

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАТОРА БАЗ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ РОБАСТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Ульянов Сергей Викторович¹, Тятюшкина Ольга Юрьевна²,
Григорьев Павел Николаевич³, Резникова Наталья Владимировна⁴

¹ Доктор физико-математических наук, профессор;
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: uyanovsv@mail.ru.

² Старший преподаватель;
ГОУ ВПО Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19,
e-mail: tyatyushkina@mail.ru.

³ Аспирант;
ГОУ ВПО Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19,
e-mail: pavlopn@mail.ru.

⁴ 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: natalya-reznikova7@yandex.ru.

На основе результатов моделирования показано, что использование разработанного инструментария в ситуациях обучения и в непредвиденных ситуациях управления приводит к повышению уровня робастности интеллектуальных систем управления.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, робастность, оптимизатор баз знаний.

KNOWLEDGE BASE OPTIMIZER BASED ON SOFT COMPUTING IN INTELLIGENT ROBUST CONTROL

Ulyanov Sergey¹, Tyatyushkina Olga²
Grigoryev Pavel³, Reznikova Natal'ja⁴

¹ Doctor of Science 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: uyanovsv@mail.ru.

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

³Postgraduate student;

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

⁴Student;

Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: natalya-reznikova7@yandex.ru.

Using the simulation results is shown that with the application of a developed toolkit in learning situations and in unpredicted control situations the robust level of intelligent control systems is increased.

Keywords: intelligent control, robust knowledge base, soft computing optimizer.

Введение

Одним из важных элементов наукоёмкой информационной технологии проектирования интеллектуальных систем управления (ИСУ) является разработка методологии и соответствующей программно-аппаратной поддержки процессов проверки и оценки уровней робастности спроектированной структуры ИСУ (как меры чувствительности к различным внешним и внутренним, случайным возмущениям как на объекты управления (ОУ), так и в каналах измерений или контурах управления). Актуальность решения данной проблемы многократно диктовалась практическими задачами теории и систем управления и неоднократно отмечалась многими исследователями [1 – 3].

Увеличение сложности структур ОУ и трудности прогнозирования непредвиденных (нештатных) ситуаций управления только усиливают актуальность данной проблемы и внимание к поиску её решения. Такого рода задачи относятся к т.н. проблеме «System of Systems Engineering», изучающей в общем виде сложные структуры систем автоматизированного управления (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 баз знаний (БЗ) для ИСУ разработаны в [5, 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).

Основной целью работы в этом случае является определение уровней робастности процессов управления, поддерживающих требуемый уровень надёжности и точности процессов управления в условиях неопределённости информации в процессах принятия решений с помощью разработанного программного продукта в [6].

1. Система стохастического нечёткого моделирования робастных ИСУ

Нечёткое моделирование робастных БЗ на основе оптимизатора БЗ (ОБЗ) основано на процессе извлечения ценной информации за счёт 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) выбо-

рочной 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 [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 моделями ОУ с указанием основных факторов, влияющих на чувствительность и надёжность точности управления.

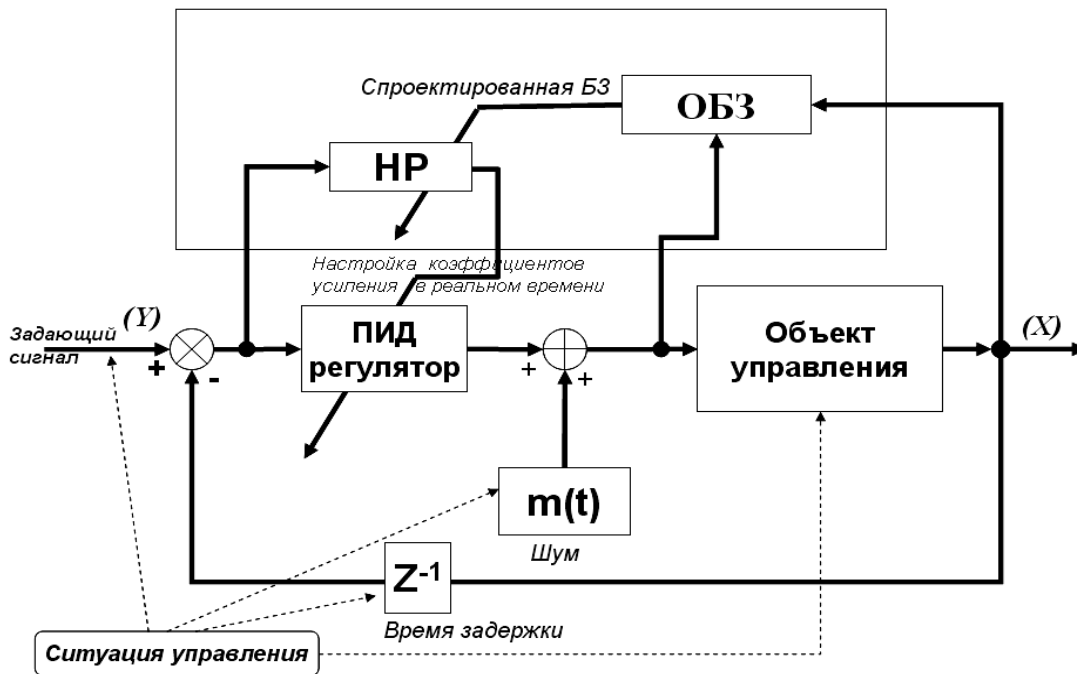


Рис. 1. Обобщённая система стохастического нечёткого моделирования с непредвиденными ситуациями управления

Эффективность применения ОБЗ традиционно демонстрируется на конкретных типовых примерах (т.н. «Benchmarks») моделей ОУ. В частности, исследуемые модели физических ОУ и их среда функционирования имеют следующие (типичные для реальных динамических ОУ) особенности:

- (1) по части обобщённых координат обладают локальной и глобальной 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.

В качестве непредвиденных ситуаций управления рассматриваются четыре модели управления в условиях неопределённости исходной информации: (1) с переменной во времени статистической информацией о внешних и параметрических случайных возмущениях (выборочные траектории случайных процессов с зависящими от времени функциями плотности распределения вероятностей); (2) об изменениях параметров или структуры ОУ; (3) при наличии случайного времени задержки в контурах управления и измерительной системы; и (4) при изменении целей управления (задающего сигнала).

Моделирование разработанной модели ИСУ и ОУ осуществлялось в системе MatLab/Simulink (рис. 2).

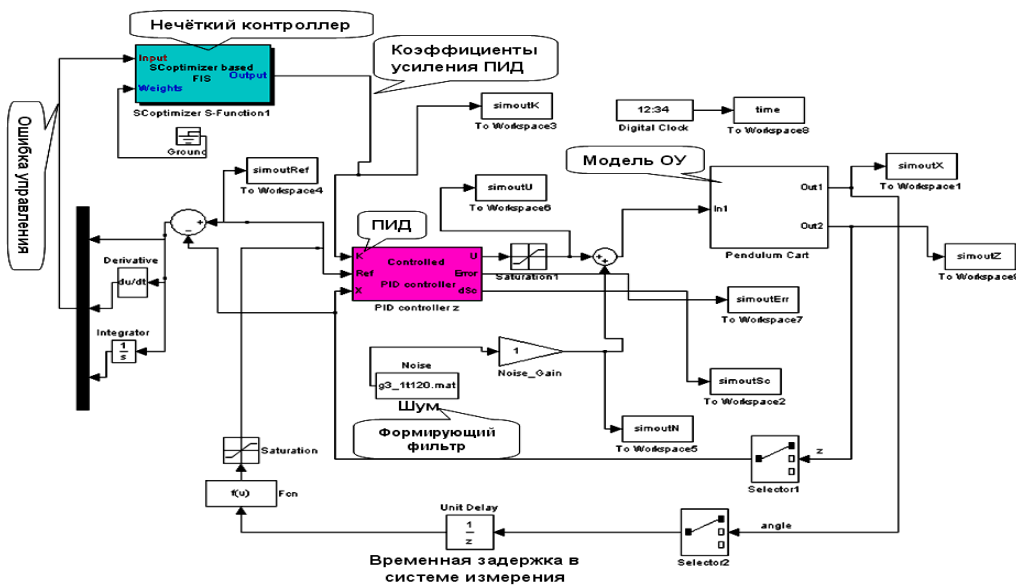


Рис. 2. Модель системы управления в среде Матлаб/Симулинк

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.

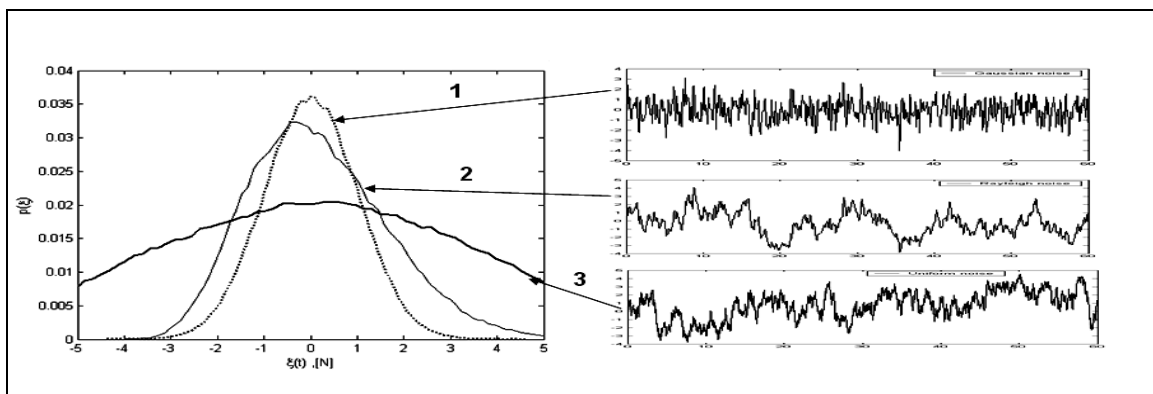


Рис. 3. Вид функций плотности распределения вероятностей и результаты моделирования выходных случайных процессов от соответствующих формирующих фильтров:
 (1) – Гауссовский случайный процесс; (2) – Рэлеевский случайный процесс; (3) – равномерно распределённый случайный процесс

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 спроектированной ИСУ. Ниже в разделе 3 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 моделирования динамического поведения типового ОУ (Benchmarks): нелинейный осциллятор с существенной диссипацией и локальной динамической неустойчивостью. Данный ОУ представляет собой самостоятельный интерес для задач робототехники и нелинейной статистической механики (например, магнитная подвеска компенсации вибраций движущихся динамических ОУ, мотоцикл с учётом биомеханических характеристик водителя и др.).

2. Результаты моделирования

Эффективность процессов управления с применением ОБЗ демонстрируется на конкретном типовом примере (т.н. «*Benchmark*») моделей динамических ОУ в условиях неполноты информации о параметрах структуры ОУ и при наличии непредвиденных (нештатных) ситуаций управления. Приведены примеры промышленного применения робастных ИСУ в реальных ОУ, спроектированных на основе ОБЗ [1, 5]. 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:

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

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 (1) ОУ является механическая часть подвески движущегося объекта (автомобиля, мотоцикла, вагона и т.п.) с повышенной нелинейной диссипацией для повышения эффекта гашения (компенсации) колебаний движущегося объекта с целью повышения комфорта пассажиров и описывается обобщенным 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 и начальными условиями: $\beta = 0.5; a = 0.3; k_1 = 0.2; k = 5$ и $[x_0][\dot{x}_0] = [2.5][0.1]$, соответственно. Как видно из результатов моделирования на рис. 4 динамическая система (1) обладает на фазовом портрете областью притяжения (аналог странного аттрактора).

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.

Рассмотрим следующую задачу управления: (1) перевести ОУ (1) 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.

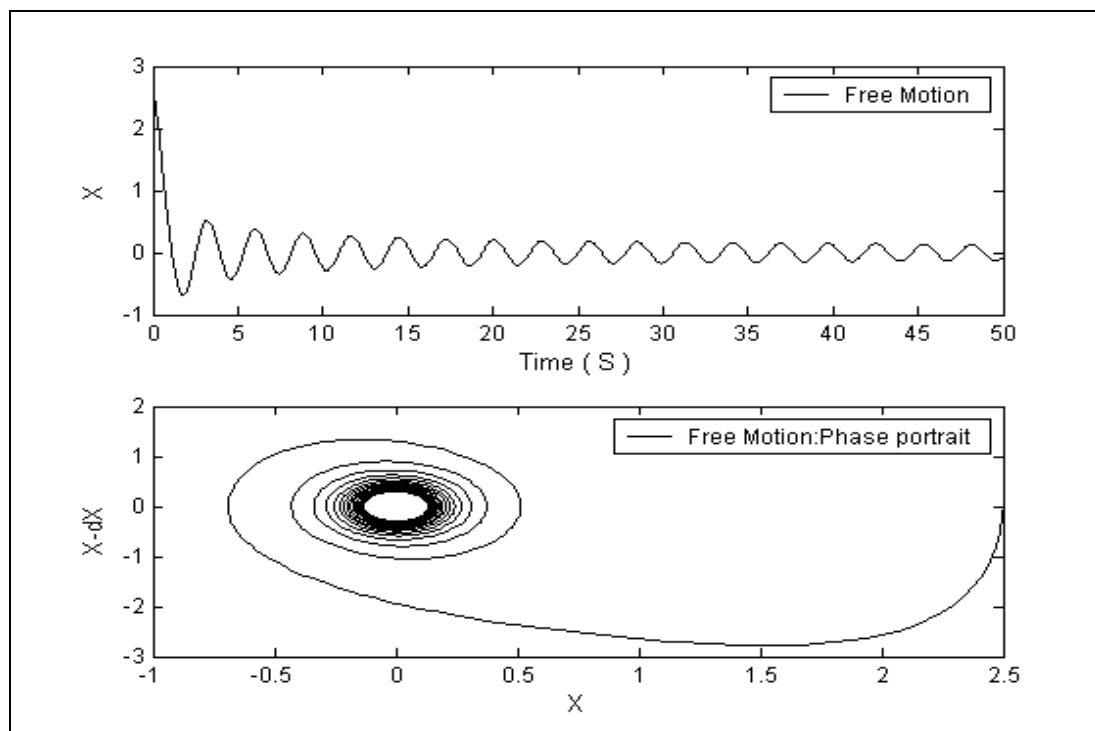


Рис. 4. Свободное движение и фазовый портрет ОУ

Рассмотрим следующие ситуации обучения:

Проектирование БЗ НР – FC0. В качестве исходных параметров системы (1) примем $\beta = 0.1; a = 0.3; k_1 = 0.2; k = 5$ и начальные условия равными $[x_0][\dot{x}_0] = [2.5][0.1]$; задающий сигнал $x_{ref} = 0$; область изменения коэффициентов усиления примем $[0, 50]$; внешнее возмущение является случайным воздействием с Рэлеевским законом распределения вероятностей (рис. 3, позиция 2). Данную ситуацию управления обозначим *TS0*.

Проектирование БЗ НР – FC1. В качестве исходных параметров системы (1) также примем $\beta = 0.1; a = 0.3; k_1 = 0.2; k = 5$ и начальные условия равными $[x_0][\dot{x}_0] = [2.5][0.1]$; задающий сигнал $x_{ref} = 0$; область изменения коэффициентов усиления примем $[0, 50]$; внешнее возмущение является случайным воздействием с Гауссовским законом распределения вероятностей (см. рис. 3, позиция 1). Данную ситуацию управления обозначим *TS1*.

Используя инструментарий ОБЗ и ОС, полученный с помощью стохастического моделирования с использованием ГА из [1, 4 – 6], для заданных ситуаций обучения были спроектированы БЗ0(КВ0) и БЗ1(КВ1) для НР0(FC0) и 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 выборки по сигналу управления $C = 0.05$ сек и время выборки измерения движения ОУ равным 0.025 сек, соответственно. Было введено также ограничение на допустимую силу управления в виде $|u| \leq 20$ [Н] и время задержки сигнала в канале измерения $0,001$ сек. (см. рис. 1 и 2).

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.

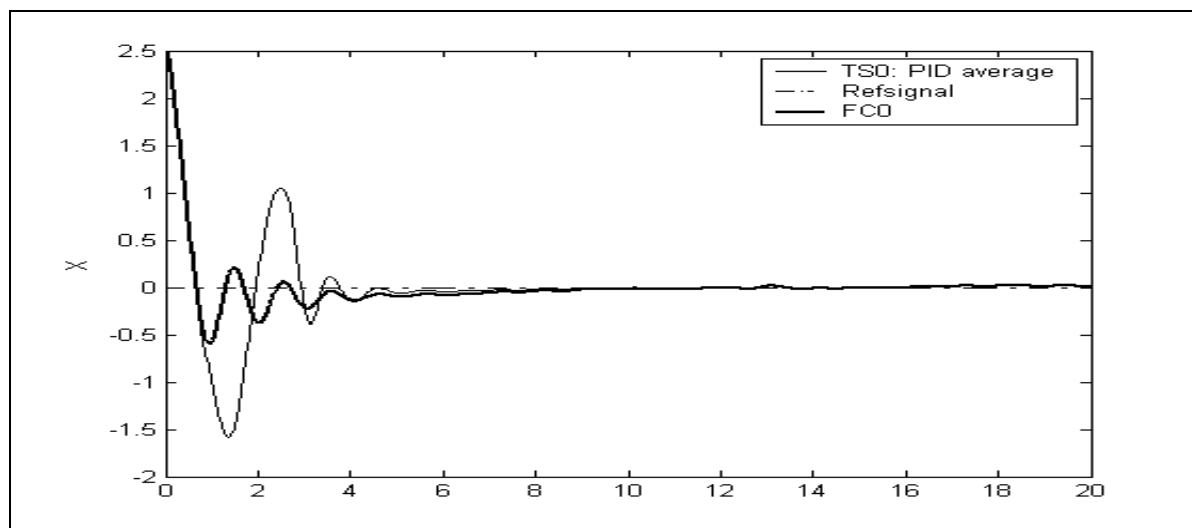


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования поведения ОУ при управлении интеллектуальным ПИД-НР (FC0 и FC1, соответственно) и традиционным ПИД-регулятором (ситуация TS0)

В частности, для ситуаций TS0 и TS1 коэффициенты усиления ПИД-регулятора имели значения $K = [35 \ 43 \ 7]$ и $K = [33 \ 35 \ 15]$ соответственно.

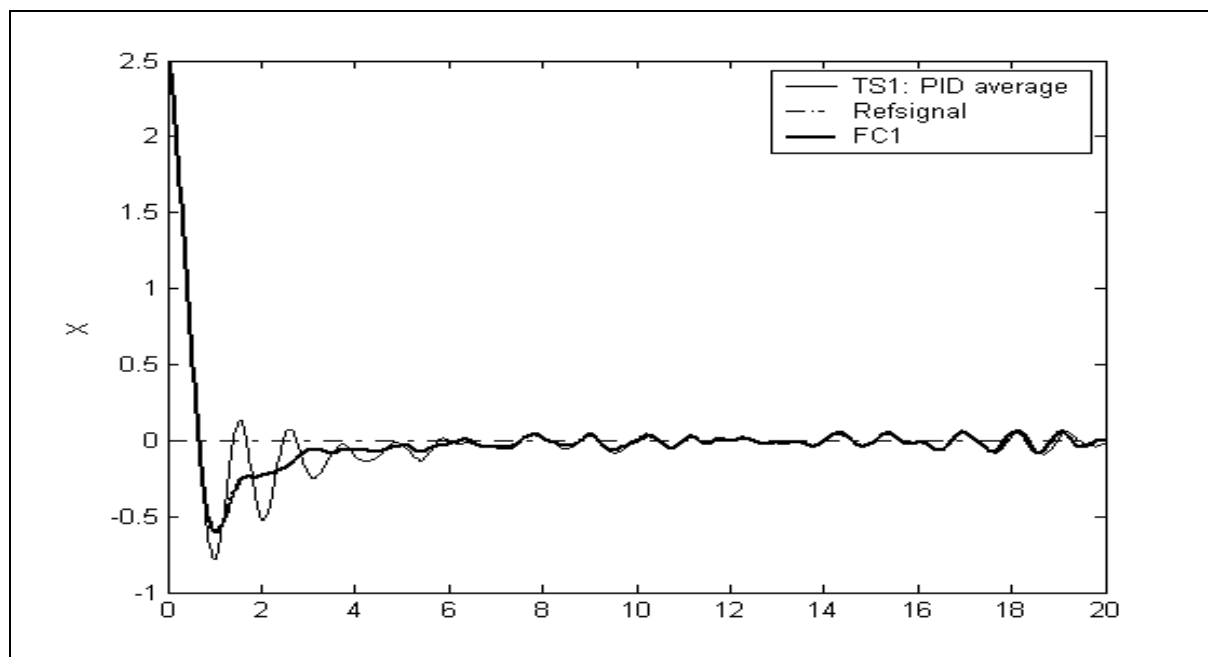


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования поведения ОУ при управлении интеллектуальным ПИД-НР (FC0 и FC1, соответственно) и традиционным ПИД-регулятором (ситуация TS1)

Как следует из результатов моделирования, НР в обеих ситуациях управления работает более эффективно по сравнению с традиционным ПИД-регулятором.

2.2. Робастность НР в непредвиденных ситуациях управления

Рассмотрим чувствительность динамического поведения ОУ в непредвиденных ситуациях управления. В Таблице 1 представлены новые ситуации управления и параметры моделирования.

Таблица 1: Параметры непредвиденных ситуаций управления

Внешний шум	Задающий сигнал	Время задержки	Изменение структуры	Шум в измерении
Равномерный	0	0,0125	нет	0,02
Равномерный	[-1 1 0]	0,001	нет	0,02
Равномерный	0	0,0125	Гауссовский	0,02

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

Примечание. Физически ситуация $S1$ описывает влияние на динамику ОУ нового вида внешнего шума, времени задержки и шума в канале измерения. Ситуация $S2$ описывает дополнительное влияние изменение цели управления (изменяющийся во времени ступенчатый сигнал) и изменения времени задержки. В третьей ситуации управления оценивается влияние случайного изменения параметров структуры ОУ (Гауссовский параметрический шум в структуре ОУ (2.1) с масштабными коэффициентами $Gain_{\beta} = 0.2; Gain_{\alpha} = 0.5; Gain_{k_i} = 0.5; Gain_k = 2$, соответственно).

На рис. 7 представлены результаты моделирования динамического поведения ОУ для ситуации управления $S1$.

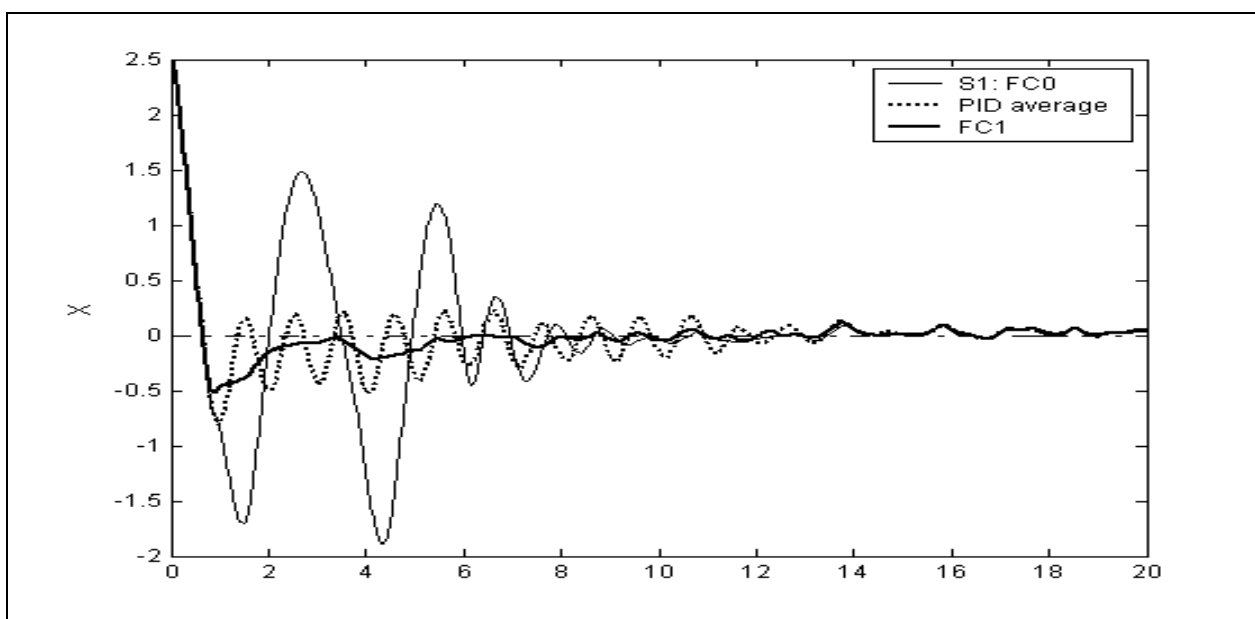
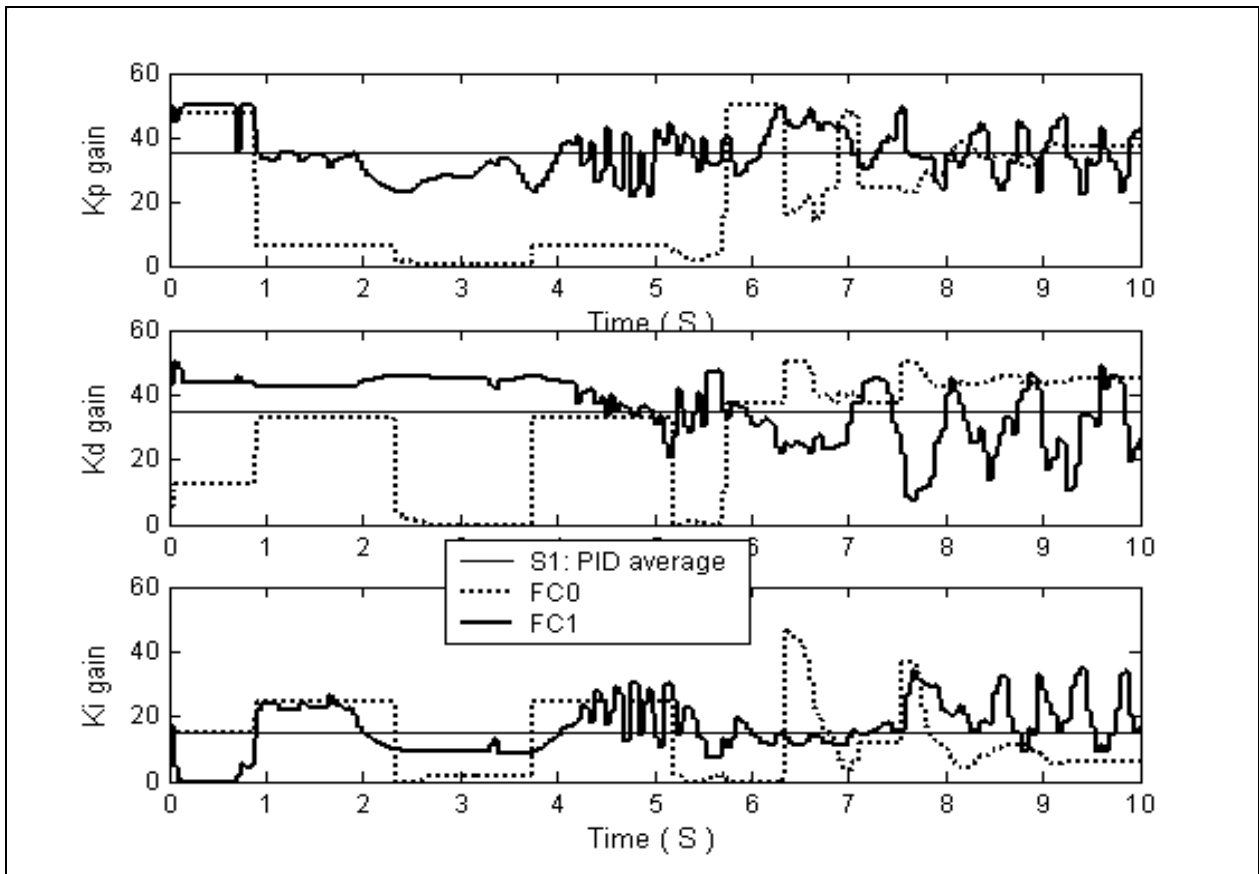
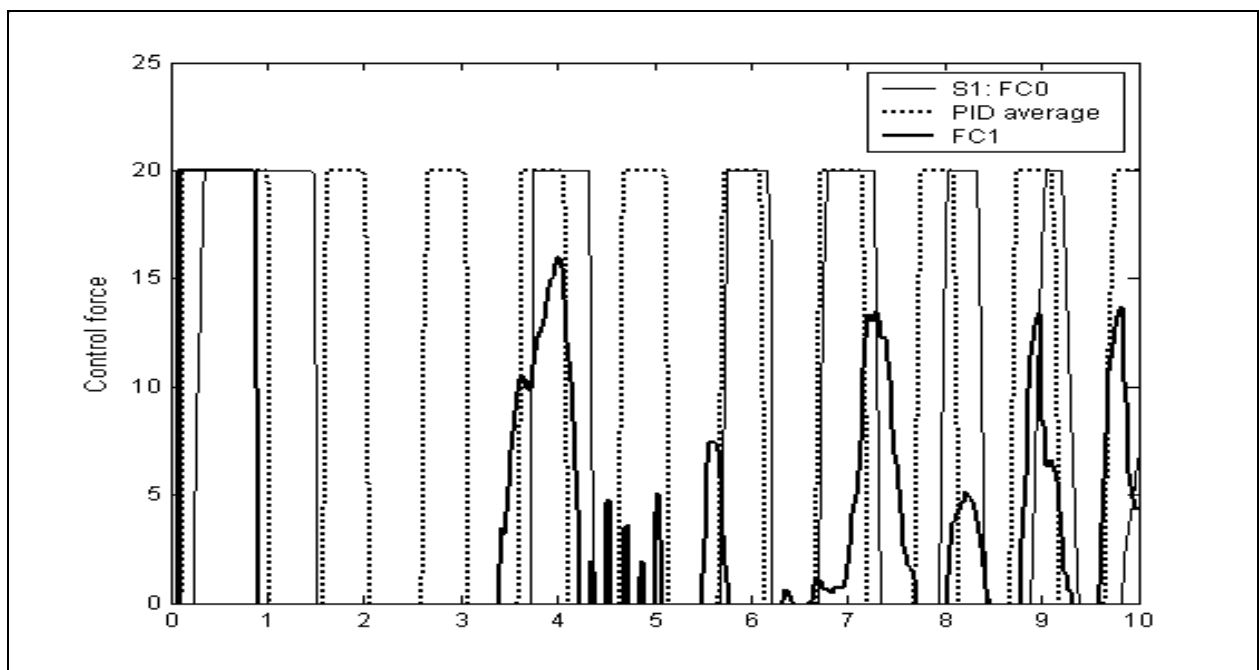


Рис. 7. Результаты моделирования динамического поведения ОУ для ситуации управления $S1$

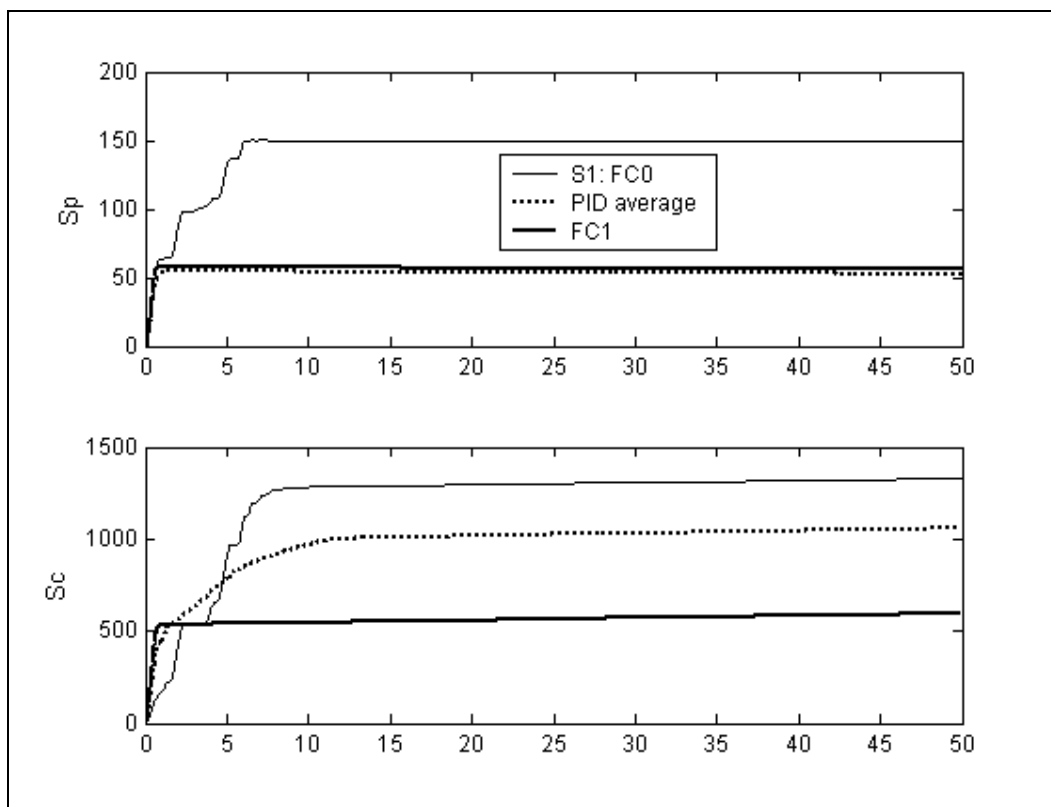
На рис. 8 представлены вычисленные по результатам моделирования на рис. 7 законы управления коэффициентами усиления ПИД-НР (рис. 8, а), законы формирования результирующей управляющей силы (рис. 8, б) и термодинамические характеристики (производство энтропии) ОУ и регуляторов (рис. 8, в).



(a)



(b)



(в)

Рис. 8. Вид законов управления коэффициентами усиления ПИД-НР (рис. 8, а), законов формирования результирующей управляющей силы (рис. 8, б) и термодинамических характеристик (производство энтропии) ОУ и регуляторов (рис. 8, в), вычисленные по результатам моделирования на рис. 7

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

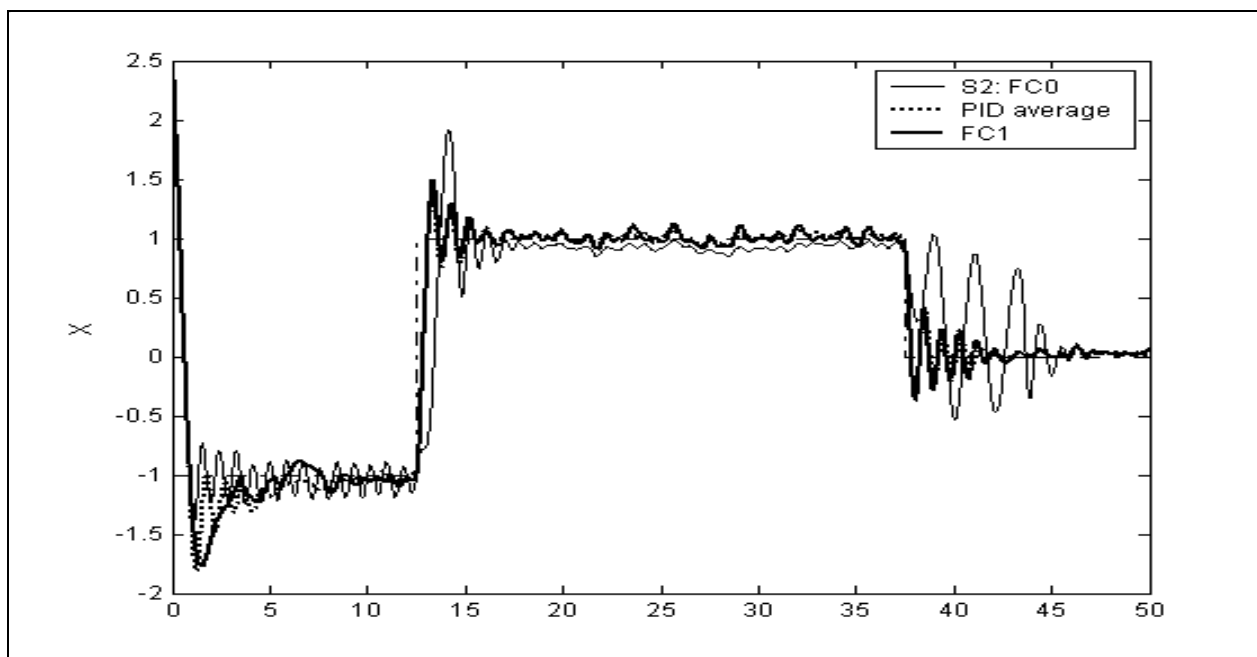


Рис. 9. Оценка робастности ИСУ для ситуаций управления $S2$

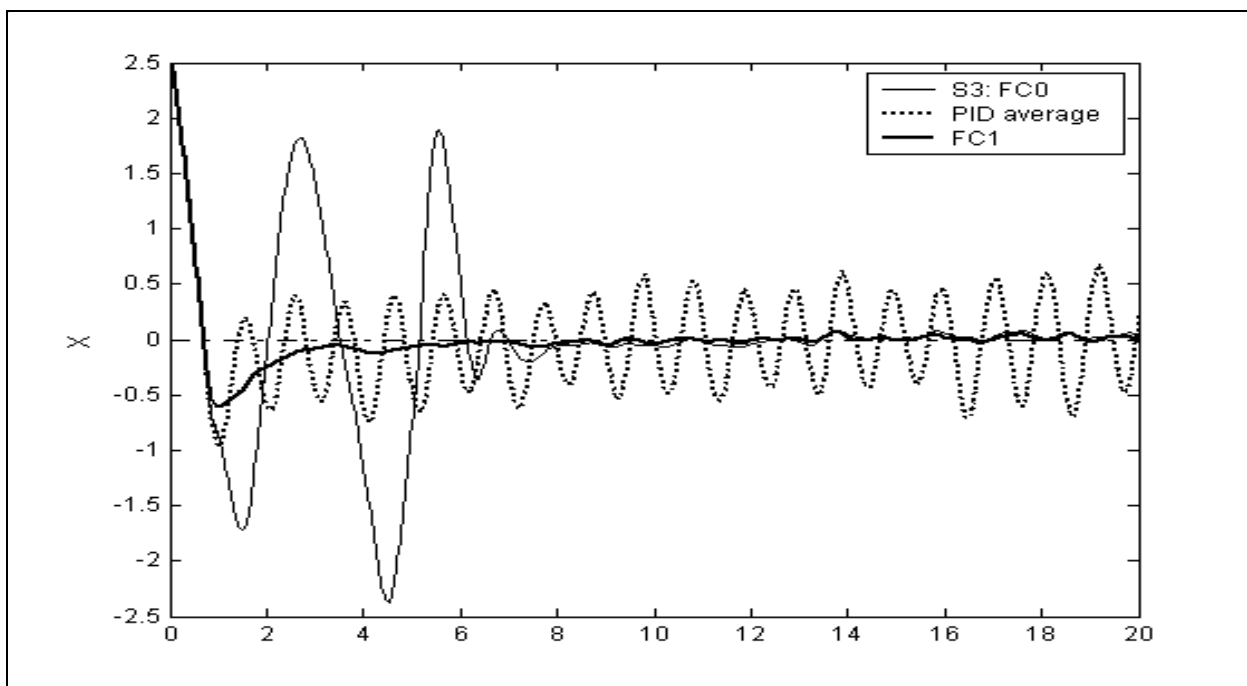


Рис. 10. Оценка робастности ИСУ для ситуаций управления $S3$

Анализ полученных результатов моделирования показывает достаточную робастность ИСУ при изменении вида ситуации управления, но в частном случае управления НР, обученного на Гауссовский шум, БЗ НР может обладать повышенной чувствительностью при изменении типа шума и параметров модели ОУ.

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

Список литературы

1. Litvintseva L.V., Takahashi K., Ulyanov S.V. Intelligent robust control design based on new types of computations. – Note del Polo Ricerca, Universita degli Studi di Milano Publ. – 2004. – Vol. 60.
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. Litvintseva L.V., Ulyanov S.V. et all. Soft computing optimizer for intelligent control systems design: the structure and applications // J. Systemics, Cybernetics and Informatics (USA). – 2003. – Vol. 1. – № 5.
5. Литвинцева Л.В., Такахаши К., Ульянов С.В. 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 all. Stochastic analysis of time-variant nonlinear dynamic systems. Pts 1, 2: the Fokker-Planck-Kolmogorov equation approach in stochastic mechanics // Prob. Engn. Mech. – 1998. – Vol. 13. – № 3.
8. Yao G.Z., Yap F.F., Chen G. et all. MR damper and its application for semi- active control of vehicle suspension system // Mechatronics. – 2002. – Vol. 12. – № 10.

9. Tanifuji K., Kazumi S., Shimamine R. Mechatronics in Japanese rail vehicle: active and semi-active suspensions // Control Engn. Practice. – 2002. – Vol. 10. – № 11.
10. Fisher D., Isermann R. Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions // Control Engn. Practice. – 2004. – Vol. 12, – № 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. – Vol. 259. – № 1.
12. Li T.-H.S., Shieh M.-Y. Switching-type fuzzy sliding mode control of a cart – pole system // Mechatronics. – 2000. – Vol. 10. – № 2.
13. Lai H.-Ch., Liu J.-S., Lee D.T. et al. Design parameters study on the stability and perception of riding comfort of the electrical motorcycle under rider loading // Mechatronics. – 2003. – Vol. 13. – № 1.
14. Ulyanov S.V. System for intelligent control based on soft computing // US patent. – 1998. – № 6,415,272.