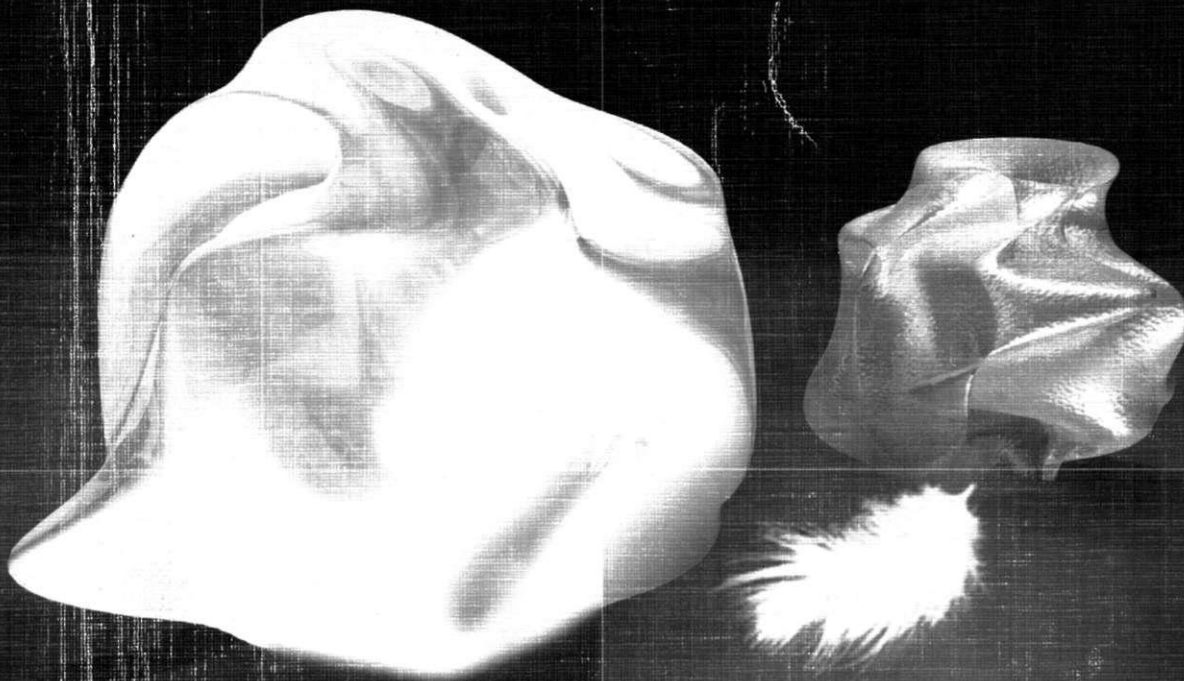


Том 3, № 2, Июнь 2008

ISSN 1819-4362

# НЕЧЕТКИЕ СИСТЕМЫ И МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ



Научный журнал Российской ассоциации  
нечетких систем и мягких вычислений

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАТОРА БАЗ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Литвинцева Л.В., Сорокин С.В., Ульянов С.В.

Тверской госуниверситет, Тверь

ООО «МКГ Квант», Москва

---

*Поступила в редакцию 15.03.2008, после переработки 27.03.2008.*

---

Эффективность процессов управления демонстрируется на конкретных типовых примерах моделей динамических объектов управления (ОУ) в условиях неполноты информации о параметрах структуры ОУ и при наличии непредвиденных (внештатных) ситуаций управления с применением оптимизатора баз знаний (ОБЗ) на мягких вычислениях. Показано, что использование ОБЗ в ситуации обучения и в непредвиденных ситуациях управления приводит к повышению уровня робастности структуры интеллектуальных систем управления (ИСУ).

Effective control processes are demonstrated using Benchmarks of control object (CO) models in uncertainty of information about structure parameters and unpredicted control situations based on soft computing knowledge base optimizer (KBO). It is demonstrated that the using of KBO in learning situations and unpredicted control situations increasing robustness levels of intelligent control systems (ICS).

**Ключевые слова:** оптимизатор баз знаний, робастность, интеллектуальные системы управления, мягкие вычисления.

**Keywords:** knowledge base optimizer, robustness, intelligent control systems, soft computing.

### Введение

Одним из важных элементов наукоёмкой информационной технологии проектирования интеллектуальных систем управления (ИСУ) является разработка методологии и соответствующей программно-аппаратной поддержки построения робастных баз знаний устойчивых к различным внешним и внутренним, случайным возмущениям как на объект управления (ОУ), так и в каналах измерений или контурах управления. Актуальность решения данной проблемы многократно диктовалась практическими задачами управления и отмечалась неоднократно многими исследователями [1 - 3].

Увеличение сложности структур ОУ и трудности прогнозирования непредвиденных (внештатных) ситуаций управления только усиливают актуальность данной проблемы и внимание к поиску её решения. Такого рода задачи относятся к проблеме «System of Systems Engineering», изучающей в общем виде сложные

структуры САУ с различными уровнями и шкалами интеграции и/или приоритетным обменом информацией между подсистемами с целью установления глобальных (необходимых и достаточных) условий надёжного автономного функционирования ОУ во внешней среде.

Основные положения и стратегия технологии проектирования робастных БЗ для ИСУ разработаны в [4 - 6]. Основное внимание в данной статье сконцентрировано на описании применения разработанной технологии проектирования и конкретных результатов проектирования БЗ и моделирования ИСУ сложными, существенно-нелинейными ОУ в общем случае со случайно изменяющейся структурой и изменяющимися задающими сигналами (целями управления).

## 1. Система стохастического нечёткого моделирования робастных ИСУ

Нечёткое моделирование робастных БЗ на основе ОБЗ основано на процессе извлечения ценной информации путем моделирования и исследования индивидуальных (статистически представительных) информативных траекторий, описывающих динамическое поведение ОУ и традиционного ПИД-регулятора при воздействии на них случайных процессов. В рамках корреляционной теории различные по своей статистической природе случайные процессы (т.е. имеющие различные функции плотности распределения вероятности) могут быть неразличимыми по своим корреляционным свойствам. Полной статистической характеристикой случайных процессов является функция плотности распределения вероятностей. Поэтому выходной процесс формирующего фильтра, моделирующий внешнюю среду, должен быть представительной (информативно значимой) выборочной траекторией случайного процесса, позволяющий исследовать индивидуальные траектории динамических нечётких систем. Этому требованию удовлетворяют выборочные траектории случайных процессов, если известна их функция плотности распределения вероятностей. Моделирование случайных процессов с требуемой функцией плотности распределения вероятностей осуществляется методом нелинейных формирующих фильтров. В данном разделе используется методология проектирования структур ИСУ, функционирующих во внешней среде, при наличии случайных процессов, имеющих одинаковую автокорреляционную функцию и различные функции распределения плотности вероятностей. Метод нелинейных формирующих фильтров для описания случайных процессов с требуемой функцией плотности распределения вероятностей на основе уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова описан в [6,7]. Такой подход позволяет разработать обобщённую методологию исследования робастности ИСУ на основе стохастического нечёткого моделирования.

На рис. 1 приведена обобщённая структура системы стохастического нечёткого моделирования, которая использовалась для оценки робастности и предельных возможностей структур ИСУ с нечеткими моделями управления (НР) с указанием основных факторов (задающий сигнал, время задержки в канале измерения состояния ОУ, внешние и внутренние стохастические шумы), влияющих на чувствительность и надёжность точности управления.

Эффективность применения ОБЗ демонстрируется на конкретных типовых примерах (т.н. "Benchmarks") моделей ОУ. В частности, исследуемые модели физических ОУ имеют следующие (типичные для реальных динамических ОУ) особенности: (1) по части обобщённых координат обладают локальной и глобальной

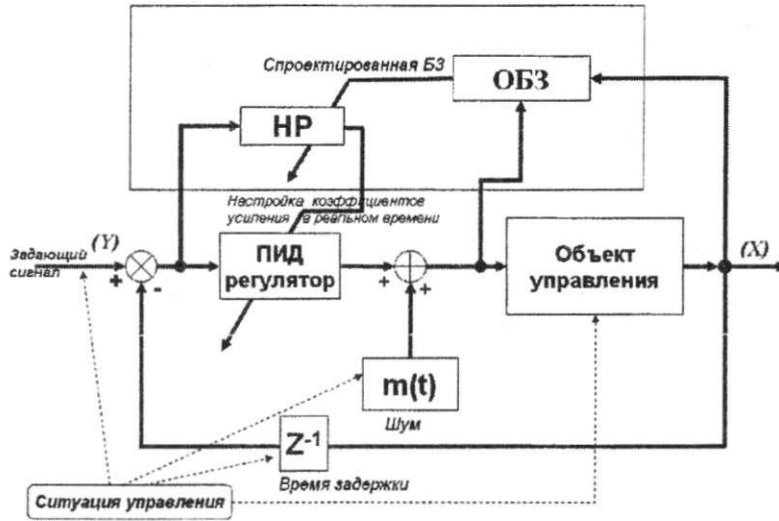


Рис. 1: Обобщённая система стохастического нечёткого моделирования.

динамической неустойчивостью; (2) по обобщённым динамическим координатам имеют существенно нелинейные перекрёстные связи (стохастические нелинейности), которые взаимно (антагонистично) влияют на динамику, устойчивость и управляемость ОУ; и (3) работают в непредвиденных ситуациях управления.

Для моделирования непредвиденных ситуаций управления рассматриваются четыре фактора: (1) внешние шумы, действующие на ОУ (в виде выборочных траекторий случайных процессов с зависящими от времени функциями плотности распределения вероятностей); (2) внутренние шумы в контуре измерения состояний ОУ (также в виде выборочных траекторий случайных процессов); (3) изменения параметров или структуры ОУ; (4) наличие случайного времени задержки в контурах управления и измерительной системы; и (5) изменение целей управления (задающего сигнала).

Моделирование разработанной ИСУ и ОУ осуществлялось в системе Matlab/Simulink версии 6.5, как показано на рис. 2.

В качестве типовых случайных шумов были смоделированы три типа случайных процессов с соответствующими функциями плотности распределения вероятностей. Вид функций плотности распределения вероятностей и результаты моделирования выходных случайных процессов от соответствующих формирующих фильтров показаны на рис. 3. Варьируя структурой формирующих фильтров, параметрами в моделях ОУ, временем задержки в канале измерения ошибки управления, видом задающего сигнала (цель управления), можно моделировать непредвиденные ситуации управления, оценить чувствительность и спроектированный уровень робастности разработанной ИСУ.

Ниже в разделе 2 приводятся результаты моделирования робастных законов управления для интеллектуальных нечетких ПИД-регуляторов сложными, существенно нелинейными динамическими ОУ.

Демонстрация возможностей моделирования процессов интеллектуального управления динамическими ОУ рассматривается на основе результатов модели-

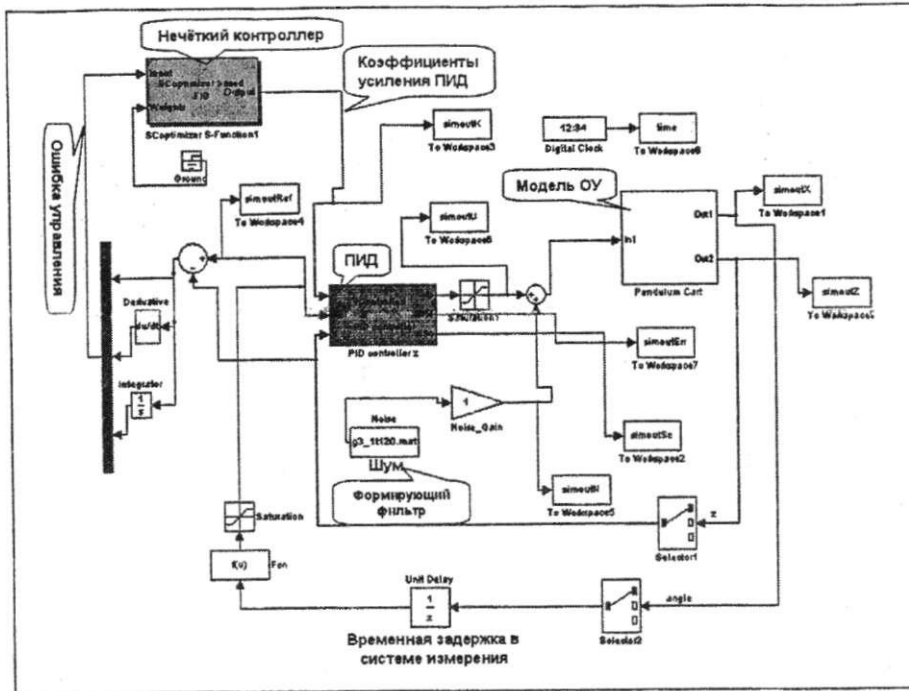


Рис. 2: Матлаб Симулинк модель системы управления на основе НР-ПИД контроллера.

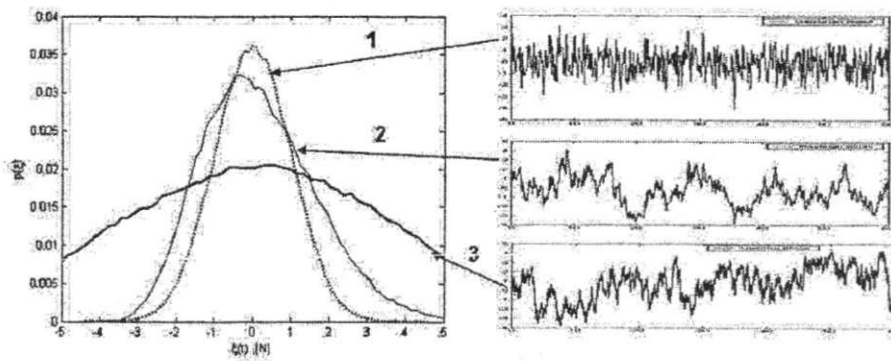


Рис. 3: Вид функций плотности распределения вероятностей и результаты моделирования выходных случайных процессов: (1) – Гауссовский случайный процесс; (2) – Релеевский случайный процесс; (3) – равномерно распределённый случайный процесс.

рования динамического поведения следующих двух типовых ОУ (Benchmarks): (1) нелинейный осциллятор с существенной диссипацией и локальной динамической неустойчивостью; и (2) маятник с переменной длиной, обладающий глобальной динамической неустойчивостью. Данные осцилляторы представляют собой самостоятельный интерес для задач робототехники и нелинейной статистической механики.

**2. Примеры**

Эффективность процессов управления с применением ОБЗ демонстрируется на конкретных типовых примерах (т.н. “Benchmarks”) моделей динамических ОУ в условиях неполноты информации о параметрах структуры ОУ и при наличии непредвиденных (внештатных) ситуаций управления. Приведены примеры промышленного применения робастных ИСУ в реальных ОУ, спроектированных на основе ОБЗ в [4 - 6]. Даны практические рекомендации повышения уровня робастности ИСУ за счёт использования новых видов вычислений и имитационного моделирования.

*2.1 Нелинейный осциллятор с существенной диссипацией и локальной неустойчивостью*

Уравнения динамического движения ОУ и формирование управляющей силы рассматриваются совместно с термодинамическими условиями в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + [2\beta + a\dot{x}^2 + k_1x^2 - 1] \dot{x} + kx &= \xi(t) + u(t); \\ \frac{dS_x}{dt} &= [2\beta + a\dot{x}^2 + k_1x^2 - 1] \dot{x} \cdot \dot{x}, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\xi(t)$  описывает случайные возмущения на ОУ с заданной функцией плотности распределения вероятностей;  $u(t)$  описывает искомую оптимальную силу управления; и  $S_x$  представляет производство энтропии в ОУ.

**Примечание.** Физической (реологической) моделью ОУ, описанной уравнениями (1), является механическая часть подвески движущегося объекта (автомобиля, мотоцикла, вагона и т.п.) с повышенной нелинейной диссипацией для повышения эффекта гашения (компенсации) колебаний движущегося объекта и описывается обобщённым уравнением типа Дуффинга-Ван дер Поля (Халмоша - Рендэра) [8 - 11].

При условии  $2\beta + a\dot{x}^2 + k_1x^2 \leq 1$ , система обладает локальной неустойчивостью и скорость производства энтропии отрицательна, т.е.,  $\frac{dS_x}{dt} \leq 0$ .

На рис. 4 показано свободное движение ОУ со следующими параметрами ОУ  $\beta = 0.5; \alpha = 0.3; k_1 = 0.2; k = 5$  и начальными условиями  $[x_0] [\dot{x}_0] = [2.5] [0.1]$ .

Как видно из результатов моделирования на рис. 4 динамическая система (1) обладает на фазовом портрете областью притяжения (странным аттрактором).

**Примечание.** Отметим особенность условий управления ОУ типа (1): при малых колебаниях система (1) является локально неустойчивой, что создаёт трудности управлением данной системой при задающем сигнале (цели управления) типа  $x = 0$  и наличии малых случайных возмущений.

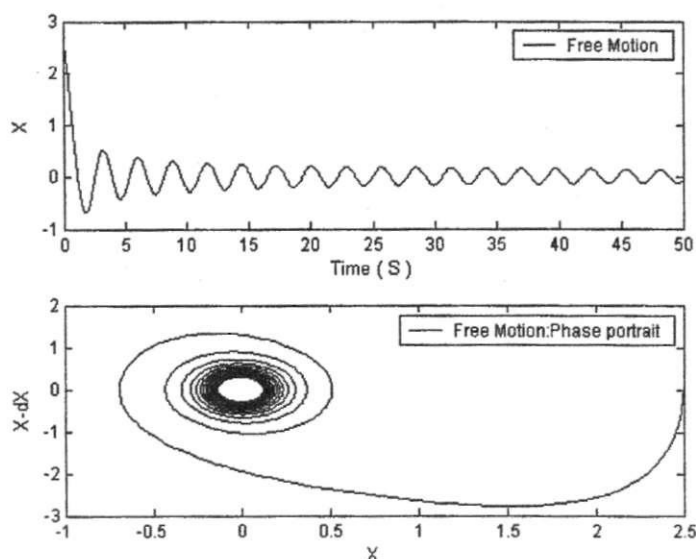


Рис. 4: Свободное движение и фазовый портрет ОУ.

Рассмотрим следующую задачу управления:

(1) перевести заданный ОУ из начального состояния  $[x_0] [\dot{x}_0] = [2.5] [0.1]$  в конечное состояние (задающий сигнал (З.С.) = 0) при различных внешних шумах, действующих на ОУ, при наличии времени задержки в канале измерения ошибки управления, изменений параметров модели ОУ; и (2) провести оценку робастности спроектированного НР и сравнить с традиционным ПИД-регулятором.

Рассмотрим две ситуации обучения (с разными внешними стохастическими шумами) и для каждой из них построим соответствующие нечеткие регуляторы (названные FC0 и FC1).

*Проектирование БЗ НР – FC0.* В качестве исходных параметров заданного ОУ рассмотрим  $\beta = 0.1; \alpha = 0.3; k_1 = 0.2; k = 5$ , а начальные условия примем равными  $[x_0] [\dot{x}_0] = [2.5] [0.1]$ ; задающий сигнал  $x_{ref} = 0$ ; область изменения коэффициентов усиления находится в интервале  $[0, 50]$ ; внешнее возмущение рассмотрим как случайное воздействие с *Рэлеевским законом* распределения вероятностей (см. рис. 3, позиция 2).

Введем также ограничение на допустимую силу управления в виде  $|u| \leq 20[N]$  и время задержки сигнала в канале измерения 0,001 сек. (см. рис. 1 и 2). Данную ситуацию управления обозначим *TS0*.

*Проектирование БЗ НР – FC1.* Исходные параметры заданного ОУ, начальные условия, задающий сигнал, область изменения коэффициентов усиления, ограничение на допустимую силу управления и время задержки сигнала в канале измерения примем такими же, как и в случае FC0, однако внешнее возмущение рассмотрим в виде случайного воздействия с *Гауссовским законом* распределения вероятностей (см. рис. 3, позиция 1). Данную ситуацию управления обозначим *TS1*.

Используя инструментарий ОБЗ и “обучающий сигнал (ОС)”, полученный с помощью стохастического моделирования с использованием ГА [1,4-6], для заданных ситуаций обучения были спроектированы базы знаний БЗ0 (КВ0) для НР0 (FC0) и БЗ1 (КВ1) для НР1 (FC1) при Рэлеевском и Гауссовском шумах соответственно, которые оптимально аппроксимировали ОС (с точки зрения принятой функции пригодности и выбранной ситуации управления). Для моделирования ситуации управления заданным ОУ были приняты следующие параметры: для времени управления  $C = 0.05$  сек и для времени интегрирования и определения состояния (движения) ОУ равным  $0.025$  сек.

На рис. 5 и 6 показано сравнение результатов моделирования поведения ОУ при управлении интеллектуальным ПИД-НР (FC0 и FC1, соответственно) и традиционным ПИД-регулятором, коэффициенты усиления которого были вычислены как средние значения от соответствующих законов управления в БЗ НР.

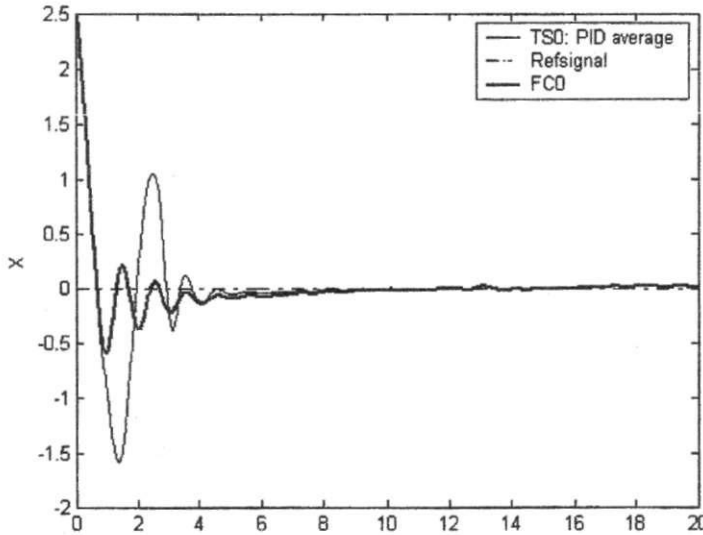


Рис. 5: Сравнение результатов моделирования поведения ОУ при управлении интеллектуальным ПИД-НР (FC0) и традиционным ПИД-регулятором (ситуация TS0).

В частности, для ситуаций TS0 и TS1 коэффициенты усиления ПИД-регулятора имели значения  $K = [35 \ 43 \ 7]$  и  $K = [33 \ 35 \ 15]$  соответственно. Как следует из результатов моделирования, НР в обеих ситуациях управления работают более эффективно по сравнению с традиционным ПИД-регулятором.

*Робастность НР в непредвиденных ситуациях управления.* Рассмотрим динамическое поведение ОУ в непредвиденных ситуациях управления. В Таблице 1 представлены новые ситуации управления и параметры моделирования.



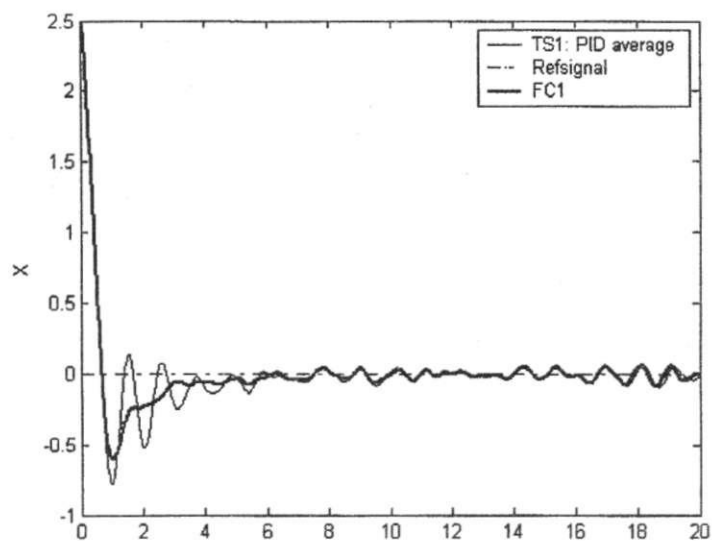


Рис. 6: Сравнение результатов моделирования поведения ОУ при управлении интеллектуальным ПИД-НР (FC1) и традиционным ПИД-регулятором (ситуация TS1).

Табл. 1: Параметры непредвиденных ситуаций управления.

Внешний шум	Задающий сигнал	Время задержки (сек)	Изменение структуры ОУ	Шум в канале измерения
Равномерный	0	0,0125	нет	Гауссовский с амплитудой 0,02
Равномерный	[- 1 1 0]	0,001	нет	Гауссовский с амплитудой 0,02
Равномерный	0	0,0125	случайное изменение параметров ОУ	Гауссовский с амплитудой 0,02

Будем называть в дальнейшем представленные в Таблице 1 ситуации управления как множество элементов  $\{S1, S2, S3\}$  (соответственно строкам таблицы).

*Примечание.* Физически ситуация  $S1$  описывает влияние на динамику ОУ нового вида внешнего шума, времени задержки и шума в канале измерения. Ситуация  $S2$  описывает изменение цели управления (изменяющийся во времени ступенчатый сигнал) и наличие шума в контуре измерения ошибки управления. В третьей ситуации управления  $S3$  оценивается влияние случайного изменения параметров структуры ОУ (Гауссовский параметрический шум в структуре ОУ).

В этом случае параметры модели ОУ вычислялись по следующей формуле:  $\beta = 0.1 + 0.2 \cdot \xi(t)$ ;  $\alpha = 0.3 + 0.5 \cdot \xi(t)$ ;  $k_1 = 0.2 + 0.5 \cdot \xi(t)$ ;  $k = 5 + 2 \cdot \xi(t)$ , где  $\xi(t)$ - Гауссовский шум с амплитудой 1. На рис. 7 представлены результаты моделирования динамического поведения ОУ для ситуации управления  $S1$ . На рис. 8 представлены вычисленные по результатам моделирования на рис. 7 законы управления коэффициентами усиления ПИД-НР (рис. 8,а), законы формирования результирующей управляющей силы (рис. 8,б) и термодинамические характеристики (производство энтропии) ОУ и регуляторов (рис. 8,в).

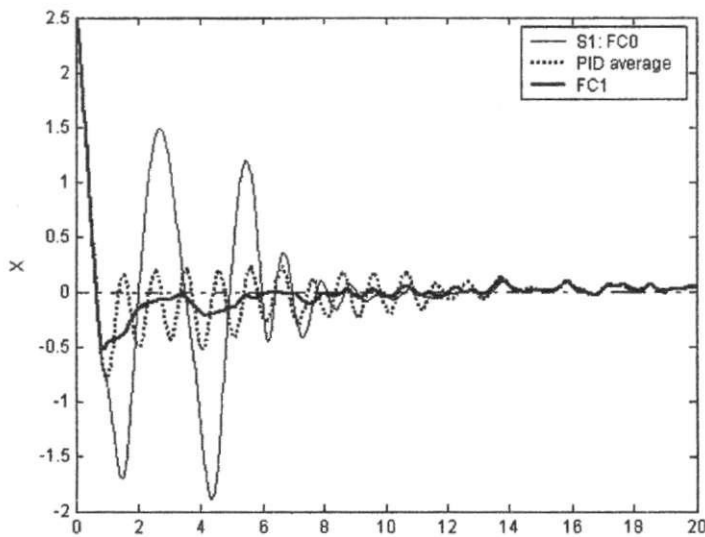


Рис. 7: Результаты моделирования динамического поведения ОУ для ситуации управления  $S1$ .

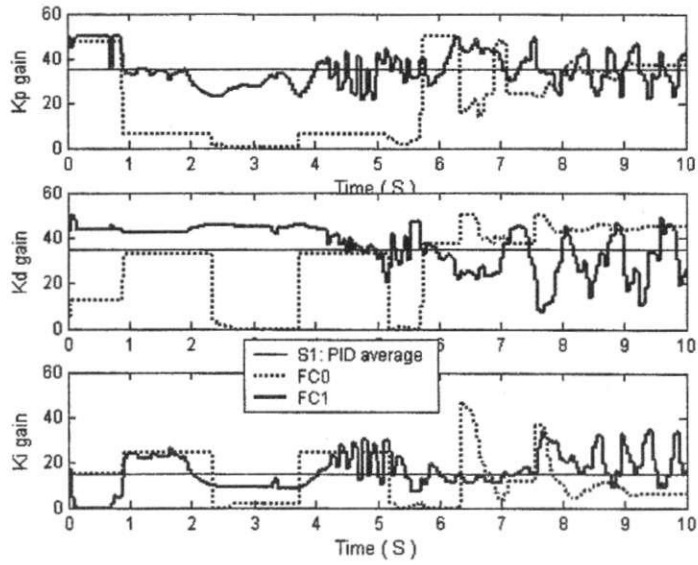


Рис. 8: (а) Вид законов управления коэффициентами усиления ПИД-НР в ситуации S1.

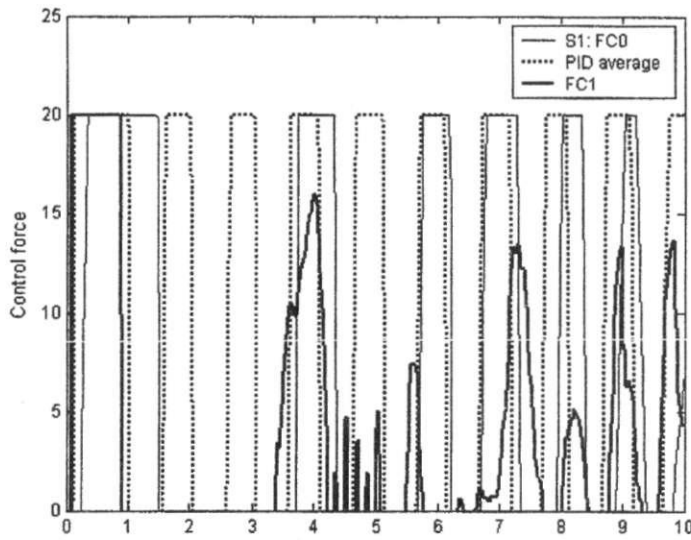


Рис. 8: (б) Вид законов формирования результирующей управляющей силы в ситуации S1.

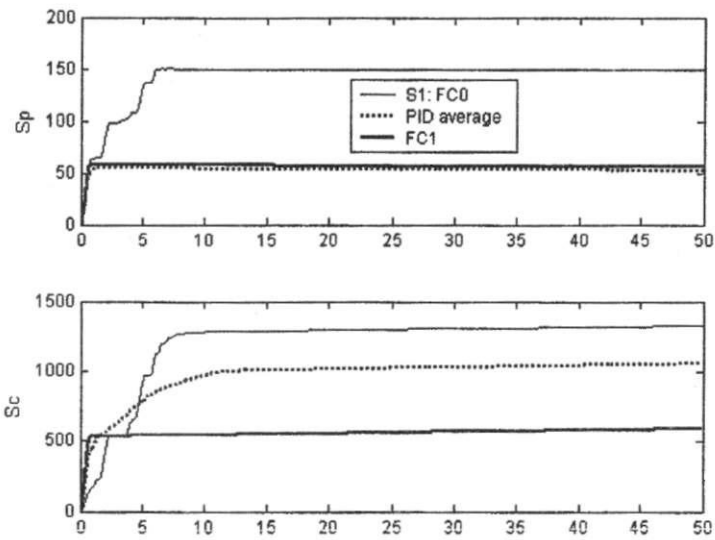


Рис. 8: (б) Вид термодинамических характеристик (производство энтропии) ОУ и регуляторов (рис. 8,а) в ситуации S1.

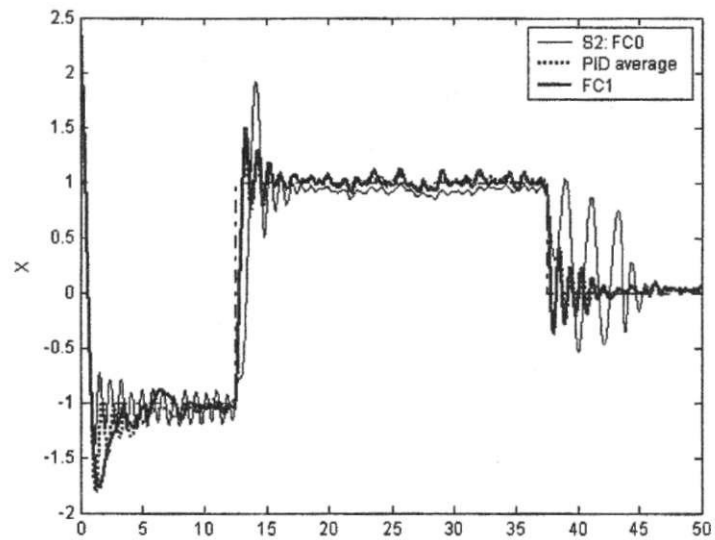


Рис. 9: Оценка робастности ИСУ для ситуаций управления S2.

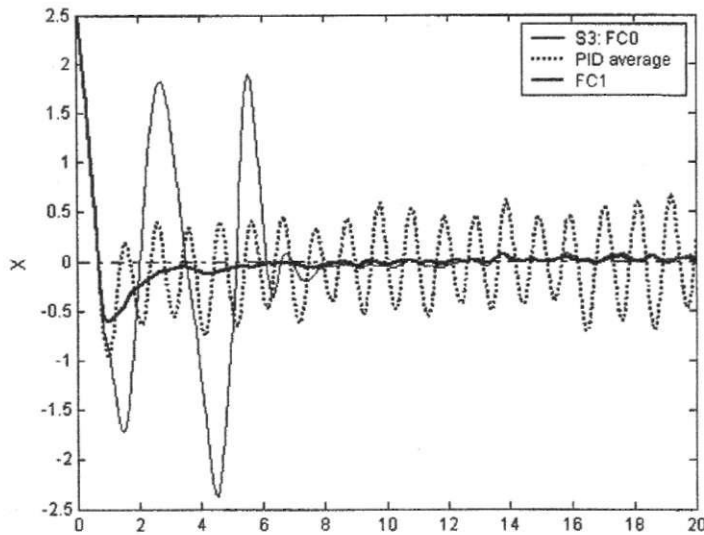


Рис. 10: Оценка робастности ИСУ для ситуаций управления S3.

На рис. 9 и 10 показана оценка робастности ИСУ для ситуаций управления S2 и S3 соответственно.

Анализ полученных результатов моделирования показывает достаточную робастность ИСУ при изменении вида ситуации управления. Случай с S3 ситуацией показывает, что НР (FC0), обученный на шум с *Рэлеевским законом* распределения вероятностей, обладает повышенной чувствительностью к изменению типа шума и параметров модели ОУ. Он менее робастен, чем НР (FC1), обученный на шум с *Гауссовским законом* распределения вероятностей. Традиционный ПИД-регулятор в ситуации S3 не робастен.

**Вывод.** Приведенный пример показал достаточную эффективность ИСУ в сравнении с традиционным ПИД-регулятором, но указывает также на необходимость исследования робастности ИСУ на примерах управления более сложными, глобально неустойчивыми динамическими ОУ.

## 2.2 ОУ «маятник с переменной длиной»

Движение маятника с переменной длиной (swing system), геометрическая модель которого показана на рис. 11, описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \left(2\frac{\dot{y}}{y} + \frac{c}{my^2}\right)\dot{x} + \frac{g}{y}\sin x &= u_1 + \xi_1(t), \\ \ddot{y} + 2k\dot{y} - y\dot{x}^2 - g\cos x &= \frac{1}{m}(u_2 + \xi_2(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\xi(t)$ - стохастическое воздействие и  $u_1, u_2$ - управляющие силы, действующие вдоль первой и второй обобщенных координат маятника.

Уравнения, описывающие термодинамические свойства (производство энтропии) в ОУ и ПИД-регуляторе, имеют следующий вид:

$$\frac{dS_x}{dt} = 2\frac{\dot{y}}{y}\dot{x} \cdot \dot{x}; \quad \frac{dS_y}{dt} = 2k\dot{y} \cdot \dot{y}, \quad \frac{dS_u}{dt} = k_d\dot{e}^2.$$

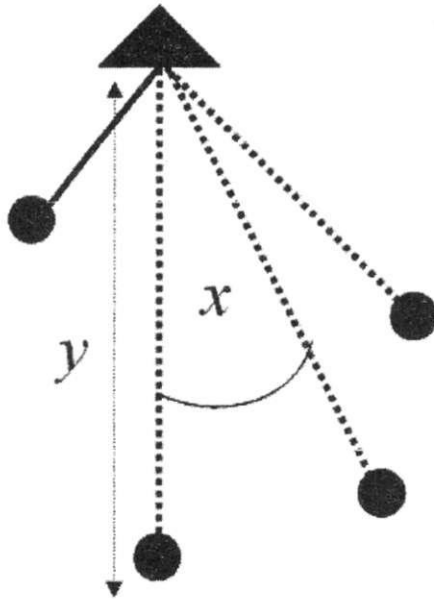


Рис. 11: Геометрическая модель ОУ.

На рис. 12 показано свободное движение ОУ со следующими параметрами:  $m = 0.5$ ,  $k = 0.4$ ,  $c = 2$  и начальными условиями:  $x_0 = 0.25$  [радиан],  $y_0 = 0.5$  [м];  $\dot{x}_0 = 0$  [радиан/сек],  $\dot{y}_0 = 0.01$  [м/сек].

Как видно из результатов моделирования свободного движения на рис. 12 динамическая система (2) обладает *глобальной динамической неустойчивостью* по оси (неограниченный рост длины маятника при отсутствии управляющей силы).

Рассмотрим следующую задачу управления для заданного ОУ.

*Задача управления:* При наличии стохастического шума, действующего на маятник, при наличии времени задержки сигнала в системе измерения положения маятника (равного 0.001 сек.) и при наличии ограничения на управляющую силу перевести маятник из начального положения в заданное целевое положение: по углу (задающий сигнал  $x = 0$ ) и по длине (задающий сигнал  $y = 2$ ).

Введем следующее ограничение на управляющую силу:  $|U| \leq 50(N)$ .

Рассмотрим ИСУ, содержащую два нечетких ПИД-регулятора, управляющих движением маятника, с использованием разработанного инструментария ОБЗ. Matlab/Simulink (версия 6.5) модель для разработанной ИСУ показана на рис. 13.

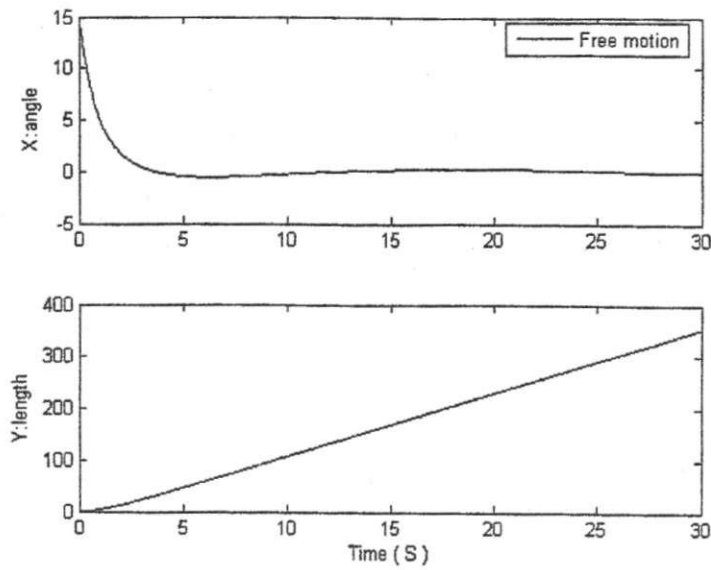


Рис. 12: Свободное движение OY.

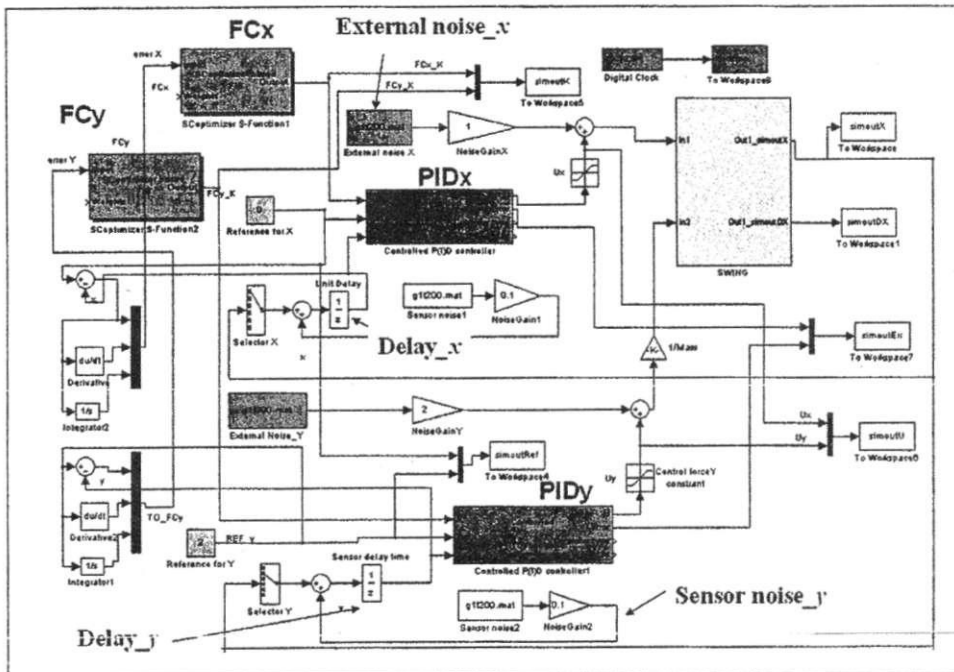


Рис. 13: Матлаб Симулинк модель системы управления на основе двух НР-ПИД контроллера.

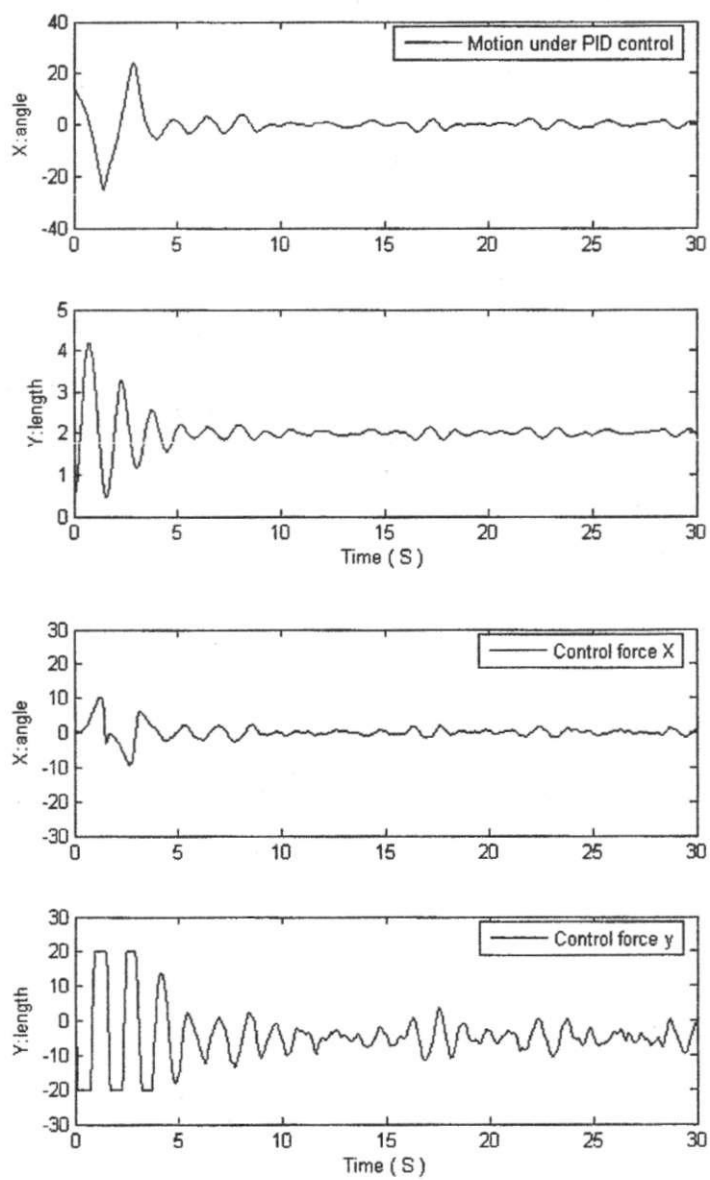


Рис. 14: Результаты моделирования управления ОУ на основе ПИД-регулятора.



На рис.14 показано моделирование движения и управления ОУ на основе ПИД-регулятора с коэффициентами усиления  $K = [10 \ 10 \ 10]$ .

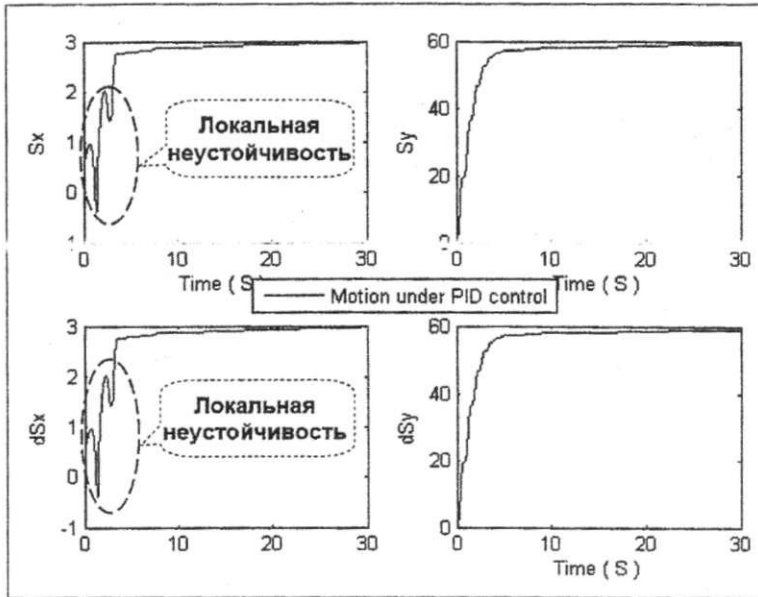


Рис. 15: Термодинамические свойства ОУ при управлении на основе ПИД-регулятора.

**Примечание.** На рис. 14 и 15 использованы следующие обозначения:  $x$  – pendulum angle – угол отклонения маятника;  $y$  – длина маятника; control force – управляющая сила;  $S_x, S_y$  – производство энтропии в ОУ;  $dS_x, dS_y$  – скорость производства энтропии в ОУ. Как видно из рис.15, маятник с переменной длиной является локально неустойчивой системой в термодинамическом смысле (так как существуют точки с отрицательной скоростью производства энтропии по оси  $x$ ).

На первом шаге разработки ИСУ построим базы знаний (БЗ) для двух НР в условиях заданной ситуации управления (т.н. обучающая ситуация), затем на следующем шаге проверим робастность полученных БЗ в новых (непредвиденных) ситуациях управления.

Рассмотрим проектирование БЗ в следующих обучающих условиях (назовем их TS1):

Внешние стохастические шумы, действующие вдоль обобщенных координат  $x$  и  $y$ : шум с Гауссовским законом распределения вероятностей ( $N_x$  и  $N_y$ ) (рис. 16). Время задержки сигналов в системе измерения положения маятника  $Dx = Dy = 0.001$  sec; задающий сигнал  $x = 0$  и задающий сигнал  $y = 2$ . Остальные параметры (модели и начальные положения) нами уже указаны выше.

Область изменения коэффициентов усиления находится в интервале  $[0, 10]$ ;

**Примечание.** Для моделирования ситуации управления заданным ОУ были приняты следующие параметры: для времени управления  $C = 0.025$  сек и для

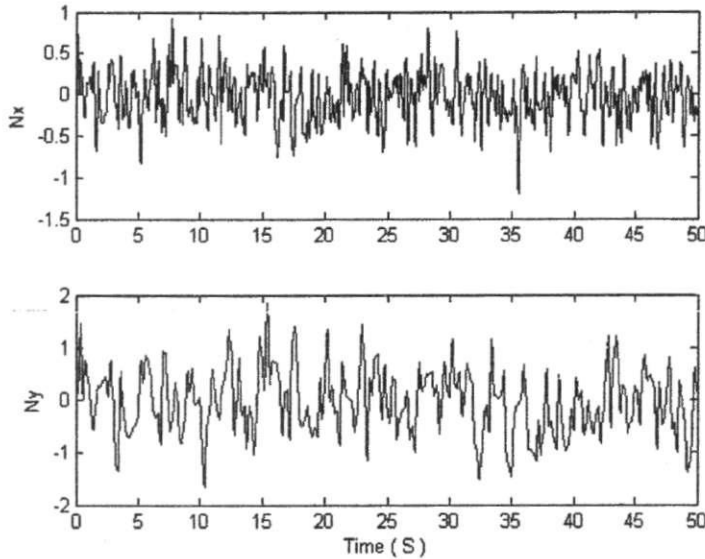


Рис. 15б: Внешние стохастические шумы, действующие на ОУ вдоль обобщенных координат  $x$  и  $y$ .

времени интегрирования и определения состояния (движения) ОУ равным 0.025 сек. Для построения ОС с помощью ГА была использована следующая функция пригодности:

$$FF = -w_1 \left( \sum_t e_x^2 + \sum_t e_y^2 \right) - w_2 \left( \sum_t \dot{e}_x^2 + \sum_t \dot{e}_y^2 \right),$$

где  $e_{x(y)}$  - ошибки управления вдоль осей  $x(y)$  соответственно,  $w_{1(2)}$  - некоторые коэффициенты шкалирования.

На рис. 16, 17, 18 и 19 показаны результаты моделирования движения системы в двух случаях управления: (1) с помощью НР, БЗ которого была построена с использованием разработанного ОБЗ; и (2) с помощью классического ПИД-регулятора с коэффициентами усиления  $K_x = [7.3 \ 8 \ 7]$ ;  $K_y = [8 \ 9 \ 5.7]$ , полученными усреднением коэффициентов усиления НР.

Как следует из результатов моделирования, НР в обучающей ситуации работает более эффективно по сравнению с традиционным ПИД-регулятором.

*Робастность НР в непредвиденных ситуациях управления.* Рассмотрим динамическое поведение ОУ в непредвиденных ситуациях управления.

В Таблице 2 представлены новые ситуации управления и параметры моделирования.

**Примечание.** В Таблицу 2 включены ситуации, показывающие факторы (смена задающих сигналов, сильные ограничения на силу управления и смена параметра модели), к которым НР и ПИД чувствительны с точки зрения робастности управления.

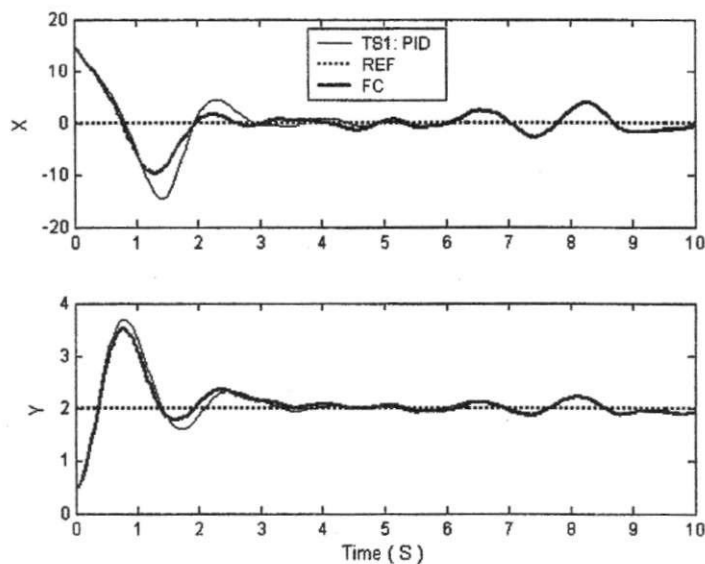


Рис. 16: Сравнение результатов моделирования управления ОУ с помощью НР (FC) и традиционного ПИД (PID)-регулятора.

Табл. 2: Параметры непредвиденных ситуаций управления.

Внешний шум	Задающие сигналы ( $x, y$ )	Время задержки (сек)	Изменение структуры ОУ	Новые ограничения на управляющую силу ( $U_x, U_y$ )
Рэлеевский	(0,2)	0,005	нет	Те же что TS1
Рэлеевский	$[\pi/4, 3]$	0,005	нет	(10,20)
Гауссовский	(0, 2)	0,001	изменение параметров модели ( $k, m, c$ ) = (0.4 0.5 -0.5)	Те же что TS1

Будем называть в дальнейшем представленные в Таблице 2 ситуации управления как  $\{N1, N1a, N2\}$  (соответственно строкам таблицы).

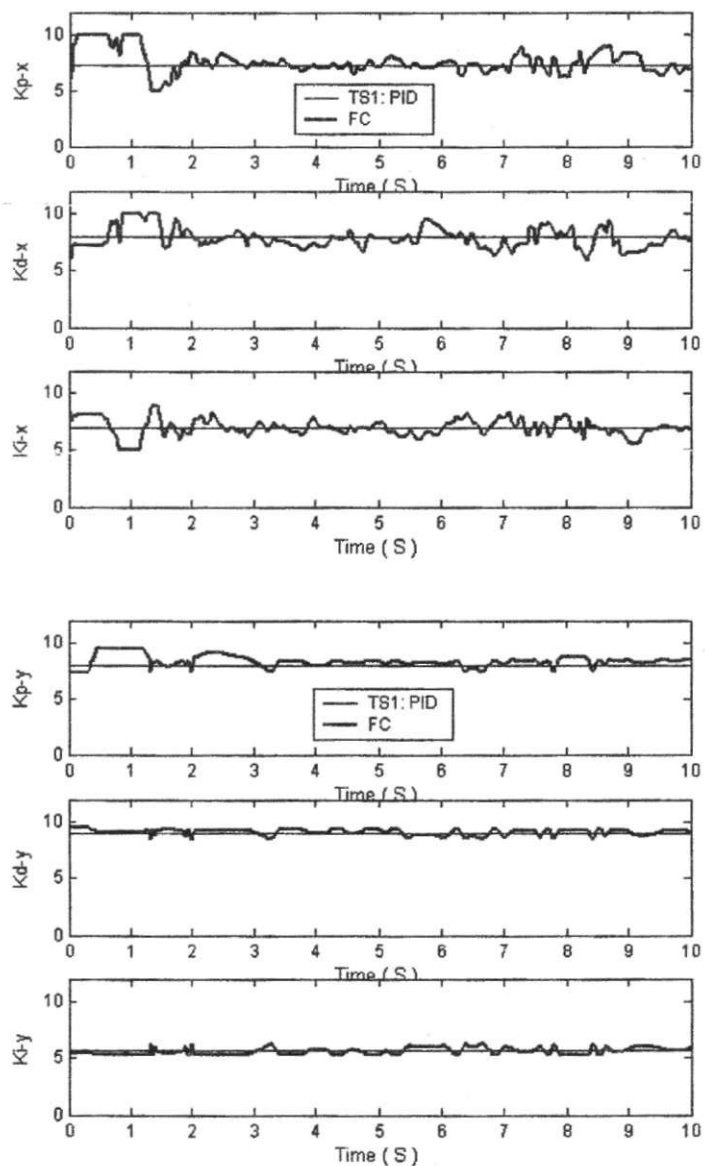


Рис. 17: Законы управления коэффициентами усиления нечёткого и усреднённого ПИД (PID)-регулятора.

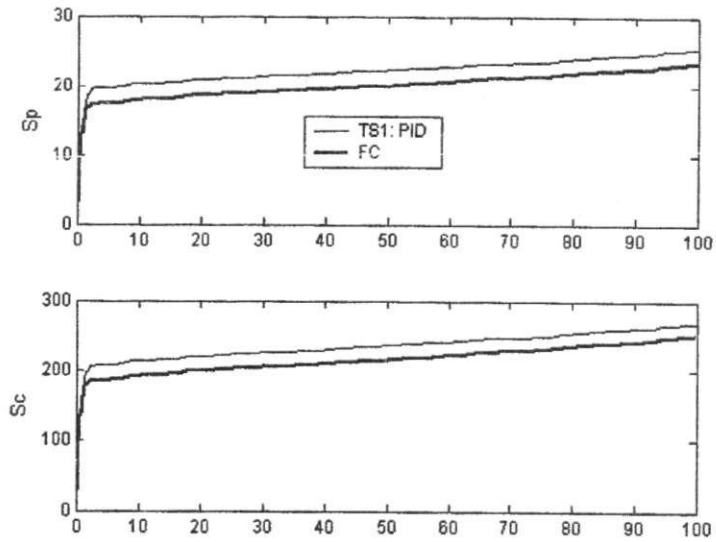
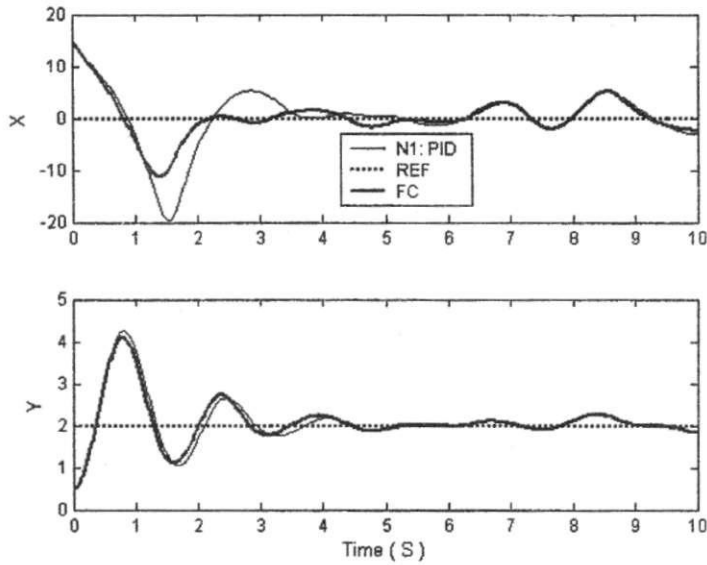
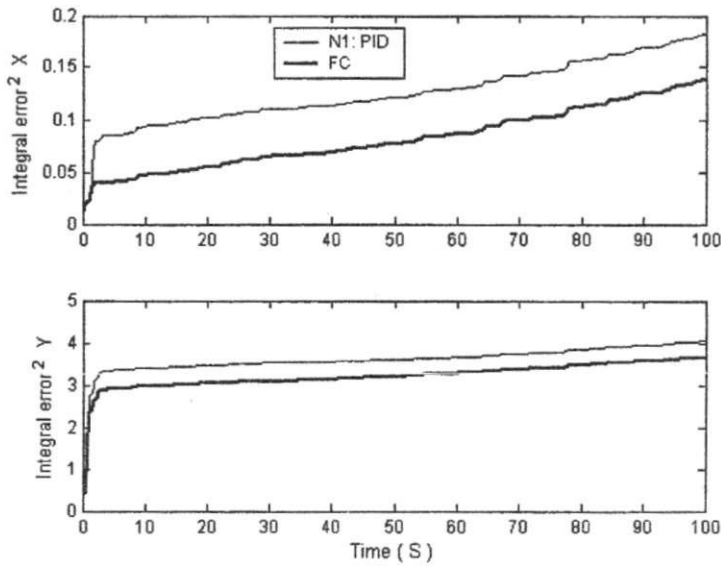


Рис. 18: Сравнение результатов моделирования производства энтропии в ОУ, НР (FC) и в традиционном ПИД (PID)-регулятора.



(a) Движение ОУ.



(б) Интегральная квадратичная ошибка управления.

Рис. 19: Сравнение результатов моделирования управления ОУ с помощью НР (FC) и традиционного ПИД (PID)-регулятора. Ситуация N1.

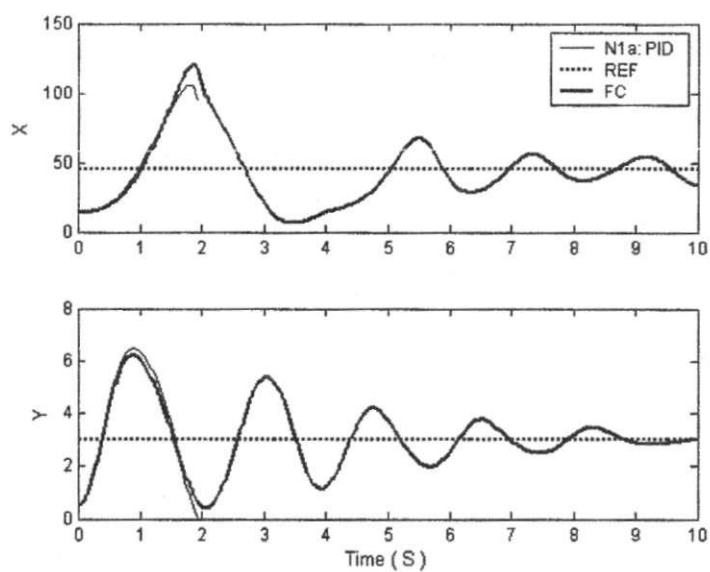
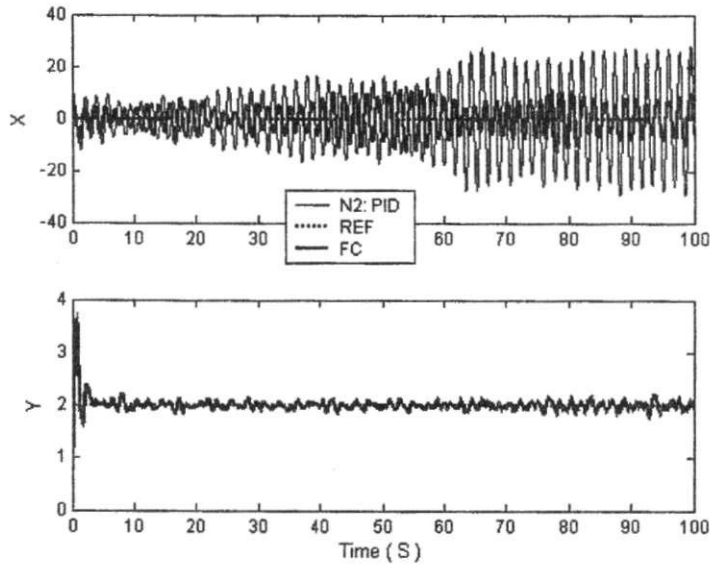
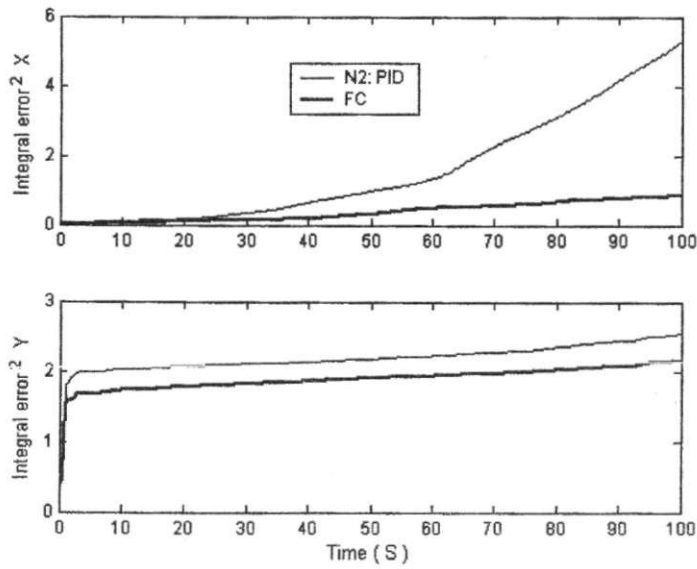


Рис. 20: Сравнение результатов моделирования управления ОУ с помощью НР (FC) и традиционного ПИД (PID)-регулятора. Ситуация N1a.



(а) Движение ОУ.



(б) Интегральная квадратичная ошибка управления.

Рис. 21: Сравнение результатов моделирования управления ОУ с помощью НР (FC) и традиционного ПИД (PID)-регулятора. Ситуация N2.



## Выводы

Как видно из рис.20, ПИД контроллер в ситуации N1a не робастен (нет решений, система моделирования движения прервана режимом «stop»). Рисунок 21 показывает, что в ситуации N2 ПИД-регулятор имеет большую ошибку управления чем НР. Выбранные ситуации из класса непредвиденных ситуаций управления показывают предельные возможности НР и *традиционного ПИД (PID)-регулятора*, построенных для заданного ОУ.

Результаты моделирования показывают: (1) построенная БЗ НР, управляющего движением маятника с переменной длиной, является *робастной*; (2) с точки зрения критериев качества управления, таких как минимум ошибки управления, минимум производства энтропии в объекте управления и системе управления (т.е. минимум тепловых потерь и потерь полезной работы и энергии), а также с учетом минимума управляющей силы – разработанная ИСУ эффективнее традиционных ПИД-регуляторов.

## Заключение

С помощью технологии мягких вычислений и программной поддержки алгоритмов случайного поиска, и методологии естественного отбора (на основе структуры ГА, разработанной авторами) были промоделированы различные варианты робастных БЗ. Сформированные робастные БЗ позволяют осуществлять управление сложными ОУ в условиях неопределенности информации о внешних возмущениях на ОУ и изменениях задающих сигналов (целей управления). Робастность законов управления достигается за счет введения векторных функций пригодности ГА, содержащих в качестве одной из компонент физический принцип минимума производства обобщенной энтропии как в ОУ, так и в интеллектуальном регуляторе.

Такой подход с применением разработанного программного продукта [5,6] в виде ОБЗ позволяет: (1) осуществить принцип проектирования оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным ОУ в условиях неопределенности исходной информации; (2) сократить до требуемого минимума необходимое количество датчиков сбора и передачи информации, как в контуре управления, так и в измерительной системе без потери точности и качества управления. Робастность ИСУ, полученная на основе такого подхода, требует минимума исходной информации, как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях.

## Список литературы

- [1] Litvintseva L.V., Takahashi K., Ulyanov S.S. et all. Intelligent robust control design based on new types of computations. Note del Polo Ricerca, Universita degli Studi di Milano Publ., V. 60, 2004.
- [2] Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А. и др. Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматгиз, 2000.
- [3] Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука, 2003.

- [4] Panfilov S.A., Litvintseva L.V., Ulyanov S.V. et al. Soft computing optimizer for intelligent control systems design: the structure and applications. // J. Systemics, Cybernetics and Informatics (USA). 2003. V. 1, № 5.
- [5] Панфилов С.А., Литвинцева Л.В., Такахаши К., Ульянов С.С., Язенин А.В., Ульянов И.С., Хагивара Т. Программная поддержка процессов формирования, извлечения и проектирования баз знаний робастных интеллектуальных систем управления. // ППС. 2004, № 2.
- [6] Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С., Построение робастных баз знаний нечётких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. ТИСУ. 2006, № 5.
- [7] Ulyanov S.V., Feng M., Yamafuji K. et al. Stochastic analysis of time-variant nonlinear dynamic systems. Pts 1, 2: the Fokker-Planck-Kolmogorov equation approach in stochastic mechanics. // Prob. Engn. Mech. 1998. V. 13. № 3.
- [8] Yao G.Z., Yap F.F., Chen G. et al. MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system. // Mechatronics. 2002. V. 12, No 10.
- [9] Tanifuji K., Kazumi S., Shimamine R. Mechatronics in Japanese rail vehicle: active and semi-active suspensions. // Control Engn. Practice. 2002. V. 10, No 11.
- [10] Fisher D., Isermann R. Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions. // Control Engn. Practice. 2004. V. 12, No 12.
- [11] Ying Z.G., Zhen W.Q., Soong T.T. A stochastic optimal semi-active control strategy for ER/EM dampers. // J. Sound and Vibration. 2003. V. 259, No 1.
- [12] Ulyanov S.V. System for intelligent control based on soft computing. US patent № 6,415,272, 1998.