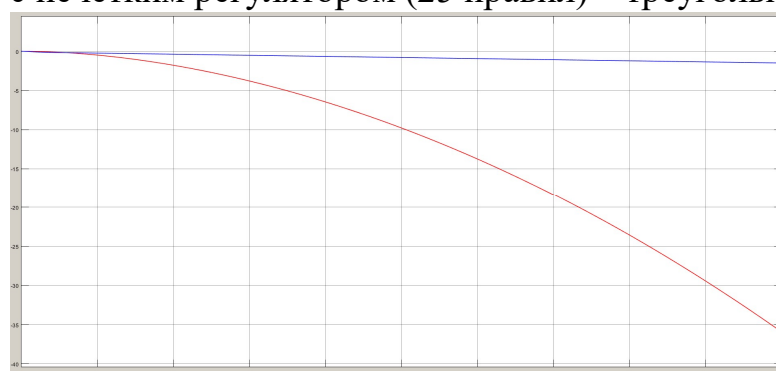


Рис.42 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – гауссов тип (X).

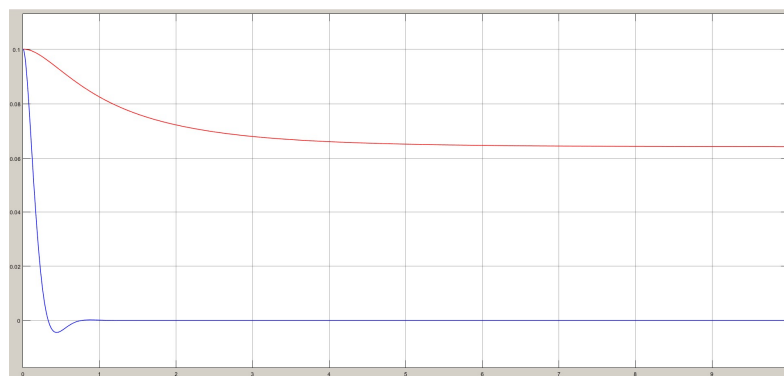


Рис.43 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – гауссов тип (ф).



Рис.44 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – колоколообразный тип (X).

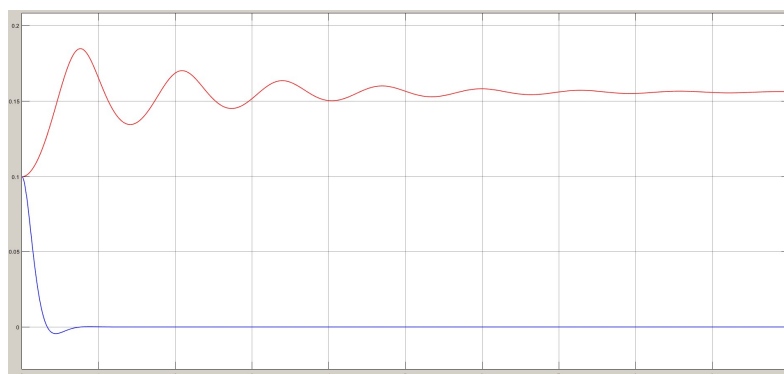


Рис.45 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – колоколообразный тип (ф).

Таблица 7. Сравнение СУ с регулятором нечёткой логики с различным типом функций принадлежности

	Время переходного процесса, с	Максимальное перерегулирование f_i , рад	Установившаяся ошибка ($t = 5.0$ с), рад	Положение тележки через $t = 5.0$ с, м
Треугольный тип(trimf)	2,1	0	$2 \cdot 10^{-4}$	-11.51
Гауссов тип (gaussmf)	3,2	0	$643 \cdot 10^{-4}$	-9.8
Колоколообразный тип (gbellmf)	2.9	0.18	$1563 \cdot 10^{-4}$	-18.53

Вывод: лучшей системой с точки зрения быстродействия является система с треугольным типом функции принадлежности.

Для системы управления на основе нечёткой логики с оптимальным количеством правил и оптимальным типом функций принадлежности изменим значение переменной τ_{aum} . Сравним чувствительность систем управления на основе нечёткой логики и ПД-регулятора к изменению своих параметров.

Таблица 8. Параметры переходных процессов системы управления с нечётким регулятором

	Угол отклонения маятника от вертикали			Положение тележки, м	
	Время установления ($\dot{\varphi} \leq 0.005$ рад), с	Максимальное перерегулирование, рад	Установившаяся ошибка, рад	Положение тележки через 5 с, м	Характер перемещения тележки; направление
Без двигателя	2.433	-	$1.5 \cdot 10^{-4}$	-3.89	Монотонный, неограниченный, влево
$\tau_{\text{aum}} = 0.001$ с	2.56	-	$1.47 \cdot 10^{-5}$	-4.1	Монотонный, неограниченный, влево
$\tau_{\text{aum}} = 0.02$ с	2.48	-	$11 \cdot 10^{-5}$	-4.04	Монотонный, неограниченный, влево
$\tau_{\text{aum}} = 0.1$ с	2.34	-	$6.8 \cdot 10^{-5}$	-4.037	Монотонный, неограниченный, влево

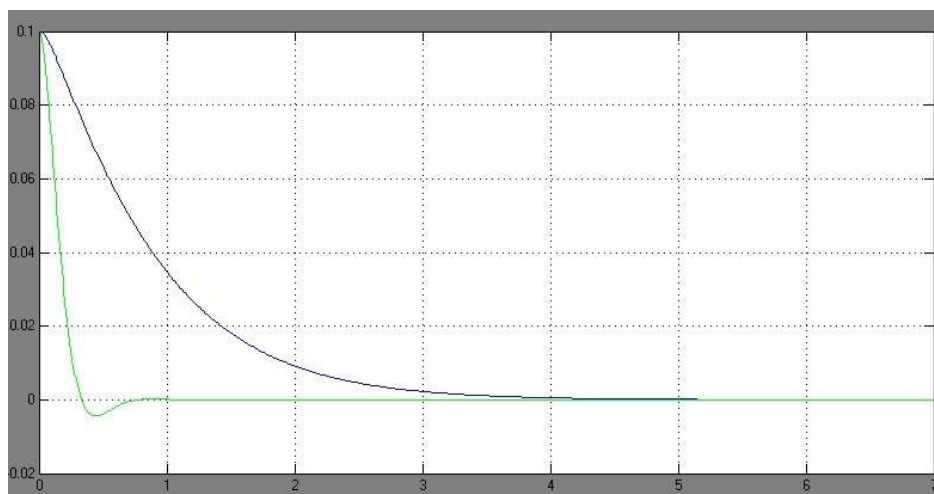


Рис.46 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип – без двигателя (ϕ)

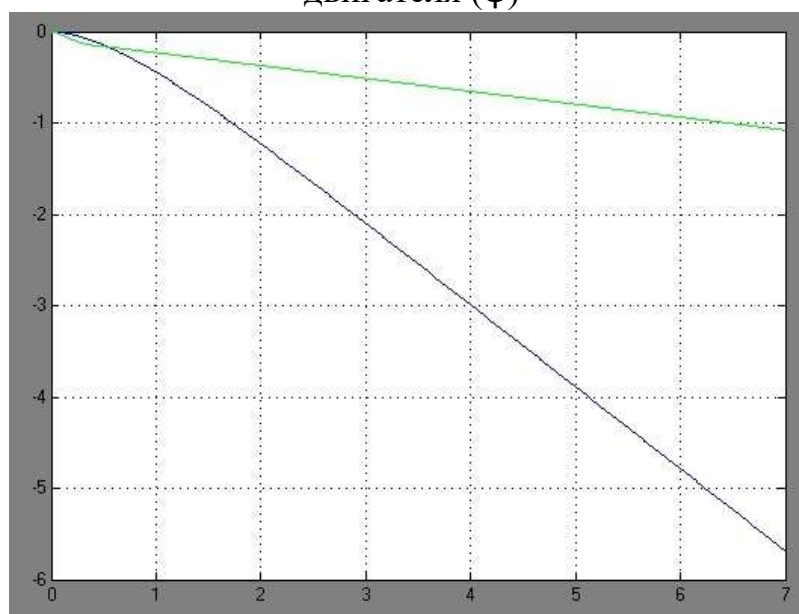


Рис.47 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип – без двигателя (X)

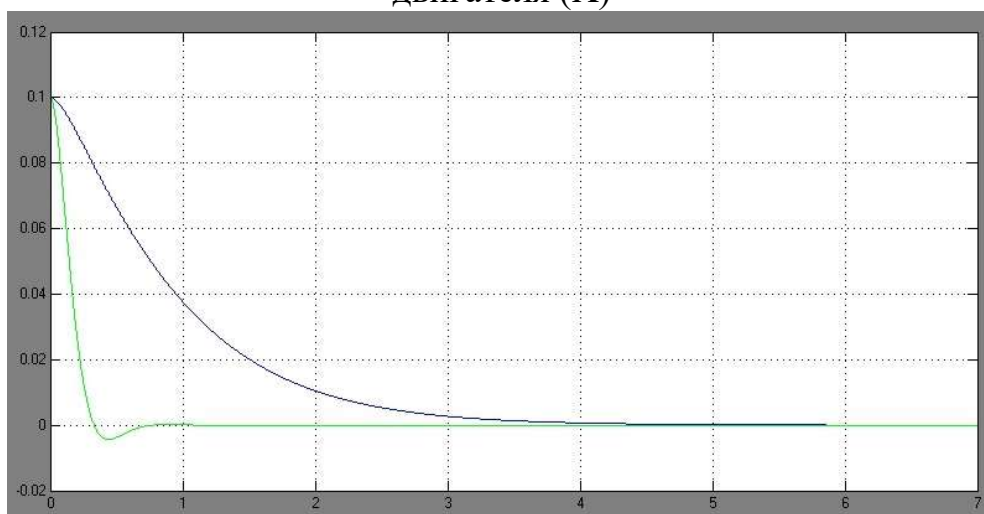


Рис.48 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип – $\tau_{um} = 0.001\text{с}$ (ϕ)

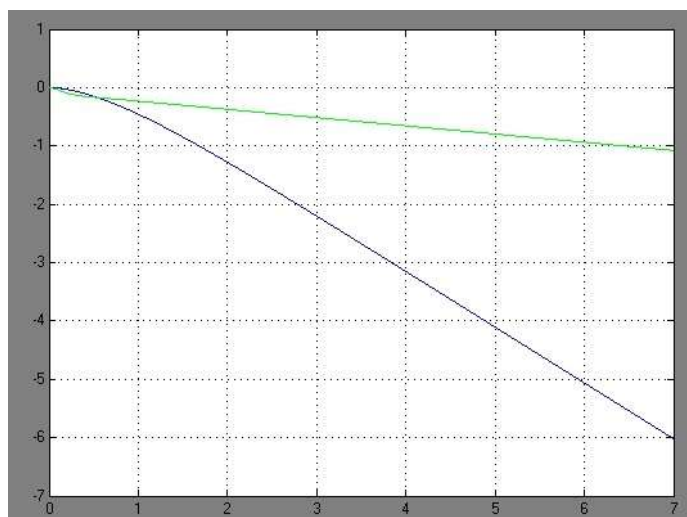


Рис.49 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип – $\tau_{um} = 0.001\text{с}$ (X)

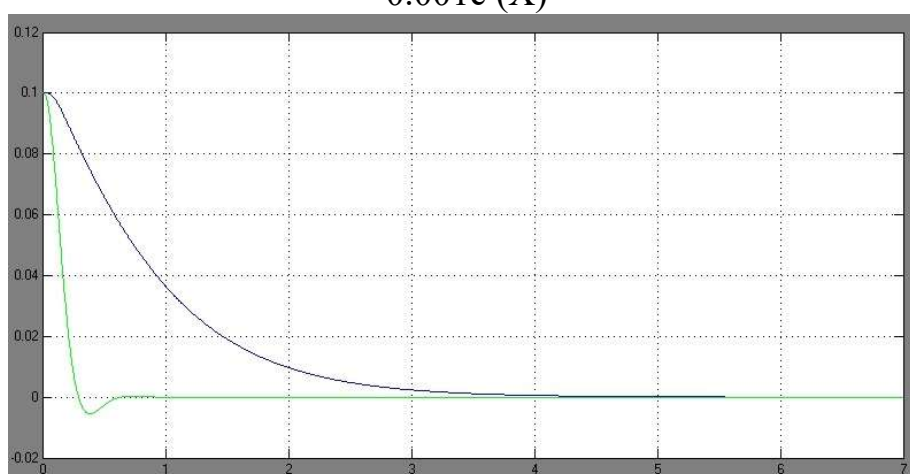


Рис.50 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип – $\tau_{um} = 0.02\text{с}$ (Ф)

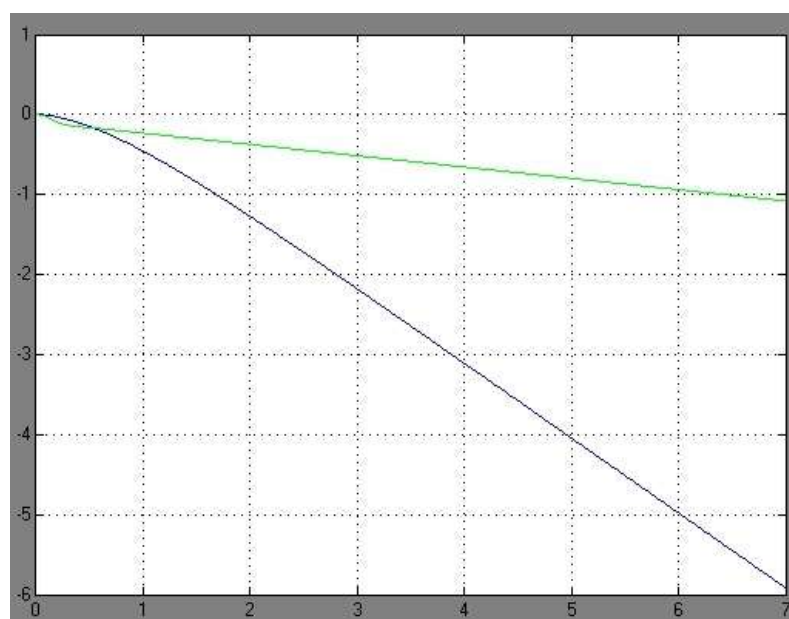


Рис.51 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип – $\tau_{um} = 0.02\text{с}$ (X)

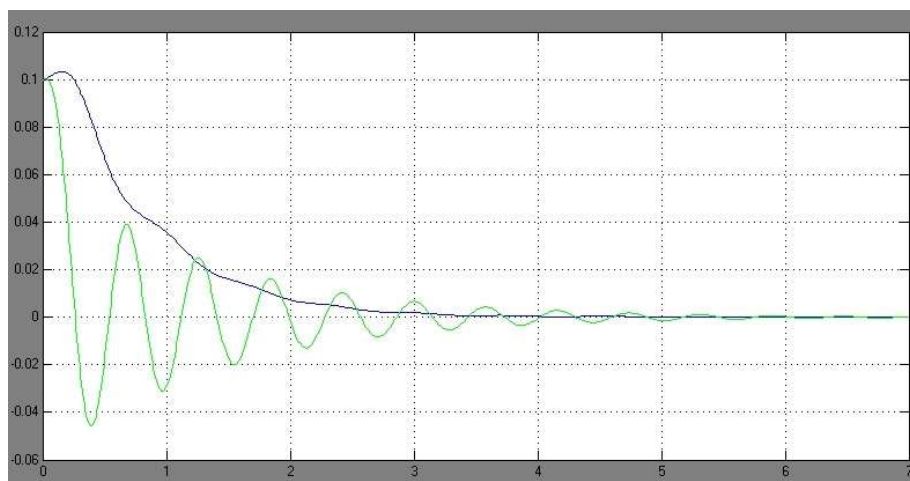


Рис.52 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип – $\tau_{\text{aim}} = 0.1\text{с}$ (ϕ)

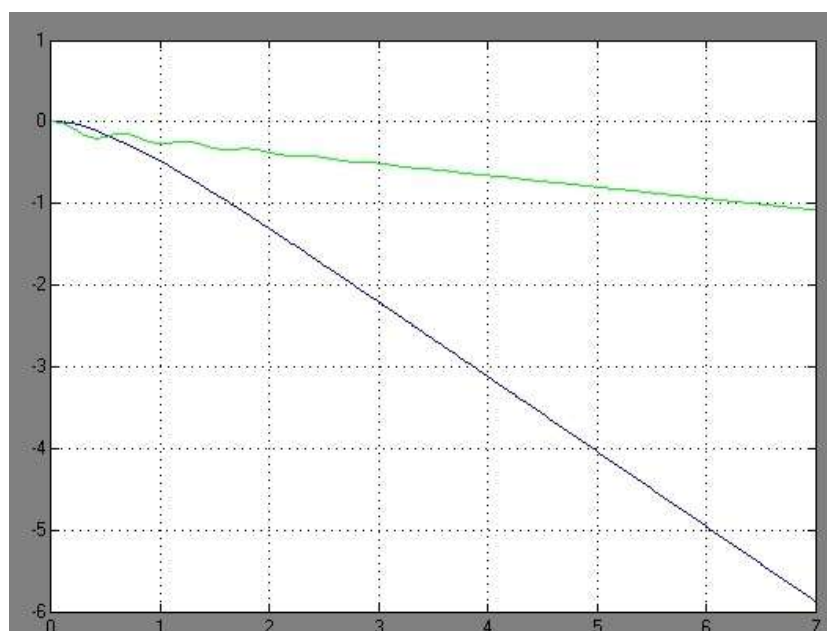


Рис.53 СУ с нечётким регулятором (25 правил) – треугольный тип – $\tau_{\text{aim}} = 0.1\text{с}$ (X)

По результатам анализа рисунков 46-53 и параметров переходных процессов в таблицах 2 и 8 можно сказать, что при использовании ПД-регулятора время установления значительно меньше, но такой тип системы управления сильнее реагирует на изменяющиеся параметры системы, в то время как система управления с нечетким регулятором при изменении параметров системы практически полностью сохраняет свои свойства.

Запустим моделирование системы в течение 5 с при $\tau_{\text{аум}}=0.001$ с, $\tau_{\text{аум}}=0.1$ с и при $q_0=0.1$ рад и $q_0=0.5$ рад. Сравним получившиеся переходные процессы и для наглядности заполним таблицу 9.

Таблица 9. Параметры переходных процессов системы управления

$\tau_{\text{аум}}$, с	q_0 , рад	Регулятор	Угол отклонения маятника от вертикали			Положение тележки, м	
			Время установления ($\dot{\varphi} \leq 0.005$ рад), с	Максимальное перерегулирование, рад	Установившаяся ошибка, рад	Положение тележки через 5с, м	Характер перемещения тележки; направление
0,001	0,1	ПД	0.292	$4.33 \cdot 10^{-3}$	0	-0.7951	Монотонный, неограниченный, влево
		fuzzy	2,1	-	$1.47 \cdot 10^{-5}$	-4.1	Монотонный, неограниченный, влево
	0,5	ПД	0.33	$0.02 \cdot 10^{-3}$	0	-5.5	Монотонный, неограниченный, влево
		fuzzy	5.15	-	$4 \cdot 10^{-4}$	-32.89	Монотонный, неограниченный, влево
0,1	0,1	ПД	3.32	$0.0456 \cdot 10^{-3}$	0	-0.799	Колебательный, неограниченный, влево
		fuzzy	2.34	0.11	$6.8 \cdot 10^{-5}$	-4.04	Монотонный, неограниченный, влево
	0,5	ПД	5.74	$0.23 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	-5.64	Колебательный, неограниченный, влево
		fuzzy	5.38	0.62	0	-59.96	Колебательный, неограниченный, влево

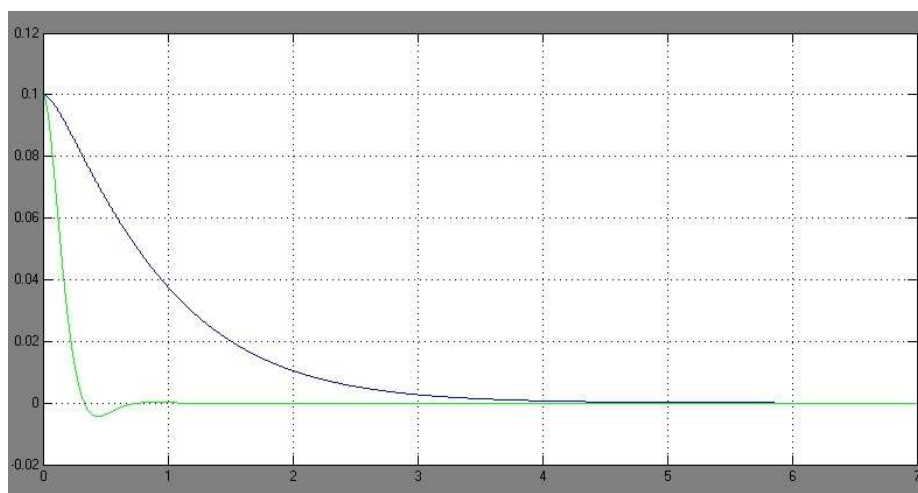


Рис.54 $\varphi - q_0 = 0.1$, $\tau_{\text{аум}} = 0.001$ с

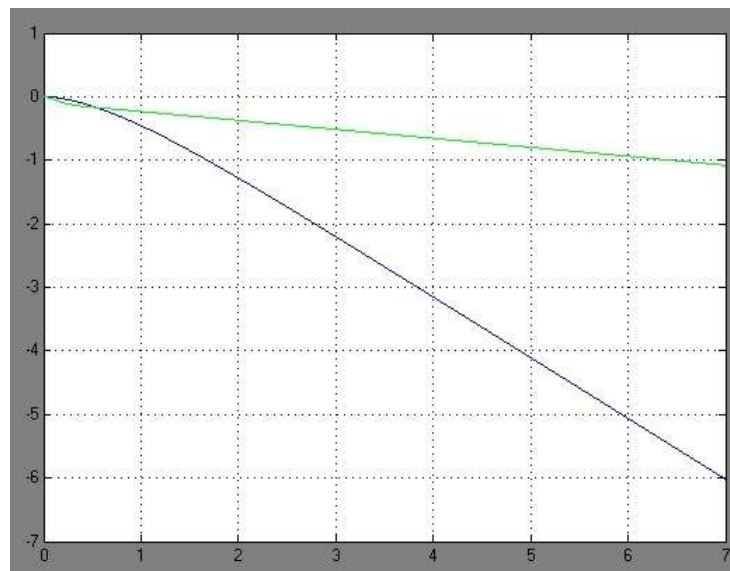


Рис.55 $X - q_0 = 0.1$, $\tau_{\text{aum}} = 0.001c$

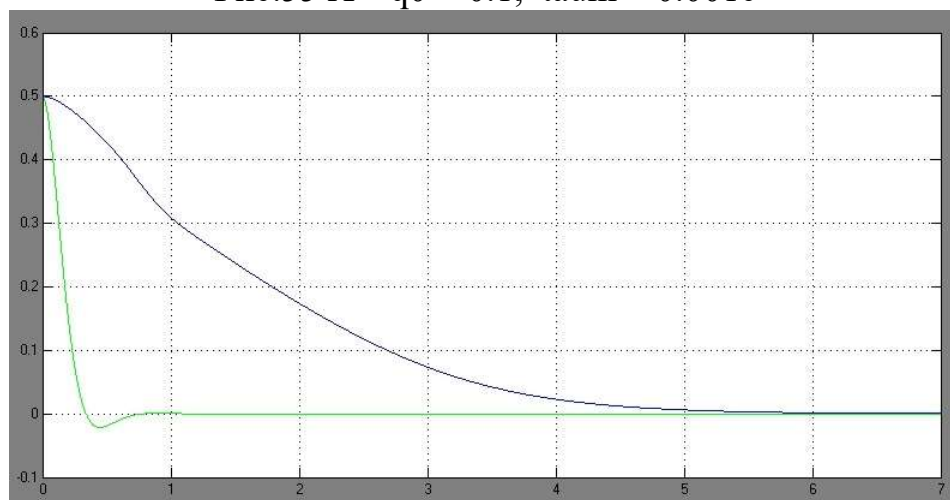


Рис.56 $\phi - q_0 = 0.5$, $\tau_{\text{aum}} = 0.001c$

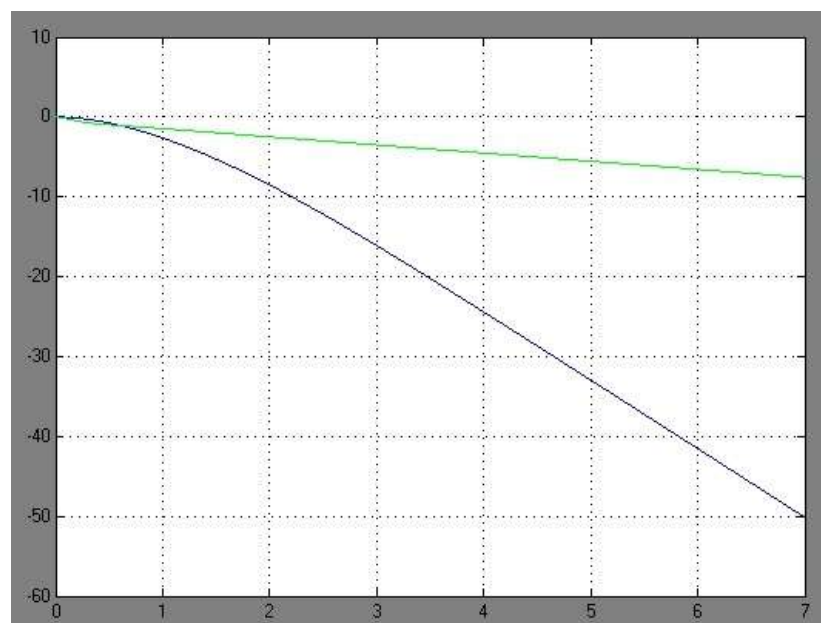


Рис.57 $X - q_0 = 0.5$, $\tau_{\text{aum}} = 0.001c$

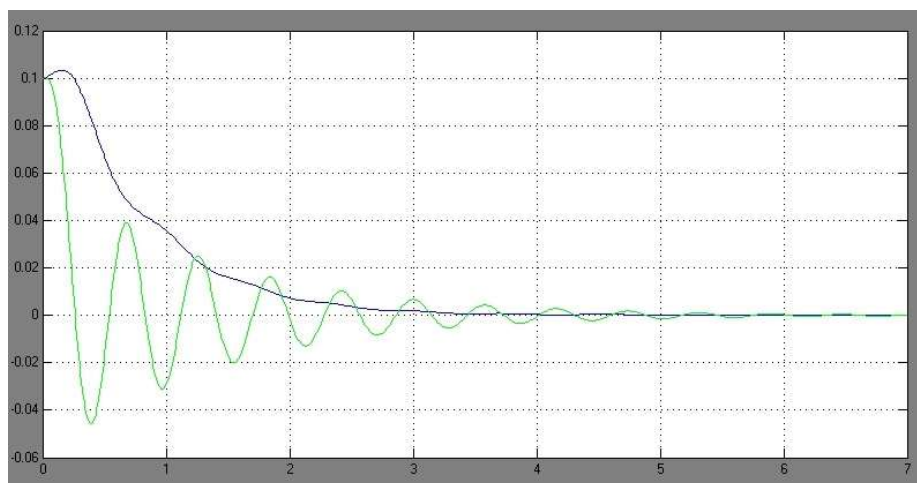


Рис.58 $\phi - q_0 = 0.1$, $\tau_{\text{aum}} = 0.1 \text{ c}$

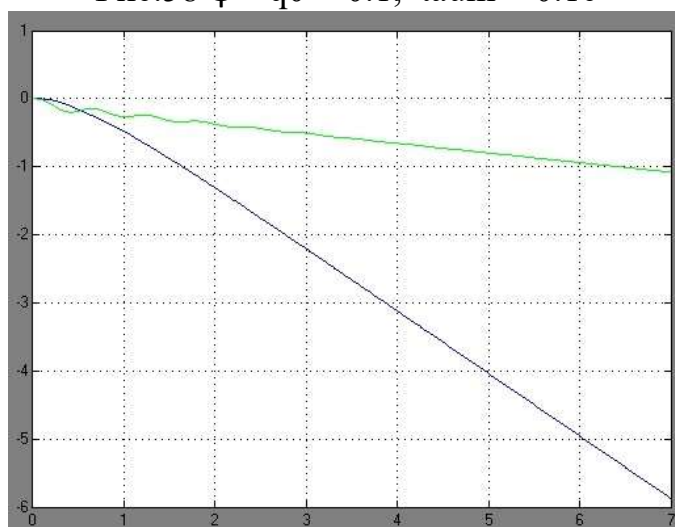


Рис.59 $X - q_0 = 0.1$, $\tau_{\text{aum}} = 0.1 \text{ c}$

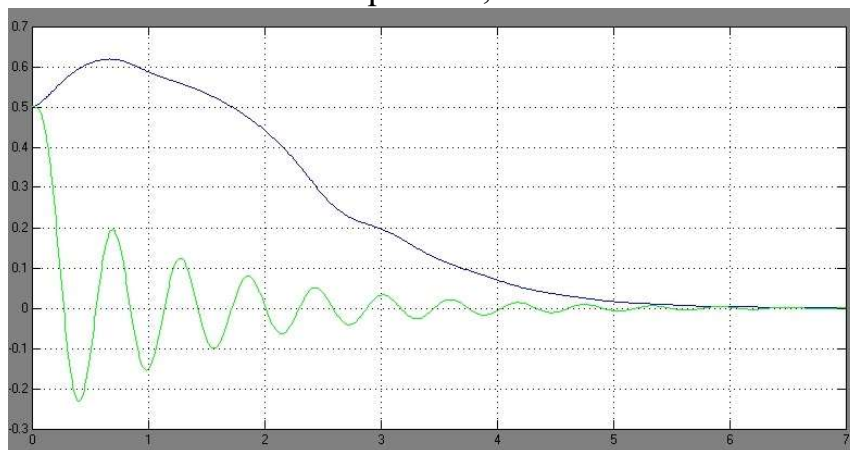


Рис.60 $\phi - q_0 = 0.5$, $\tau_{\text{aum}} = 0.1 \text{ c}$

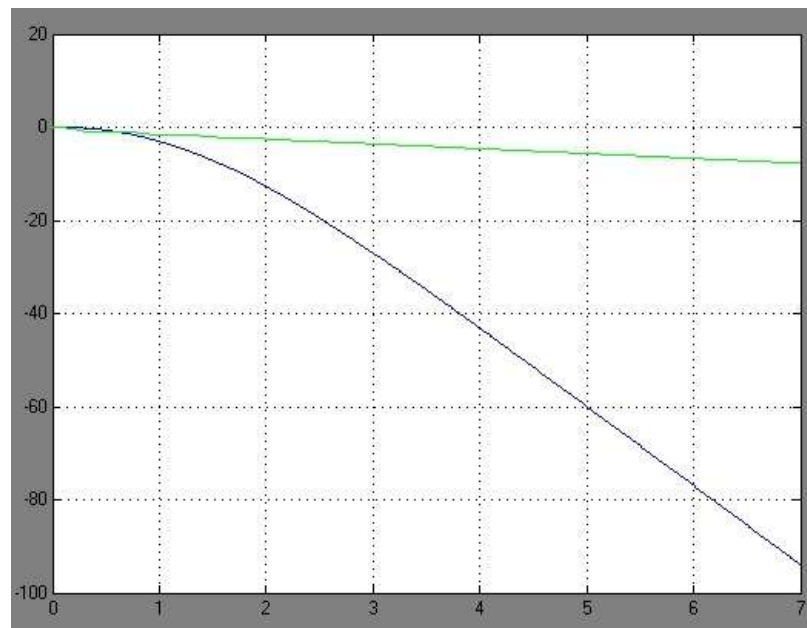


Рис.6.1 $X - q_0 = 0.5$, $\tau_{um} = 0.1$ с

Вывод: при использовании ПД-регулятора время установления значительно меньше, но такой тип системы управления сильнее реагирует на изменение параметров системы, в то время как система управления с нечетким регулятором при изменении параметров системы практически полностью сохраняет свои свойства

Ответы на контрольные вопросы:

1. Объясните, почему в системе управления по 2 переменным положение тележки не принимает постоянное значение, а изменяется монотонно? Каким способом можно ограничить движение тележки, чтобы ее положение принимало постоянные значения?

Так как в используемых 2 переменных не было переменной положения тележки. Это можно исправить, применив метод Такаги-Сугено, который содержит 4 переменные: угол маятника, его угловая скорость, рассогласование между заданным и текущим положением тележки и скорость тележки.

2. Что такое FIS в Fuzzy Logic Toolbox системы Matlab?

Это нечеткие системы логического вывода.

3. Как поменять тип функции принадлежности в системе нечеткого вывода в пакете Fuzzy Logic Toolbox системы Matlab, не используя графическо-пользовательский интерфейс?

FIS-файл при сохранении представляет собой структуру с 10 полями, среди которых и содержится информации о типе функции принадлежности. Такой файл можно редактировать с помощью любого текстового редактора.

4. Как можно изменить параметры переходных процессов СУ с нечетким регулятором?

Изменить тип функций принадлежности и их параметры, изменить количество правил и терм, изменить логические методы.

5. Каким образом можно приблизить параметры переходных процессов СУ с нечетким регулятором к СУ с ПД-регулятором?

Путем изменения параметров функций принадлежности переменных.

6. Как влияет на данную СУ нечётким регулятором изменение методов конъюнкции, импликации, агрегирования и дефаззификации?

При изменении методов переходные процессы резко изменяются

7. Какая система управления имеет большую чувствительность к изменению своих параметров (параметров двигателя) в рамках данной задачи, система управления на основе ПД-регулятора или на основе нечёткого регулятора?

Большую чувствительность к изменению параметров двигателя в рамках данной задачи имеет система управления на основе ПД-регулятора.

8. Назовите преимущества и недостатки системы управления перевернутым маятником на основе алгоритма Такаги-Сугено с управлением по 4 переменным по сравнению с СУ на основе алгоритма Мамдани с управлением по 2 переменным.

Преимуществом метода Такаги-Сугано является то, что он позволяет учитывать больше переменных, в результате чего может быть учтено положение тележки. Это же является минусом алгоритма Мамдани.