

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАТОРА БАЗ ЗНАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK. Ч.1.

**Мишин Андрей Анатольевич¹, Петров Сергей Павлович²,
Ульянов Сергей Викторович³**

¹ *Кандидат технических наук, доцент института САУ;
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: andrmish@yandex.ru.*

² *Студент;
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: msgtome@bk.ru.*

⁴ *Доктор физико-математических наук, профессор;
PronetLabs;
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.*

На основе результатов моделирования интеллектуальной системы управления динамическим объектом управления «каретка перемещения – перевернутый маятник» в среде MatLab/Simulink показано преимущество использования разработанного оптимизатора баз знаний перед классическими методами теории автоматического управления применительно к сложно-структурированным объектам управления.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, система автоматического управления, объект управления, база знаний.

KNOWLEDGE BASE OPTIMIZATOR APPLICATION FOR INTELLIGENT CONTROL SYSTEM DESIGN IN MATLAB/SIMULINK . PT. 1.

Mishin Andrey¹, Petrov Sergey², Ulyanov Sergey³

¹ *Candidate of Science in Engineering, associate professor of Institute of system analysis and management;
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: andrmish@yandex.ru.*

² *Student;
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: msgtome@bk.ru.*

³ *Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.*

Using the simulation results of intelligent control system of dynamic control object as «cart-pole» in MatLab/Simulink demonstrate the advantage of using the developed knowledge base optimizer compared with the classical methods of automatic control theory applicable to complex ill-structured control objects.

Keywords: intelligent control system, automatic control system, control object, knowledge base.

Введение

Подход, основанный на нечеткой логике, позволяет представлять качественные знания о проблемной области (управления в нашем случае) в виде некоторой системы вывода (рассуждений), способной осуществлять приближенное сопоставление и интерполяцию. Однако, в технологиях нечеткого вывода, выбор и генерация функций принадлежности (ФП) и нечетких продукционных правил является в основном функцией человека-эксперта в данной проблемной области. Эксперт решает также задачу настройки и обновления базы знаний (БЗ). Технология нечеткого моделирования в чистом виде не содержит внутри себя механизмов генерации баз знаний и параметров ФП, а также механизмов самообучения, включающих автоматическое проектирование (настройку) нечетких правил и параметров ФП.

Опыт эксплуатации инструментальных средств MatLab/Simulink в течении последних 18 лет показал, что в полном объеме трудно (или не возможно) моделировать объективные БЗ для заданной ситуации управления указанным инструментарием. Эти возможности обеспечиваются в рамках технологии на мягких вычислениях (*Soft Computing technology*), включающей Генетические Алгоритмы (ГА) (*Genetic Algorithms*) и Нечеткие Нейронные Сети (*Fuzzy Neural Networks*).

В [1] разработан инженерный программный инструментарий проектирования робастных БЗ – оптимизатор БЗ (ОБЗ).

В данной статье, являющейся развитием исследований [2 – 7] показаны новые возможности применения ОБЗ на технологиях мягких вычислений для исследования и проектирования робастных БЗ в интеллектуальных системах управления (ИСУ). В качестве наглядного примера (Benchmark) выбран сложный глобально неустойчивый объект управления в виде системы «каретка перемещения – перевернутый маятник», широко используемого при тестировании разработанного инструментария. Подробно рассмотрены этапы проектирования и тестирования робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления.

1. Модель глобально неустойчивого объекта управления: динамическая система «каретка перемещения – перевернутый маятник»

Движение динамической системы «каретка перемещения – перевернутый маятник» с двумя степенями свободы (см. рис. 1) описывается следующими уравнениями:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{+(u + \xi(t)) + \{+a_1 \dot{z} + a_3 z\} - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k \dot{\theta}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}, \quad (1)$$

$$\ddot{z} = \frac{u + \xi(t) + \{-a_1 \dot{z} - a_2 z\} + ml(\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \cos \theta)}{m_c + m},$$

где g – ускорение свободного падения (9.8 m/sec^2), m_c – масса каретки, m – масса маятника, l – половина длины маятника, $\xi(t)$ – стохастическое воздействие и u – управляющая сила, действующая на каретку; $\{k; a_1; a_2\}$ – параметры модели ОУ.

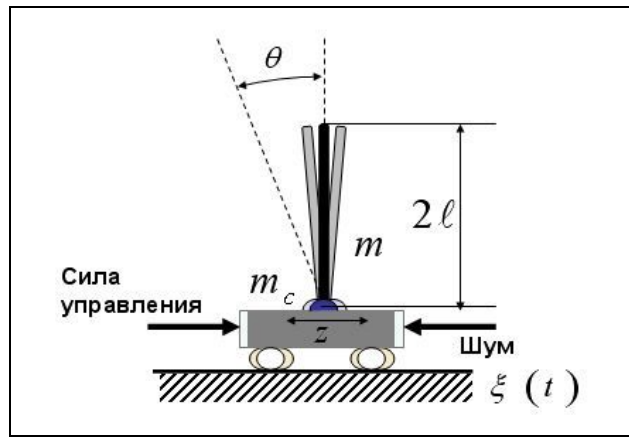


Рис. 1. Динамическая система «каретка перемещения – перевернутый маятник»

Уравнения для скорости производства энтропии в ОУ и ПИД-регуляторе имеют следующий вид:

$$\frac{d}{dt} S_\theta = \frac{k\dot{\theta}^2 + \frac{ml\dot{\theta}^3 \sin 2\theta}{m_c + m}}{l\left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m}\right)}; \quad \frac{d}{dt} S_z = a_1 \dot{z}^2; \quad \frac{d}{dt} S_u = k_d \dot{e}^2. \quad (2)$$

Введение энтропийных характеристик в исследование движения ОУ и динамического поведения регулятора позволяет минимизировать потери полезного ресурса как в ОУ, так и в регуляторе.

Такой подход позволяет реализовать принцип минимума обобщенной энтропии в системе управления и обосновать возможность введения физического критерия самоорганизации ИСУ.

Особенность рассматриваемого ОУ состоит также в реализации возможности управления одним ПИД-регулятором двумя степенями свободы за счет существования эффекта переноса энергии перекрестными нелинейными связями между степенями свободы ОУ с минимальной энтропией.

А. Задача управления. При наличии стохастического шума, действующего на каретку, при наличии времени задержки сигнала в системе измерения положения маятника (равного 0.001 сек.) и при наличии ограничения на силу управления, перевести маятник из начального положения в целевое вертикальное ($\theta = 0$), осуществляя движение ОУ в заданном вертикальном положении.

Б. Проектирование системы управления. Для решения поставленной задачи управления рассмотрим следующую схему и принцип управления. Так как сила управления действует на каретку, то задающий сигнал управления тоже должен быть связан с движением каретки. Для задачи стабилизации перевернутого маятника ($\theta \rightarrow 0$) выберем следующий задающий сигнал: z_{ref} проекция центра тяжести перевернутого маятника на ось z . Проекция центра тяжести перевернутого маятника вычисляется по формуле: $z_{ref} = -l \cdot \sin \theta$. Следовательно, задающий сигнал может быть представлен следующим образом: $z_{ref} = -l \cdot \sin \theta$. Очевидно, что, если $\theta \rightarrow 0$, то $z_{ref} \rightarrow 0$. Физически это означает перевод положение каретки в равновесное состояние удержания маятника в вертикальном положении.

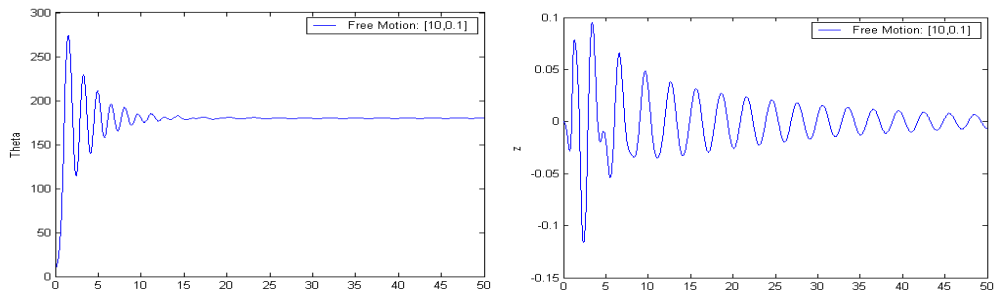
Зададим также дополнительное ограничение на задающий сигнал: $|z_{ref}| \leq 1$.

В. Исследование свободного движения ОУ. На первом этапе проектирования исследуем свободное движение ОУ. Для этого выбраны следующие начальные условия:

Параметры модели ОУ: $\{m_c [kg]; m [kg]; l [m]; k; a_1; a_2\} = \{1; 0.1; 0.5; 0.4; 0.1; 5\}$.

Начальное положение: $[\theta_0 \ \dot{\theta}_0] = [10 \ 0.1]$ (в градусах); $[z_0 \ \dot{z}_0] = [0 \ 0]$.

Свободное движение динамической системы «маятник-каретка» показано на рис. 2.

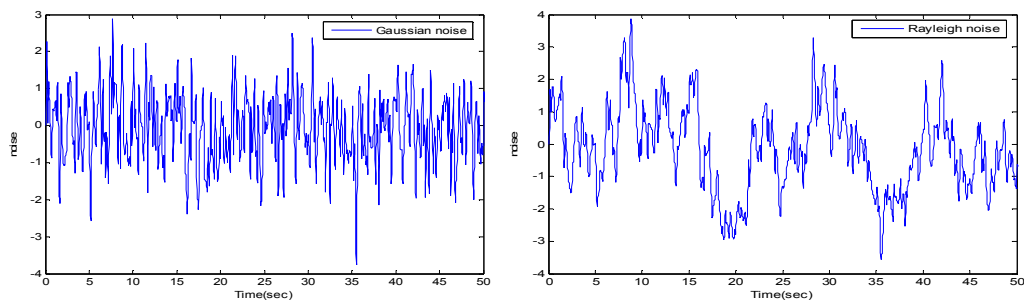


Движение маятника

Движение каретки

Рис. 2. Свободное движение ОУ

Рассмотрим также стохастическое поведение ОУ под действием двух внешних шумов, показанных на рис.3.

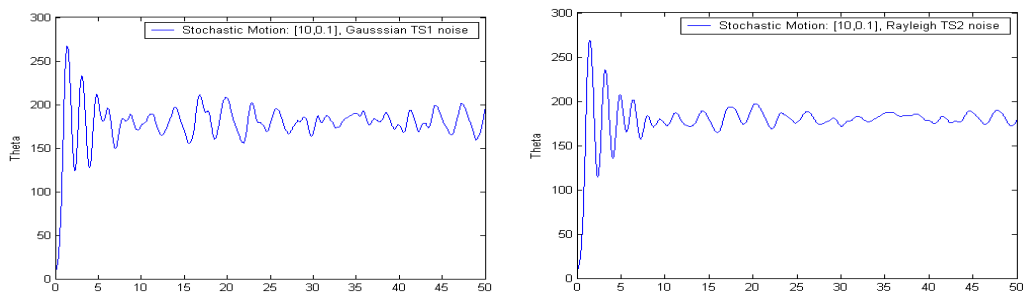


(а) Гауссовский шум

(б) Рэлеевский шум

Рис. 3. Внешние шумы, выбранные для двух типовых (обучающих) ситуаций

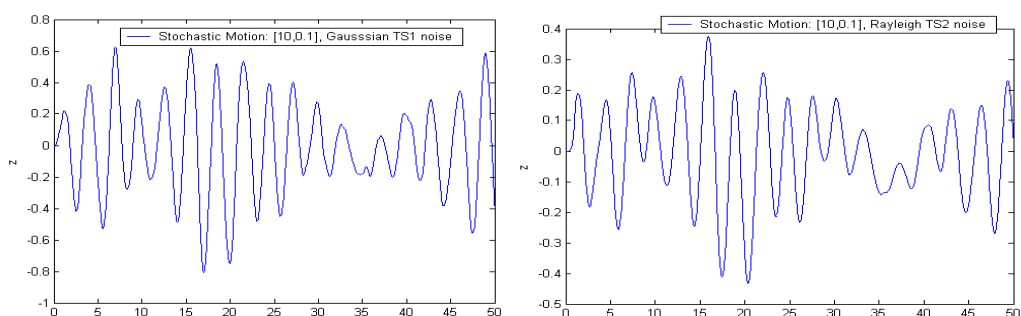
На рис. 4а и 4б показано движение системы в двух ситуациях: при Гауссовском шуме (TS1) и Рэлеевском шуме (TS2).



Движение маятника при Гауссовском шуме

Движение маятника при Рэлеевском шуме

Рис. 4а. Стохастическое движение ОУ



Движение каретки при Гауссовском шуме Движение каретки при Рэлеевском шуме

Рис. 4б. Стохастическое движение ОУ

Из результатов моделирования свободного и вынужденного стохастического движения видно, что маятник без управления не может находиться в вертикальном положении. Поэтому положение маятника в вертикальной плоскости является глобально неустойчивым.

Рассмотрим задачу управления неустойчивым ОУ классическим методом в условиях отсутствия/присутствия задержки по времени в системе измерения положения маятника.

Введем также следующие ограничения на силу управления u и движение каретки z :

$$-5.0 < u < 5.0 [N] \text{ и } -1.0 < z < 1.0 [m].$$

2. Управление ПИД регулятором в условиях наличия/отсутствия задержки по времени в системе измерения положения маятника

На рис. 5 показано движение маятника с ПИД управлением при Рэлеевском шуме и в условиях отсутствия задержки по времени в системе измерения положения маятника. Рассмотрим значения коэффициентов усиления $K = [50 \ 50 \ 50]$, подобранные «вручную» и время управления = 0.025 сек. Из результатов моделирования на Рис 5 видно, что цель управления достигается успешно – маятник держится вертикально (угол отклонения около 0 градусов).

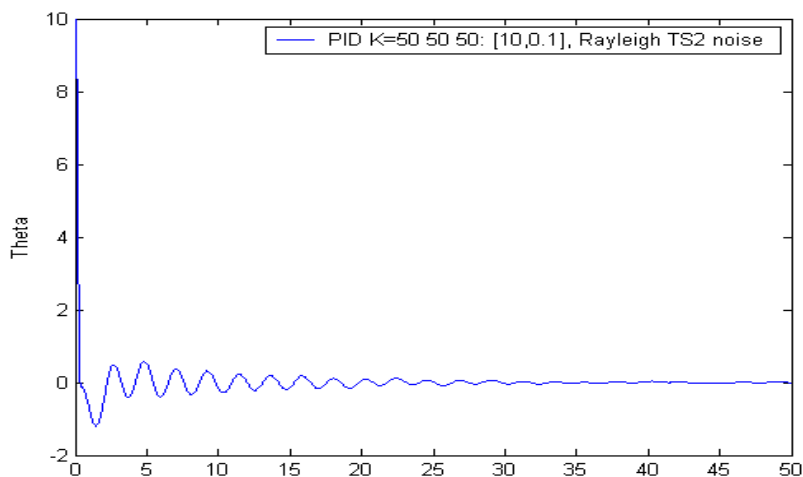


Рис. 5. ПИД управление маятником (в условиях отсутствия задержки по времени)

На рис. 6а,б показано движение маятника с ПИД управлением в условиях задержки по времени (*time delay*) в канале измерения равной 0.001 сек. и двумя значениями коэффициентов усиления $K = [100 \ 100 \ 100]$ и $K = [100 \ 50 \ 30]$, назначенных «вручную», соответственно.

Как показывают результаты моделирования, при наличии задержки по времени в системе измерения положения маятника, трудно подобрать коэффициенты усиления ПИД-регулятора.

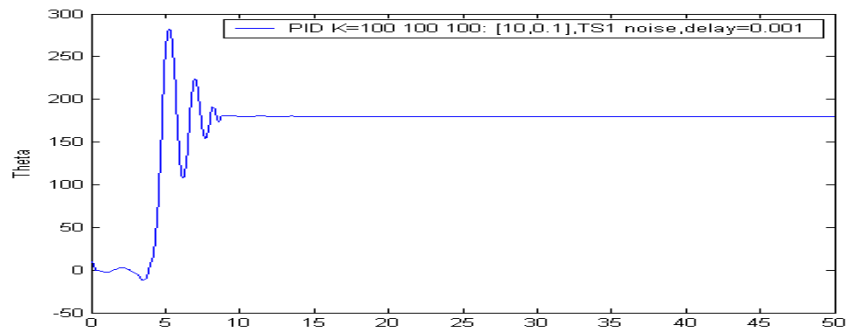


Рис. 6а. ПИД управление маятником в условиях наличия задержки по времени

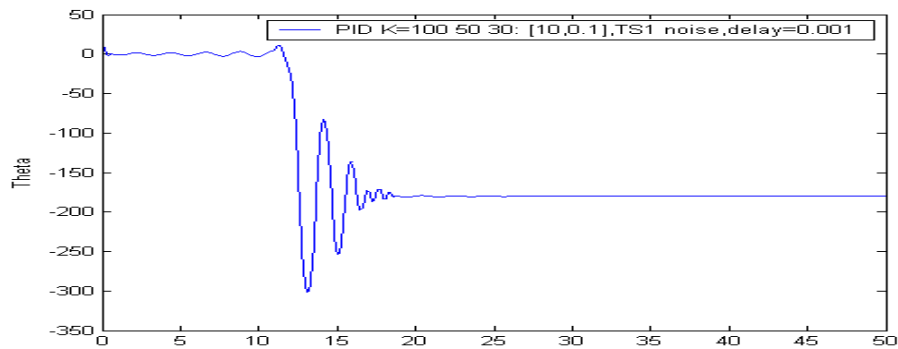


Рис. 6б. ПИД управление маятником в условиях наличия задержки по времени

Таким образом, необходимо повысить уровень «интеллектуальности» разработанной системы автоматического управления. Рассмотрим этапы проектирования ИСУ.

3. Проектирование интеллектуальной системы управления (Smart control design)

Структура ИСУ в виде нечеткого ПИД-регулятора на основе инструментария ОБЗ приведена на рис. 7.

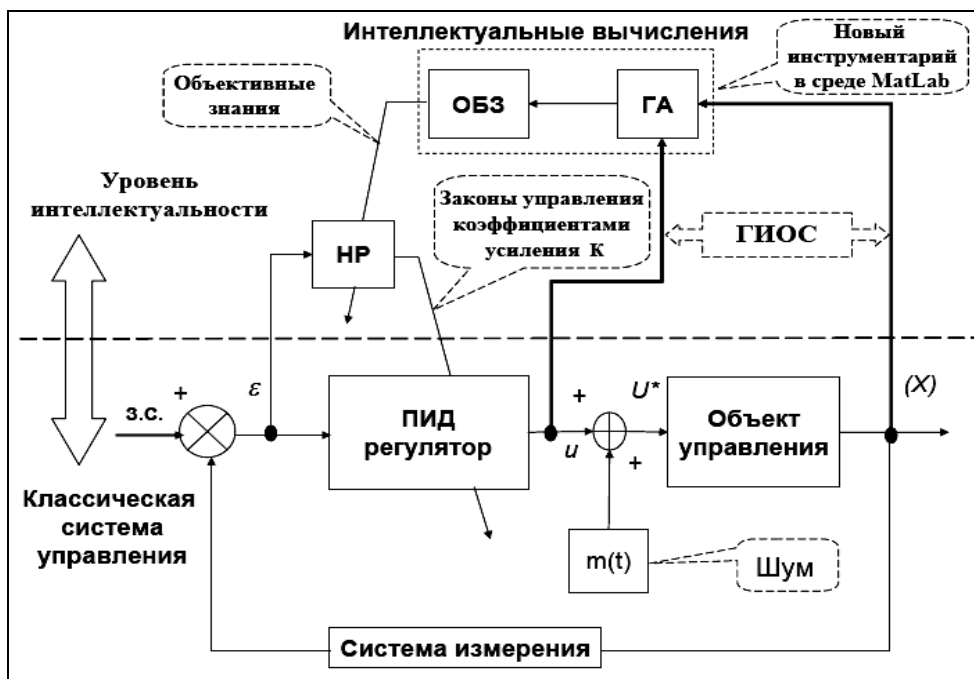


Рис. 7. Типовая структура ИСУ (третьего поколения [1])

Первый этап проектирования начинается с построения обучающего сигнала на основе ГА.

3.1. Построение обучающего сигнала

Зададим типовую (обучающую) ситуацию обучения.

Типовые условия 1

Параметры модели ОУ:

$$\{m_c [kg]; m [kg]; l [m]; k; a_1; a_2\} = \{1; 0.1; 0.5; 0.4; 0.1; 5\};$$

Начальное положение: $[\theta_0 \dot{\theta}_0] = [10 \ 0.1]$ (в градусах); $[z_0 \dot{z}_0] = [0 \ 0] [m]$;

Внешний шум – Гауссовский (рис. 4);

Задержка по времени в канале измерения = 0.001 (сек);

Ограничения на силу управления: $-5.0 < u < 5.0 [N]$;

Ограничения на движение каретки: $-1.0 < z < 1.0 [m]$.

Выберем следующие параметры поиска для ГА:

- область поиска значений вектора $K = [100 \ 100 \ 100]$ с шагом разбиения $\Delta = 0.1$;
- функция пригодности $\Phi\Pi = -\sum|\theta| - \sum|\dot{\theta}|$ представляет собой сумму абсолютных значений угла отклонения и скорости угла отклонения, взятых со знаком минус.

MatLab/Simulink – модель для проектирования обучающего сигнала (ОС) показана на рис. 8.


```

sim('Pend.cart.TSdesign',[t0 t1],OPTIONS);

Norm=length(simoutX(:,1)); %number of the elements in the output vector
y=-sum(abs(simoutX(:,1)))/Norm+tout(end)-sum(abs(simoutX(:,2)))/Norm; % FF

```

Рис. 9. Матлаб-функция пригодности для ГА при построении ОС

На рис. 10 показано движение маятника при оптимальном управлении, найденном с помощью ГА, в обучающей ситуации 1.

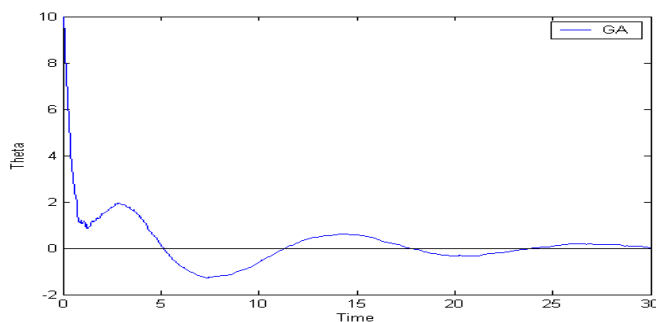


Рис. 10. Движение маятника при оптимальном управлении, найденном с помощью ГА

По окончании процесса поиска оптимального сигнала управления с помощью ГА, формируем обучающий сигнал для следующего этапа технологии проектирования.

Пример фрагмента ОС, построенного в результате ГА поиска, показан на рис. 11.

1	-1.0000000e+000	0.0000000e+000	0.0000000e+000	9.4531250e+001	5.9375000e+001
2	-9.9977933e-001	3.7734262e-002	-9.9992644e-003	8.4765625e+001	9.5312500e+001
3	-9.9911951e-001	6.5982109e-002	-1.9994123e-002	7.5390625e+001	5.9765625e+001
4	-9.9802483e-001	1.0946776e-001	-2.9980205e-002	6.2890625e+001	9.6484375e+001
5	-9.9649928e-001	1.5255502e-001	-3.9953183e-002	6.5625000e+001	3.2031250e+001
6	-9.9454653e-001	1.9527494e-001	-4.9908767e-002	5.3906250e+001	2.8515625e+001
7	-9.9217001e-001	2.3765228e-001	-5.9842701e-002	2.8906250e+001	6.6406250e+001
8	-9.8937289e-001	2.7971185e-001	-6.9750765e-002	7.2656250e+001	6.3281250e+001
9	-9.8615816e-001	3.2147328e-001	-7.9628767e-002	7.6171875e+001	8.2812500e+001
10	-9.8252859e-001	3.6295625e-001	-8.9472545e-002	8.7500000e+001	5.0000000e+001
11	-9.7848683e-001	4.0417615e-001	-9.9277965e-002	3.7890625e+001	2.1093750e+001
12	-9.7403535e-001	4.4514845e-001	-1.0904092e-001	4.8046875e+001	6.7968750e+001
13	-9.6918758e-001	4.8477672e-001	-1.1875735e-001	5.3515625e+001	6.8359375e+001
14	-9.6396792e-001	5.2196601e-001	-1.2842343e-001	3.0468750e+001	3.1250000e+000
15	-9.5839863e-001	5.5692884e-001	-1.3803554e-001	1.2890625e+001	2.3828125e+001

Рис. 11. Фрагмент обучающего сигнала

Как видно из рис. 11, ОС состоит из колонок чисел, представляющих значения ошибки управления, ее скорости и интегральной части, а также соответствующие им оптимальные значения коэффициентов усиления, найденные с помощью ГА.

Примечание. Файл ОС имеет вид «имя.pat».

Данный ОС поступает на вход ОБЗ, который строит оптимальную и робастную БЗ для заданной типовой ситуации. (см. ниже пример спроектированной БЗ, рис. 13). Далее построенная база проверяется на множестве других ситуаций. Выбирается робастная БЗ для дальнейшего использования.

3.2. Исследование предельных возможностей спроектированных БЗ

Рассмотрим задачу определения предельных возможностей построенных БЗ для различных типовых ситуации и наметим пути их дальнейшего совершенствования.

Исследуем возможности четырех баз знаний, построенных для четырех типовых ситуаций, различающихся внешними шумами, показанными на рис. 12.

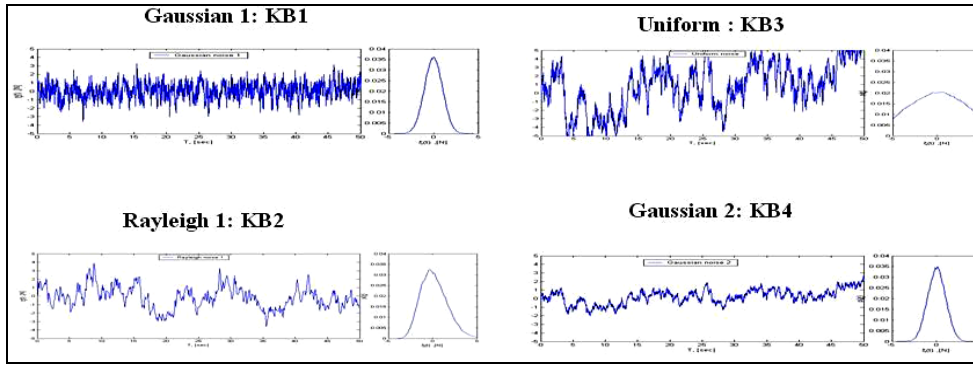


Рис. 12. Четыре типовых шума для ОУ

На рис. 12 показаны шумовые сигналы с различными функциями плотности распределения вероятностей. В типовых условиях 1 используется Гауссовский шум, в типовых условиях 2 используется равномерно распределенный шум, в типовых условиях 3 используется Рэлеевский шум и в типовых условиях 4 используется другой Гауссовский шум. На рис. 12 также используются следующие обозначения: KB1 (от английского «Knowledge Base») означает сокращенно БЗ1 и т.д. Для четырех типовых ситуаций построим четыре Базы Знаний с помощью ОБЗ и исследуем их возможности.

А. База Знаний 1 (БЗ1) состоит из 26 правил (рис. 13), выбранных ОБЗ из полной БЗ с 729 правил. Число лингвистических переменных для трех входов равно (9,9,9). (Напомним, что полная БЗ строится из всех комбинаций лингвистических переменных равной $9 \times 9 \times 9 = 729$).

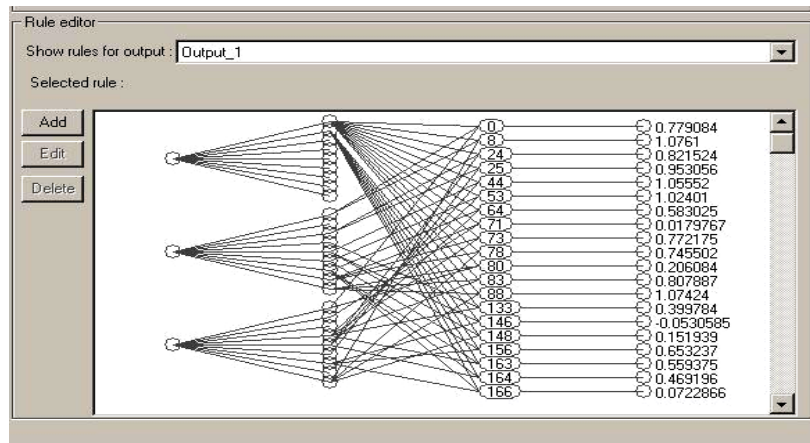


Рис. 13. БЗ1 нечеткого контроллера 1 (НП1)

Б. База Знаний 2 (БЗ2) состоит из 33 правил (рис. 14), выбранных ОБЗ из полной БЗ с 729 правил. Число лингвистических переменных для трех входов равно (9,9,9).

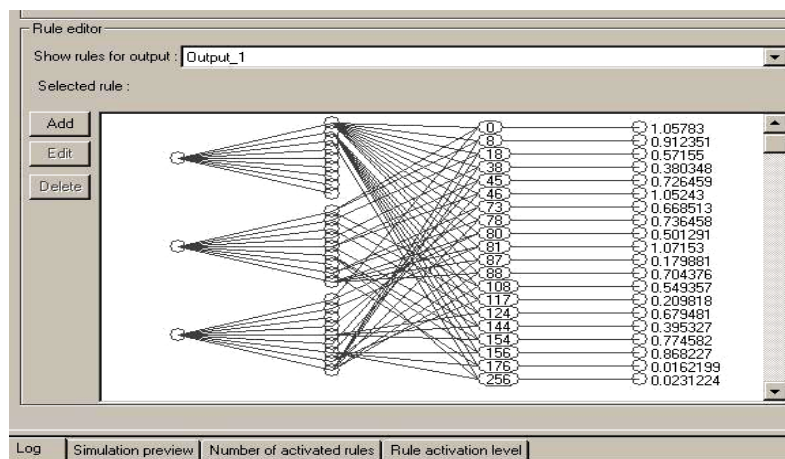


Рис. 14. БЗ2 нечеткого контроллера 2 (НР2)

В. База Знаний 3 (БЗ3) состоит из 48 правил (рис. 15), выбранных ОБЗ из полной БЗ с 360 правил. Число лингвистических переменных для трех входов равно (9,5,8).

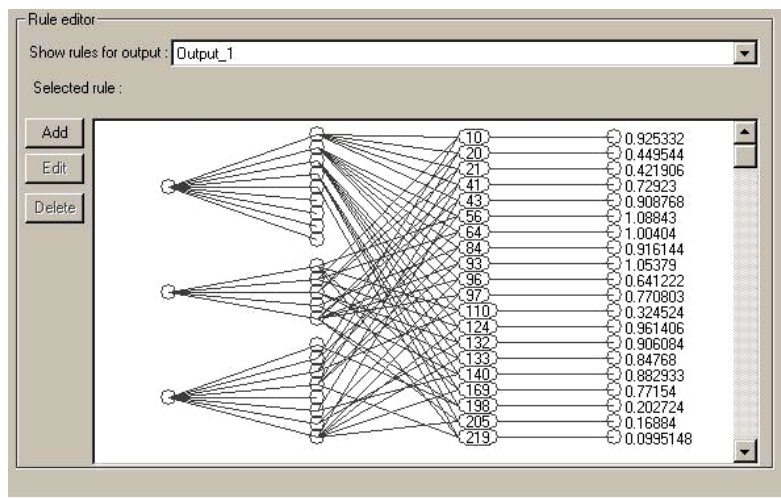


Рис. 15. БЗ3 нечеткого контроллера 3 (НР3)

Г. База Знаний 4 (БЗ4) состоит из 44 правил (рис. 16), выбранных ОБЗ из полной БЗ с 378 правил. Число лингвистических переменных для трех входов равно (9,6,7).

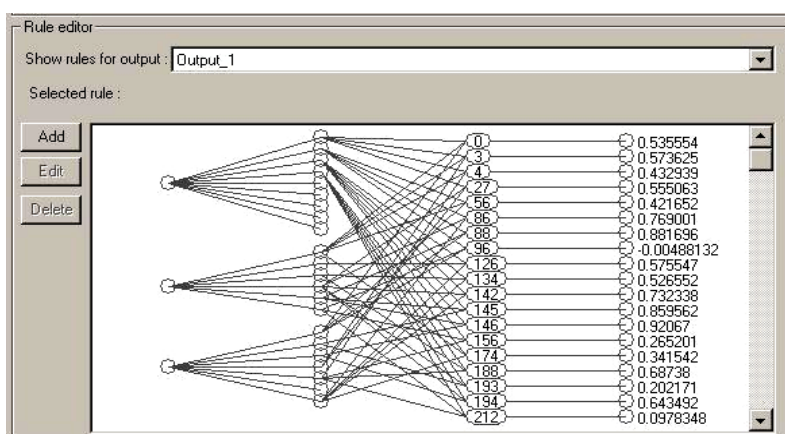


Рис. 16. БЗ4 нечеткого контроллера 4 (НР4)

Исследуем поведение нашей динамической системы под управлением четырех НР на основе четырех построенных БЗ в четырех типовых ситуациях.

3.2.1. Сравнение динамического и термодинамического поведения ОУ под управлением четырех НР.

Рассмотрим типовые ситуации управления.

Типовая ситуация 1. На рис. 17 показано динамическое и термодинамическое поведение ОУ под управлением четырех НР в типовой ситуации 1.

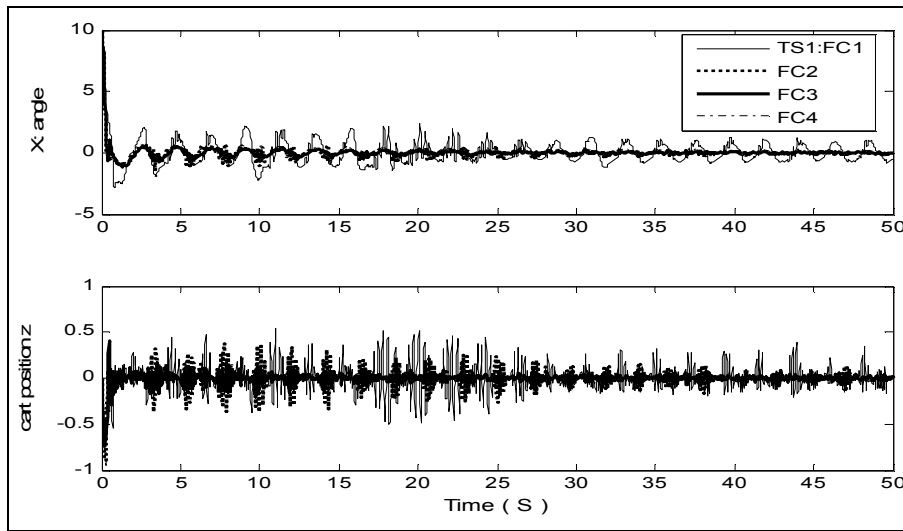


Рис. 17. Движение маятника и каретки под управлением четырех нечетких регуляторов (в типовой ситуации 1)

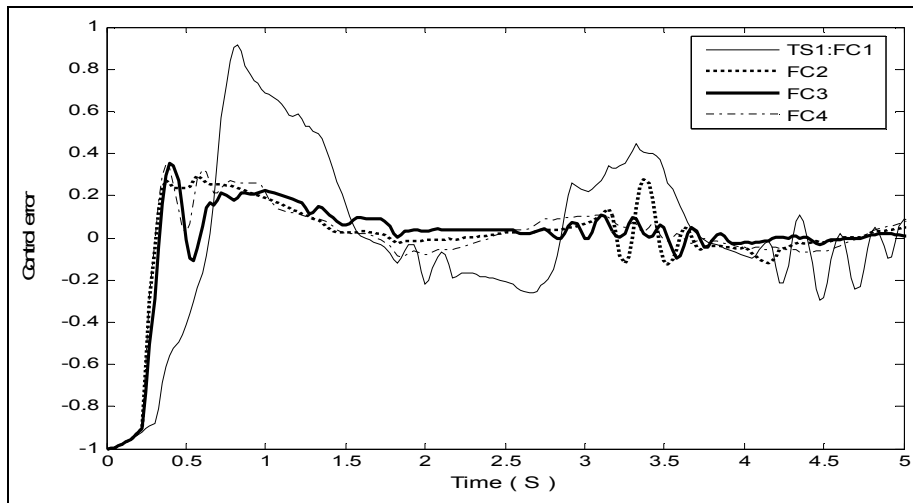


Рис. 18. Ошибка управления (типичная ситуация 1)

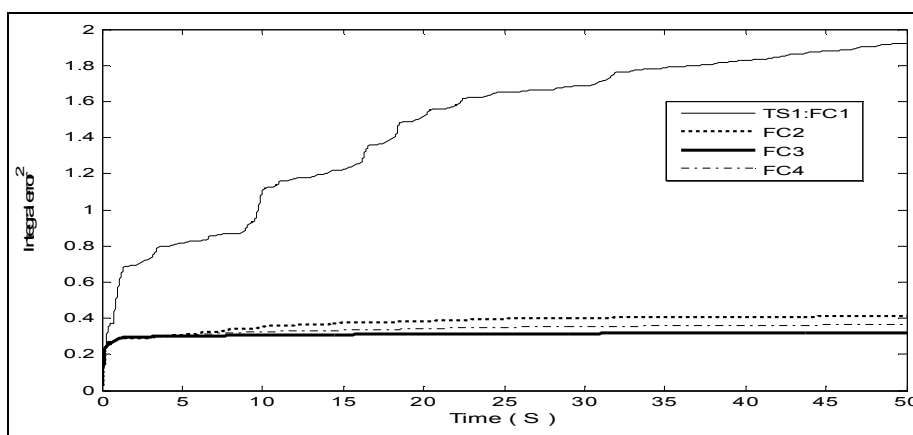


Рис. 19. Интегральная квадратичная ошибка управления (типичная ситуация 1)

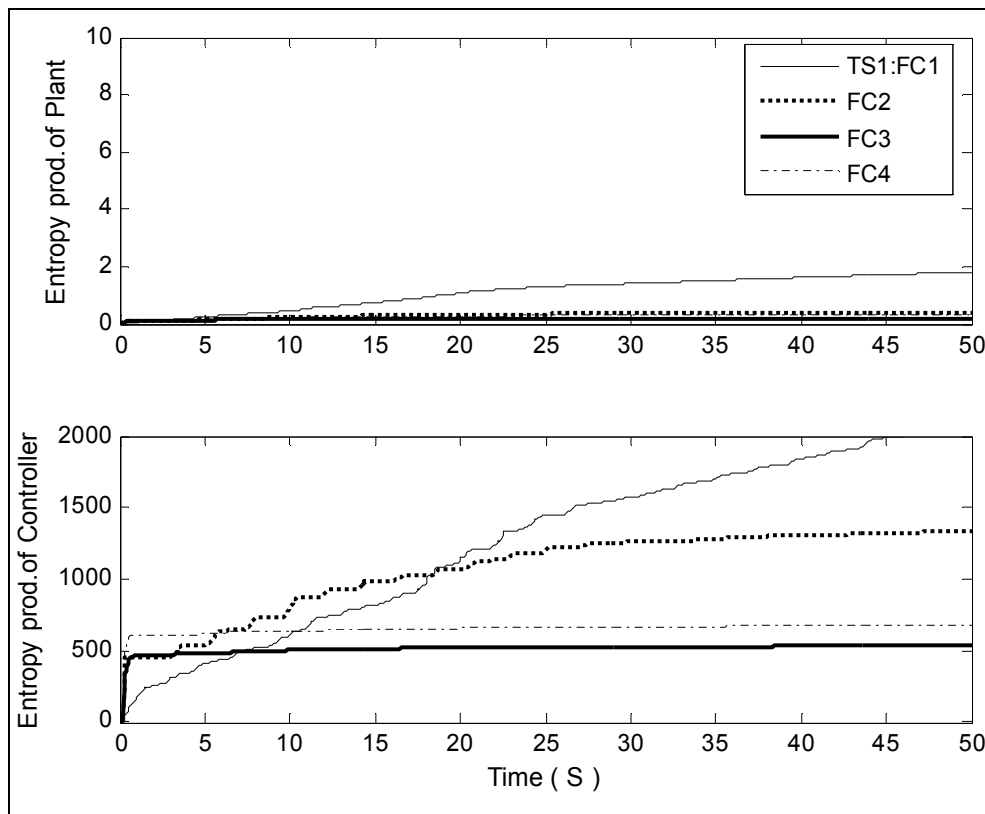


Рис. 20. Производство энтропии в ОУ и системе управления (типовая ситуация 1)

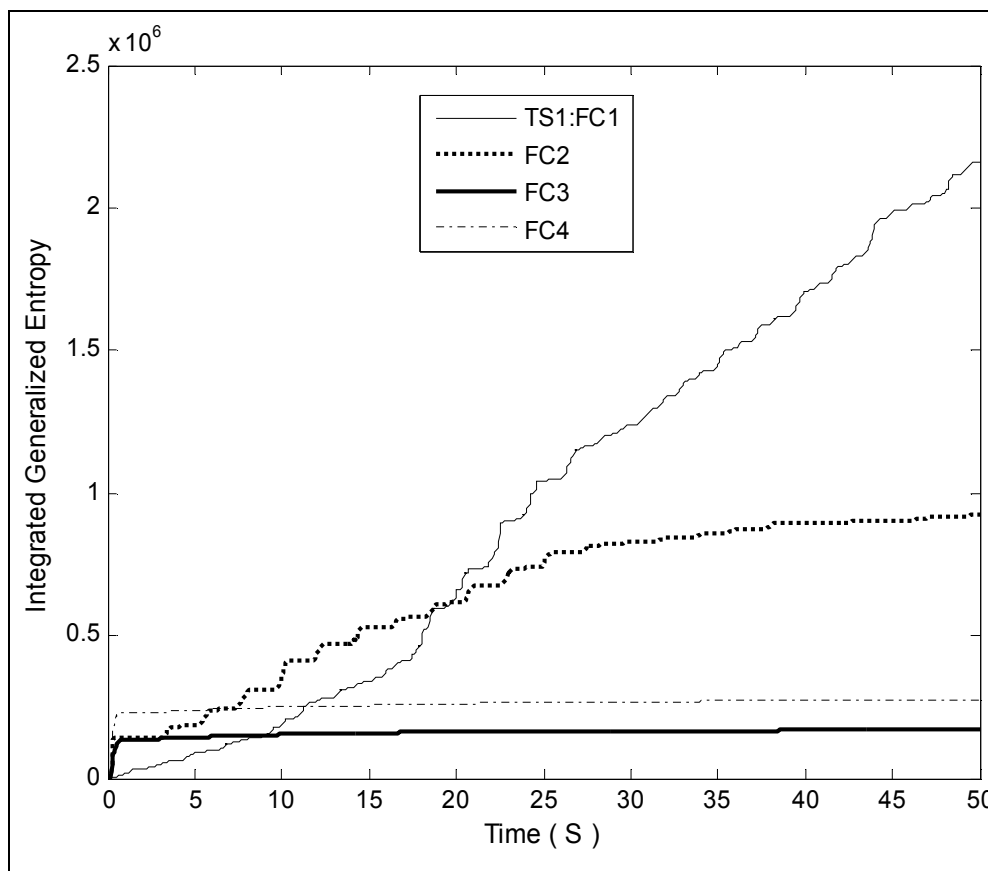


Рис. 21. Интеграл от обобщенного производства энтропии (типовая ситуация 1)

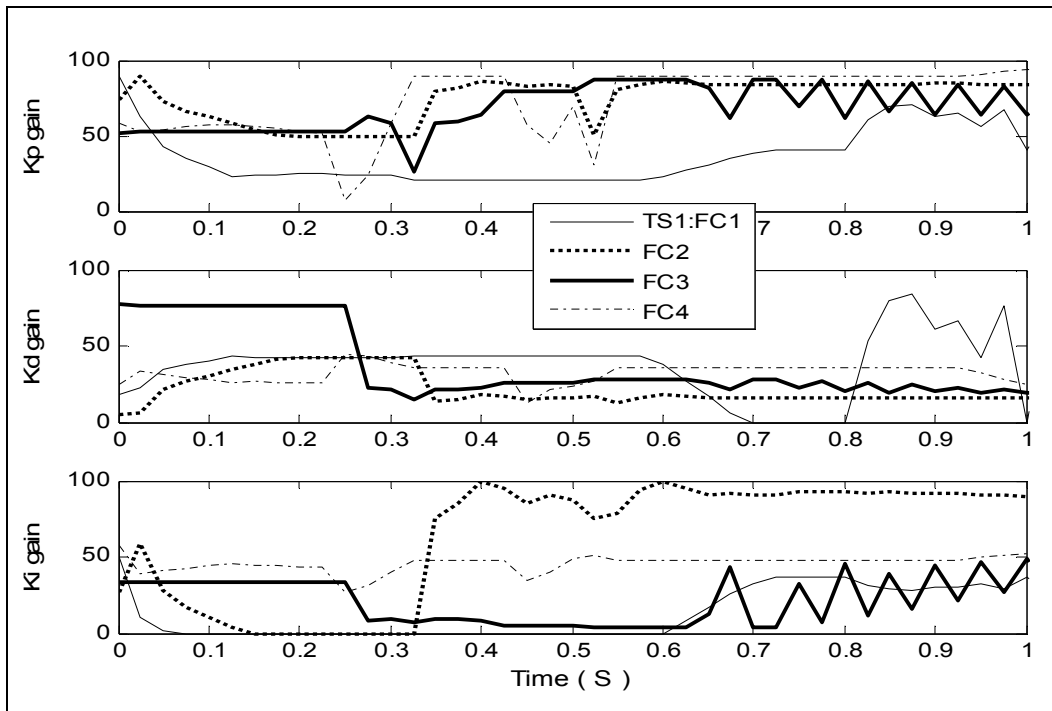


Рис. 22. Законы управления (типичная ситуация 1)

Примечание. На рис. 17 – 22 использованы следующие обозначения: x – угол отклонения маятника (в градусах); z – положение каретки; TS1 – типичная ситуация 1 (2,3,4); FC1 – НР1; FC2 – НР2; FC3 – НР3; FC4 – НР4; control error – ошибка управления; integral error – интегральная ошибка; integrated generalized entropy – интеграл от производства обобщенной энтропии; control force – сила управления.

Вывод: В типичной ситуации 1 все регуляторы справляются с поставленной задачей управления перевернутым маятником (маятник не падает). С точки зрения критериев *минимума ошибки управления и минимума производства обобщенной энтропии* нечеткий регулятор НР3 – оптимальный.

Типичная ситуация 2. На рис. 23 – 26 показано динамическое и термодинамическое поведение ОУ под управлением четырех НР в типичной ситуации 2.

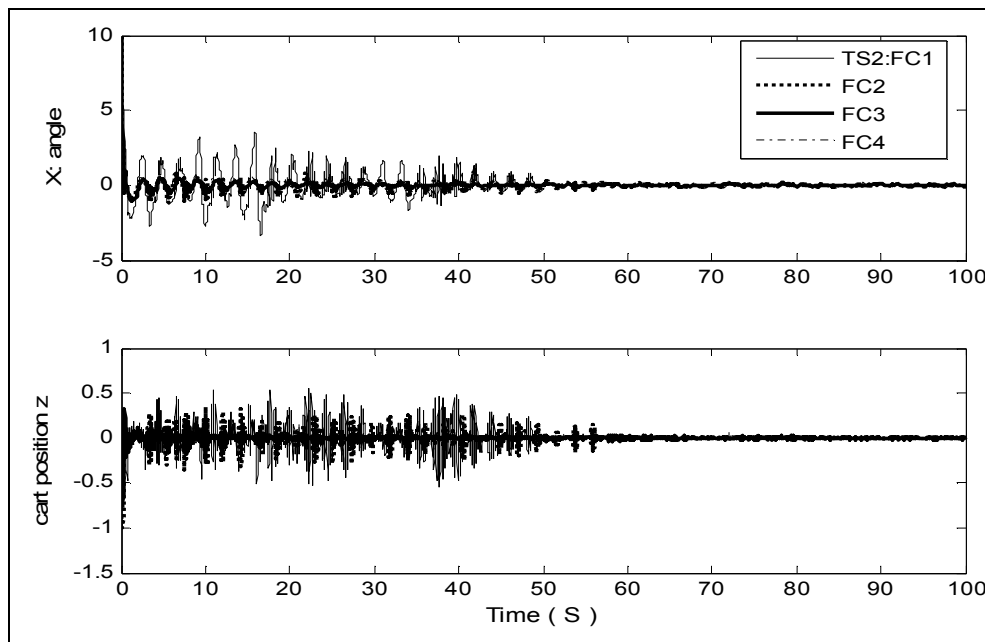


Рис. 23. Движение маятника и каретки под управлением четырех нечетких регуляторов (в типичной ситуации 2)

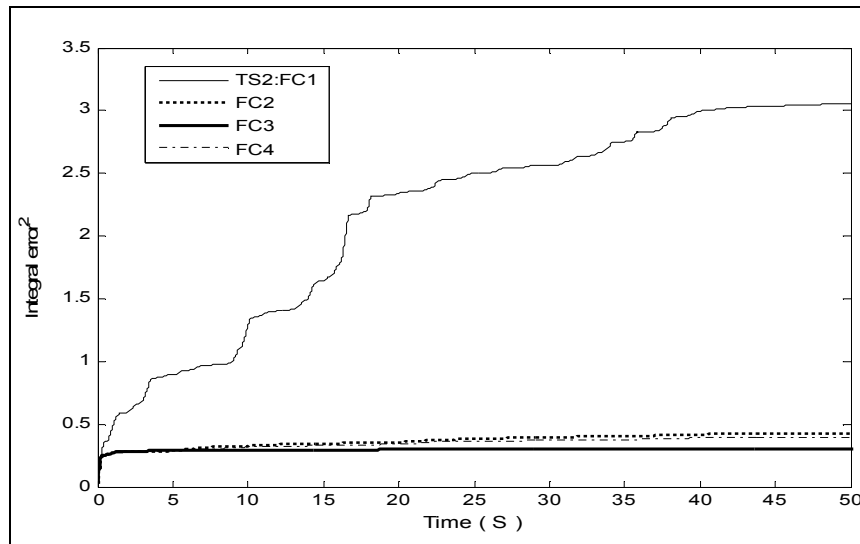


Рис. 24. Интегральная квадратичная ошибка управления (типовая ситуация 2)

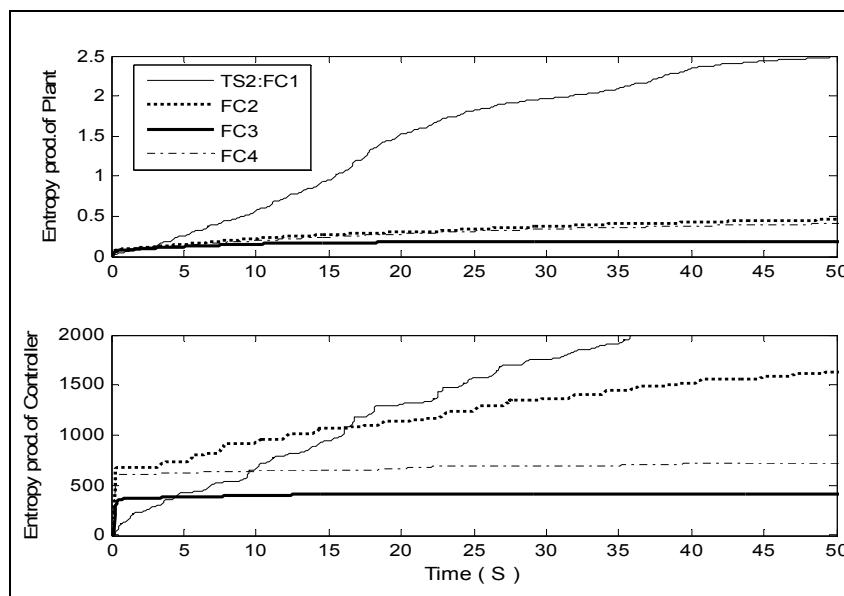


Рис. 25. Производство энтропии в ОУ и системе управления (типовая ситуация 2)

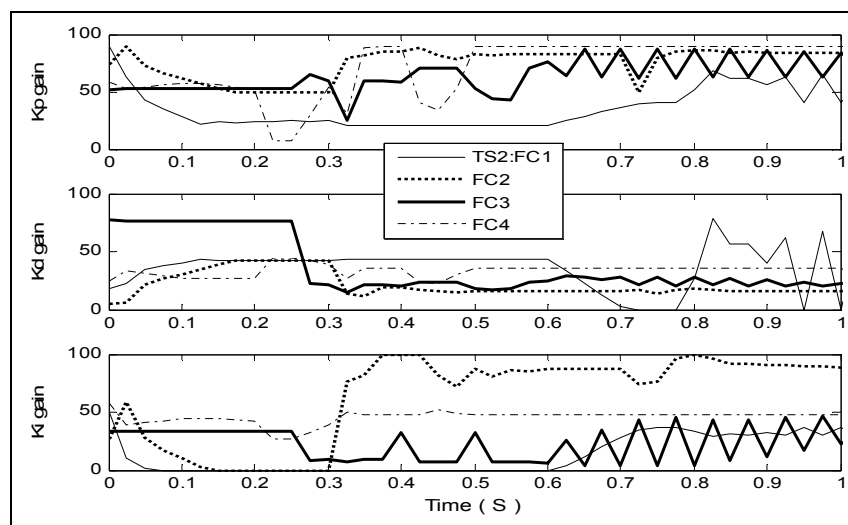


Рис. 26. Законы управления (типовая ситуация 2)

Вывод. В типовой ситуации 2 все регуляторы справляются с поставленной задачей управления перевернутым маятником (маятник не падает). С точки зрения критериев *минимума ошибки управления и минимума производства обобщенной энтропии* нечеткий регулятор НР3 – оптимальный.

Типовая ситуация 3. На рис. 27 – 29 показано динамическое поведение ОУ под управлением четырех НР в типовой ситуации 3.

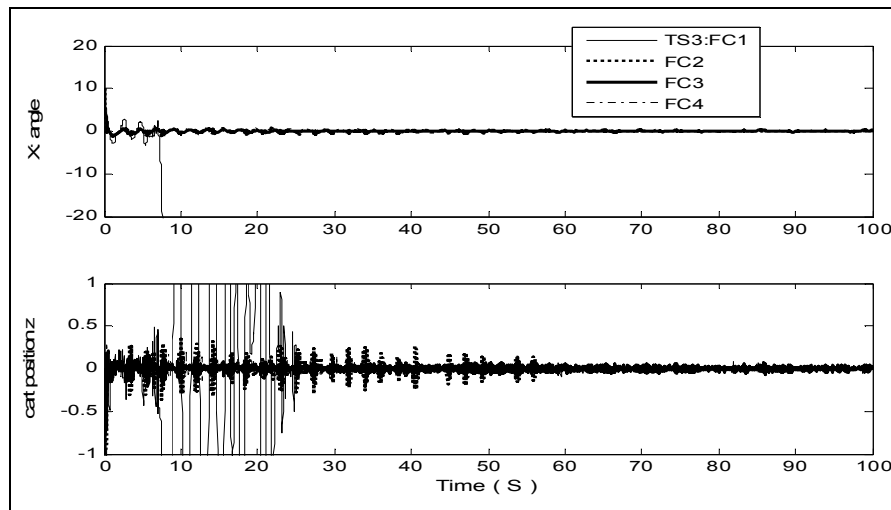


Рис. 27. Движение маятника и каретки под управлением четырех нечетких регуляторов (в типовой ситуации 3)

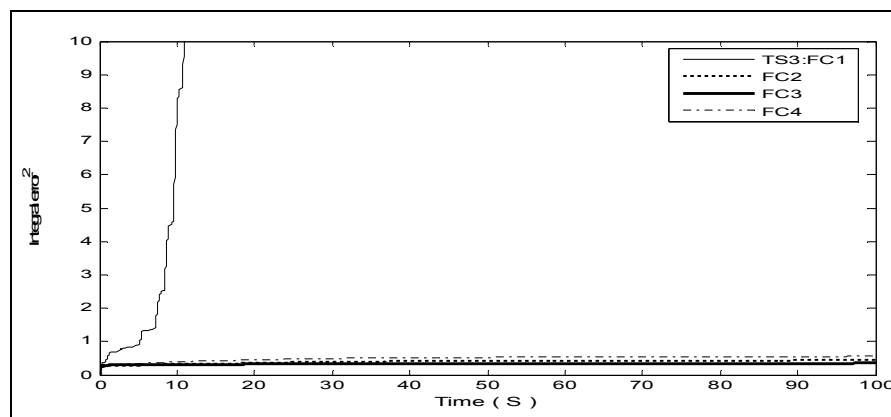


Рис. 28. Интегральная квадратичная ошибка управления (типичная ситуация 3)

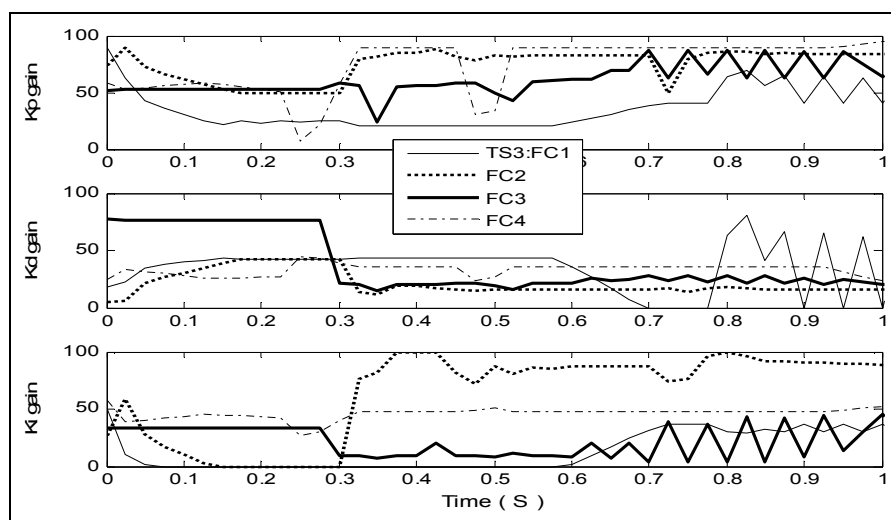


Рис. 29. Законы управления (типичная ситуация 3)

Вывод. В типовой ситуации 3 нечеткий регулятор НР1 не робастный - не справляется с поставленной задачей управления перевернутым маятником, так как маятник падает. Остальные НР2,3,4 – робастны. С точки зрения критерия «минимума интегральной ошибки управления» НР3 – оптимальный.

Типовая ситуация 4. На рис. 30 – 32 показано динамическое поведение ОУ под управлением четырех НР в типовой ситуации 4.

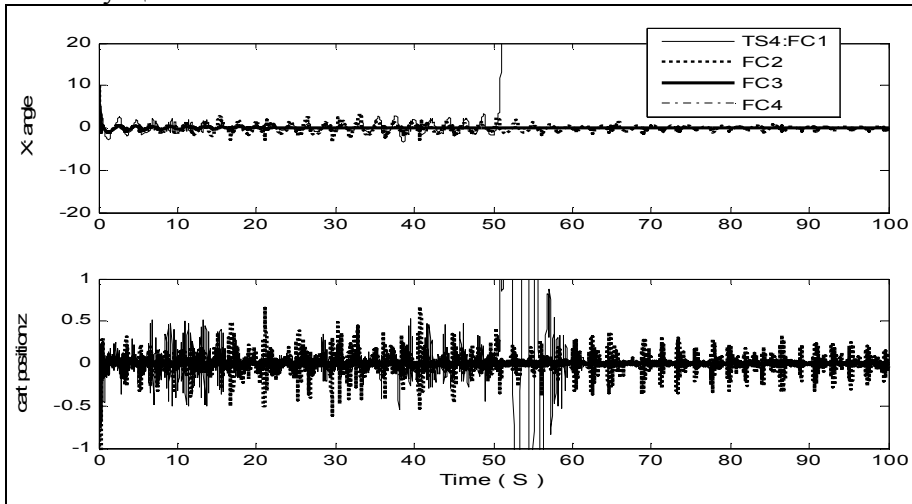


Рис. 30. Движение маятника и каретки под управлением четырех нечетких регуляторов (в типовой ситуации 4)

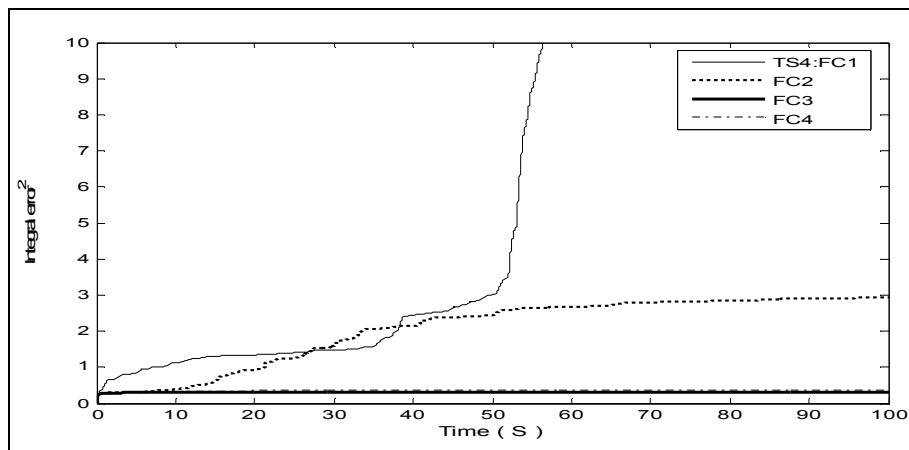


Рис. 31. Интегральная квадратичная ошибка управления (типичная ситуация 4)

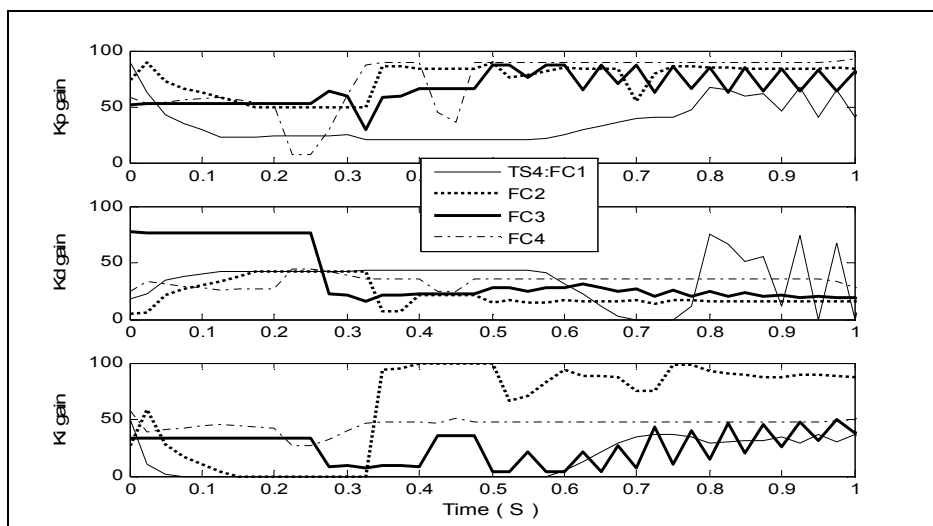


Рис. 32. Законы управления (типичная ситуация 4)

Вывод. В типовой ситуации 4 нечеткий регулятор НР1 не робастный - не справляется с поставленной задачей управления перевернутым маятником, так как маятник падает. Остальные НР2,3,4 – робастны. С точки зрения критерия «минимума интегральной ошибки управления» НР3 и НР4 – оптимальные.

3.2.2. Исследование робастности построенных четырех НР

Приведем результаты исследования ситуации управления, схематично показанной на рис. 33:



Рис. 33. Схема исследования робастности спроектированных НР

Для этого выберем ситуации управления отличные от четырех типовых указанных выше. Смоделируем три нетиповых ситуации, как показано в Таблице 1.

Таблица 1

<p>S1 ситуация Новый Рэлеевский шум (рис. 34) <i>Шум в системе измерения</i> (Гауссовский с амплитудой = 0.01); <i>Новая временная задержка</i> = 0.003сек; Типовые параметры модели и начальное положение</p>	<p>S2 ситуация Новый Рэлеевский шум (рис. 34) <i>Шум в системе измерения</i> (Гауссовский с амплитудой = 0.01); <i>Новая временная задержка</i> = 0.002 сек; Новое значение параметра $a_1 = 0.08$; Типовое начальное положение</p>
<p>S3 ситуация Распределенный шум: (рис. 35) <i>Шум в системе измерения</i> (Гауссовский с амплитудой = 0.01); <i>Новая временная задержка</i> = 0.005 сек; Типовые параметры модели и начальное положение</p>	

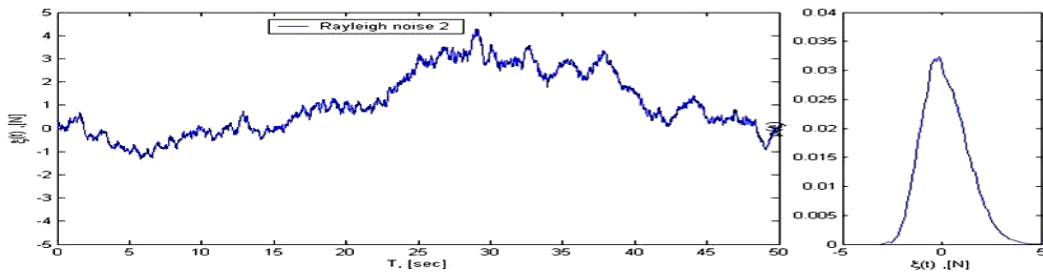


Рис. 34. Новый Рэлеевский шум

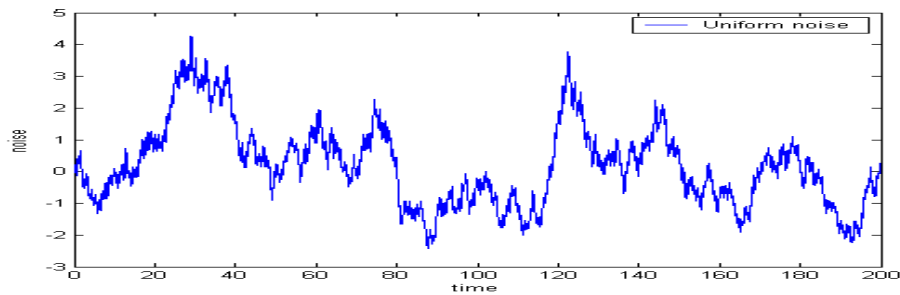


Рис. 35. Равномерно распределенный шум

А. Сравнение движения перевернутого маятника в новых ситуациях для четырех построенных нечетких регуляторов. На рис. 36 (и далее) показаны результаты сравнения движения маятника под управлением четырех нечетких регуляторов (баз знаний).

Примечание. На рисунках использованы следующие обозначения: «pole motion» – движение маятника, «integral control error» – интегральная ошибка управления, FC1 – НР1, FC2 – НР2, FC3 – НР3, FC4 – НР4.

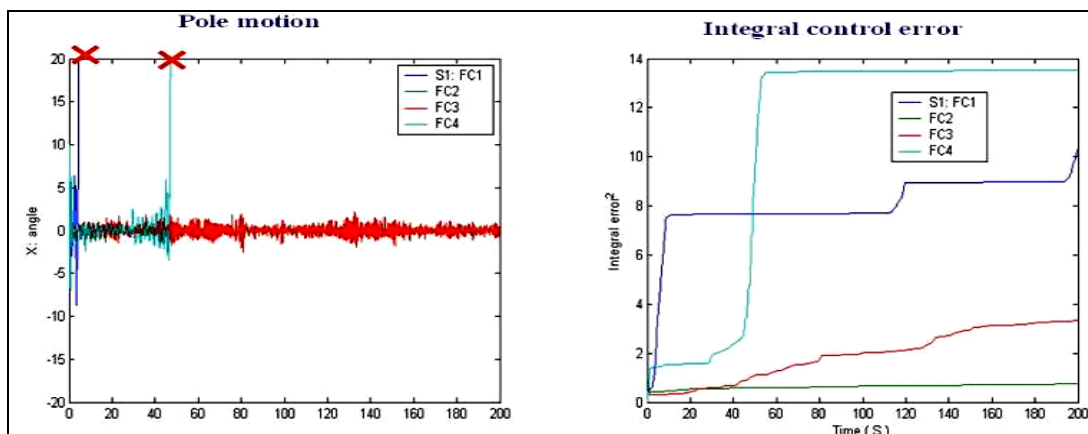


Рис. 36. Движение перевернутого маятника в ситуации S1 для четырех нечетких регуляторов

Вывод. Нечеткие регуляторы НР1 и НР 4 – не робастны в S1 ситуации, так как маятник падает при их управлении.

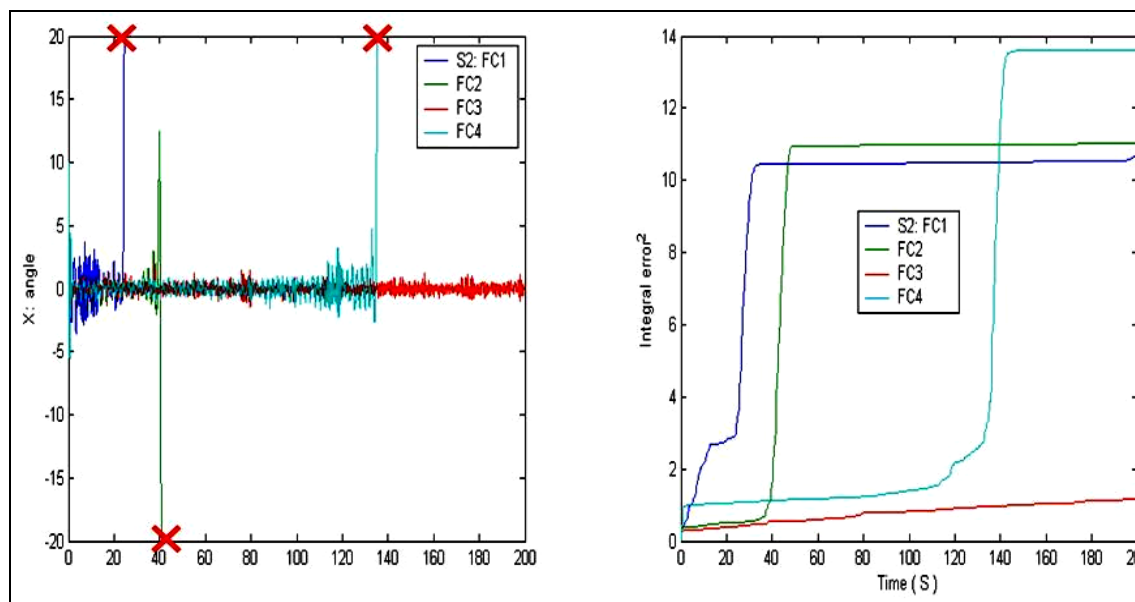


Рис. 37. Движение перевернутого маятника в ситуации S2 для четырех нечетких регуляторов

Вывод. НР1, НР2 и НР 4 не робастны в S2 ситуации.

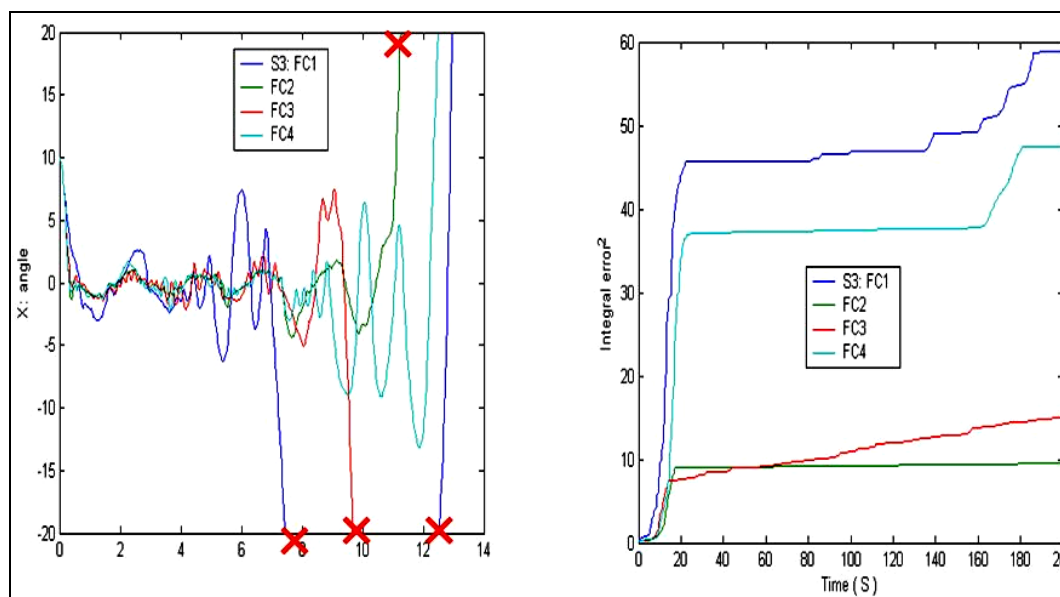


Рис. 38. Движение перевернутого маятника в ситуации S3 для четырех нечетких регуляторов

Вывод. Все регуляторы не робастны в S3 ситуации.

Результаты моделирования показывают границы робастности нечетких регуляторов, построенных на основе инструментария на мягких вычислениях. Видно что, факторами, влияющими на робастность нечетких регуляторов, построенных в типовых обучающих условиях, являются:

- изменение параметров внешнего шума;
- появление шумов в сенсорной системе (погрешности в системе измерения);
- изменение времени задержки в сенсорной системе (отказ в системе измерения);
- смена параметров модели (в результате, например, старения).

Заключение

Полученные результаты позволили продемонстрировать эффективность нечетких регуляторов как в типовых ситуациях управления, так и в широком классе нетиповых ситуаций. Для успешного управления в сложных непредсказуемых ситуациях типа S3 ситуации требуется еще один этап в технологии проектирования ИСУ, а именно применение квантовых алгоритмов самоорганизации баз знаний. Разработанная технология проектирования робастных ИСУ представляет собой новое направление в теории и систем управления. Разработанная программная поддержка реализации интеллектуальных вычислений открывает новые возможности инженерной практики эффективного применения технологии мягких вычислений в проектировании ИСУ. В процессе проектирования законы управления имеют минимальную алгоритмическую сложность и при физической реализации обладают минимальными потерями полезного ресурса (минимум производства обобщенной энтропии в системе «ОУ + самоорганизующийся интеллектуальный регулятор») для различных классов ситуаций управления.

Список литературы

1. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. – М.: ВНИИГеосистем, 2011.
2. Добрынин В.Н., Решетников Г.П., Сахаров Ю.С., Ульянов С.В. Технологии квантовых и мягких вычислений в процессах проектирования интеллектуальных систем управления // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №2. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/16>. – 0421000111\0010.
3. Литвинцева Л.В., Тятюшкина О.Ю., Григорьев П.Н., Ульянов С.В. Оптимизатор баз знаний на основе мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №2. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/16>. – 0421000111\0012.
4. Ульянов С.В., Тятюшкина О.Ю., Григорьев П.Н., Резникова Н.В. Применение оптимизатора баз знаний на основе мягких вычислений в интеллектуальном робастном управлении // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №2. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/16>. – 0421000111\0017.
5. Ульянов С. В., Добрынин В. Н., Мишин А. А., Тятюшкина О. Ю., Резникова Н. В. Информационная технология проектирования робастных баз знаний нечетких регуляторов. Ч. 1. Применение мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/17>. – 0421000111\0027.
6. Ульянов С. В., Добрынин В. Н., Нефедов Н. Ю., Петров С. П., Полунин А. С., Решетников А. Г. Генетические и квантовые алгоритмы. Ч. 1. Инновационные модели в обучении // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/17>. – 0421000111\0030.
7. Мишин А. А., Нефедов Н. Ю., Петров С. П., Полунин А. С., Литвинцева Л. В. Методы построения баз знаний для управления нелинейными динамическими системами // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2011. – №2. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/20>. – 0421100111\0008.