

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ БАЗ ЗНАНИЙ

**Караткевич Сергей Григорьевич¹, Литвинцева Людмила Васильевна²,
Тятюшкина Ольга Юрьевна³, Григорьев Павел Николаевич⁴,
Решетников Андрей Геннадиевич⁵**

¹Кандидат экономических наук;
Научно-технологический парк «Дубна»;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Программистов, 4;
e-mail: s.karatkevich@ntpdubna.ru.

²Кандидат физико-математических наук;
Научно-технологический парк «Дубна»;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Программистов, 4;
e-mail: s.ulyanov@ntpdubna.ru.

³Старший 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.

⁴Аспирант;
ГОУ ВПО Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: pavloon@mail.ru.

⁵Студент;
ГОУ ВПО Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: reshet@sunhe.jinr.ru.

В статье представлен анализ проблем внедрения интеллектуальных систем управления. Описаны основные этапы работы с Оптимизатором Баз Знаний (ОБЗ). Эффективность процессов управления с ОБЗ демонстрируется на конкретном примере («шарик-доска») модели динамического объекта управления (ОУ) в условиях неполноты информации о параметрах структуры ОУ.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, робастные базы знаний, Оптимизатор баз знаний.

APPLICATION OF INTELLIGENT PROGRAM TOOLKIT FOR KNOWLEDGE BASES DESIGN

**Karatkevich Sergey¹, Litvintseva Ludmila², Tyatyushkina Olga³, Grigoryev Pavel⁴,
Reshetnikov Andrey⁵**

¹ Candidate of Science in Economics;
Tehnopark «Dubna»;
141983, Dubna, Moscow reg., Programmistov str., 4;
e-mail: s.karatkevich@ntpdubna.ru.

² *Candidate of Science in Physics and Mathematics;*
Tehnopark «Dubna»;
141983, Dubna, Moscow reg., Programmistov str., 4;
e-mail: s.ulyanov@ntpdubna.ru.

³ *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.

⁴ *Postgraduate 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.

⁵ *Student;*
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: reshet@sunhe.jinr.ru.

In the article the analysis of problems of introduction of intelligent control systems applications is presented. The main stages of the design process of robust knowledge bases are described. The efficiency of the control processes with application of the soft computing optimizer is demonstrated by Benchmark («ball-beam») of the model of a dynamic controlled plant under the conditions of incomplete information about the parameters of the structure of the controlled plant.

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

Введение

Одним из важных элементов наукоемкой 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. Наряду с этим еще одной важной проблемой внедрения ИСУ является их слабая адаптивность к изменениям параметров ОУ (вызванных, например, старением структуры ОУ или резким изменением внешней среды), а также низкая робастность полученных законов управления в случае непредвиденных ситуаций управления. Актуальность решения обозначенных проблем многократно диктовалась практическими задачами теории и систем управления и отмечалась неоднократно многими исследователями [1 – 3].

Для решения данных проблем были использованы технологии *интеллектуальных вычислений*, включающих *мягкие* и *квантовые* вычисления с использованием ряда важных термодинамических, информационно-энтропийных и динамических критериев управления.

ИСУ, основанные на новых типах вычислений (мягкие, квантовые и т.п.), привлекают все большее внимание. Исследования [1 – 3] показали, что они обладают следующими достоинствами: сохраняют главные преимущества традиционных систем управления (устойчивость, управляемость, наблюдаемость и т.п.); имеют оптимальную (с точки зрения заданного критерия качества управления) базу знаний (БЗ), а также возможность ее коррекции и адаптации к изменяющейся ситуации управления; гарантируют достижимость требуемого качества управления на основе спроектированной БЗ; способны функционировать в непредвиденных ситуациях управления.

Для построения новых поколений ИСУ, основанных на технологии мягких и квантовых вычислений, используется разработанный *Оптимизатор Баз Знаний* (ОБЗ). Общие положения и стратегия технологии проектирования робастных БЗ ИСУ на основе ОБЗ описаны в [3].

Основное внимание в данной статье сконцентрировано на описании *применения Оптимизатора Баз Знаний* для проектирования БЗ ИСУ сложными, существенно-нелинейными и неустойчивыми ОУ на примере динамической системы «шарик – доска» (beam-ball system). Существует несколько решений данной задачи управления классическими методами. В работе [4] ее решение рассматривается с помощью ПД-регулятора. Кроме того, разработано несколько интеллектуальных контроллеров, таких как нечеткий регулятор, нейронный контроллер, нечеткий нейронный регулятор, которые решают простейшие задачи управления в отсутствии внешних воздействий, ограничений и в отсутствии времени задержки в канале измерения [5]. До настоящего времени моделирование управления заданного ОУ при наличии задержки времени в контуре управления, наличия различных внешних стохастических воздействий и ограничений, а также в случае различных непредвиденных ситуаций управления не проводились, и наше исследование является весьма своевременным и важным для дальнейшего развития технологии проектирования робастных БЗ.

Мы покажем эффективность ИСУ, разработанную с применением ОБЗ, для управления данной динамической системой в условиях неполноты информации о параметрах структуры ОУ и при наличии непредвиденных (внештатных) ситуаций управления.

Постановка задачи

Динамическая система «шарик – доска» (beam-ball system) является весьма популярным и широко используемым примером (т.н. benchmark) для изучения моделей управления в теории управления. Наш объект управления, показанный на рис. 1, представляет собой шарик, движущийся вдоль длинной доски. Положение одной стороны доски жестко фиксировано, противоположная сторона соединена с электромотором так, что доска может наклоняться под действием приложенной к ней силы.

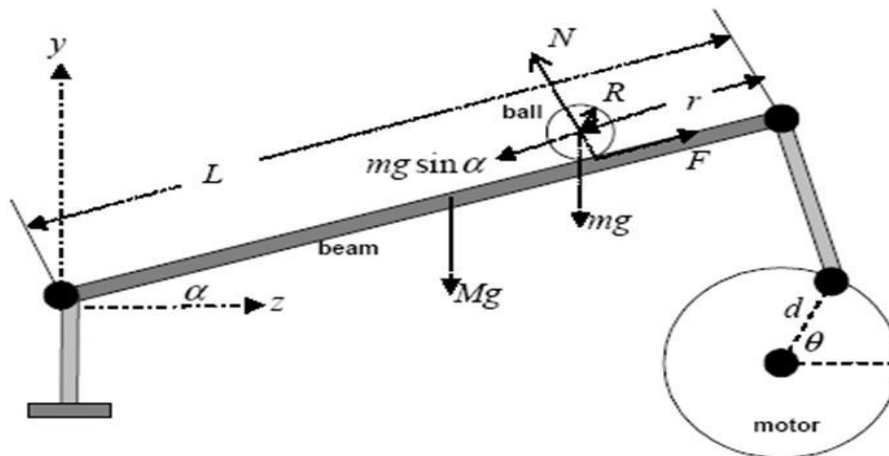


Рис. 1. Объект управления: динамическая система «шарик – доска»¹

Задачей управления является удержание (стабилизация) шара в положении центра доски. При этом в ситуацию управления включены стохастические внешние воздействия, временные задержки в канале измерения состояния объекта и ограничения на максимальную силу управления и движения ОУ.

Это сложная задача управления, так как шарик движется с ускорением в нелинейной зависимости от наклона доски и находится в неустойчивом состоянии. Математическая модель данного ОУ представлена следующими уравнениями движения:

¹ На рис. 1 английские слова обозначают следующее: «ball» – шарик, «beam» – доска, «motor» – мотор.

$$\ddot{\alpha} = \frac{\tau - 2mr\dot{r}\dot{\alpha} - \left(mgr + \frac{L}{2}Mg\right)\cos\alpha}{J_1 + mr^2},$$

$$\ddot{r} = \frac{5}{7}(r\dot{\alpha}^2 - g\sin\alpha)$$

где α – угол поворота доски, r – положения шара – обобщенные координаты динамической системы; L – длина доски, M – масса доски, m – масса шара; $J_1 = I_a + I_b$, где I_a – момент инерции доски ($0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$), I_b – момент инерции шара ($2 \times 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$); N – сила трения; τ – сила управления.

Рассмотрим следующие параметры модели: $m = 0,06 \text{ кг}$; $M = 0,12 \text{ кг}$; $L = 1 \text{ м}$; $g = 9,8 \text{ м/сек}^2$.

Введем следующие ограничения на силу управления $|\tau| \leq 5 [N]$, и введем время задержки в системе измерения, равное $0,005 \text{ сек}$.

В качестве ИСУ выберем нечеткий ПИД-регулятор с нечеткой моделью вывода Сугено [1].

Сила управления вычисляется следующим образом: $\tau = U_{PID}(beam) - U_{PID}(ball) =$

$$= (K_P^{beam}(t) \cdot e_{beam}(t) + K_D^{beam}(t) \cdot \dot{e}_{beam}(t) + K_I^{beam}(t) \int e_{beam}) - (K_P^{ball}(t) \cdot e_{ball}(t) + K_D^{ball}(t) \cdot \dot{e}_{ball}(t) + K_I^{ball}(t) \int e_{ball}),$$

где $[K_P^{ball} K_D^{ball} K_I^{ball} K_P^{beam} K_D^{beam} K_I^{beam}]$ – переменные коэффициенты управления ПИД-регулятором, которые вычисляются на каждом шаге управления. Таким образом, проектируемый нами нечеткий ПИД-регулятор имеет 6 входных переменных и 6 выходных, которые вычисляются как результат нечеткого вывода на основе БЗ построенной с помощью ОБЗ.

Основные этапы построения БЗ ИСУ с помощью ОБЗ

Этап 0. Определение типовой ситуации обучения (параметры математической модели ОУ; определение внешних шумов, начальных условий, ограничений и времени задержки).

Этап 2. Построение обучающего сигнала (ОС) происходит на основе стохастического моделирования поведения ОУ в типовой ситуации, проведенного с использованием математической модели ОУ и генетического алгоритма (ГА) с выбранными критерием оптимизации и областью поиска.

Этап 3. Выбор модели нечеткого вывода. Пользователь конкретизирует тип нечеткой модели вывода (Сугено, Мамдани и т.д.), операцию нечеткого И (произведение или минимум), число входных и выходных переменных. В нашем выборе это модель Сугено. Пусть n_1, n_2, n_3 есть количество функций принадлежности, описывающих ошибку управления e , ее скорость и интеграл, тогда общее число нечетких правил будет $n_1 \times n_2 \times n_3$. Само нечеткое (продукционное) правило в Базе Знаний выглядит следующим образом:

$$IF \quad e \text{ is } A_1 \quad \text{and } \dot{e} \text{ is } B_1 \quad \text{and } \int e \text{ is } C_1 \quad THEN \quad K_p = D_{111}, K_d = E_{111}, K_i = F_{111},$$

где A_1, B_1, C_1 – функции принадлежности, описывающие ошибку управления e , ее скорость и интеграл. Конечный результат нечеткого вывода в заданной БЗ вычисляется по следующим формулам:

$$K_p = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} D_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}; K_D = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} E_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}; K_I = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} F_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)},$$

где $\omega_{ijk} = A_i(e) \cdot B_j(\dot{e}) \cdot C_k(e)$, и « \cdot » – символ операции нечеткого умножения.

Этап 4. Создание лингвистических переменных для входных значений (ошибка управления, скорость ошибки управления, интегральная ошибка управления) нечеткого регулятора (НР). С помощью генетического алгоритма (ГА) определяется оптимальное число функций принадлежности для каждой входной лингвистической переменной, а также выбирается оптимальная форма представления их функций принадлежности (треугольная, Гауссовская и т.д.). В качестве критерия оптимальности той или иной конфигурации лингвистических переменных используется максимум совместной информационной энтропии и минимум информации о сигналах в отдельности.

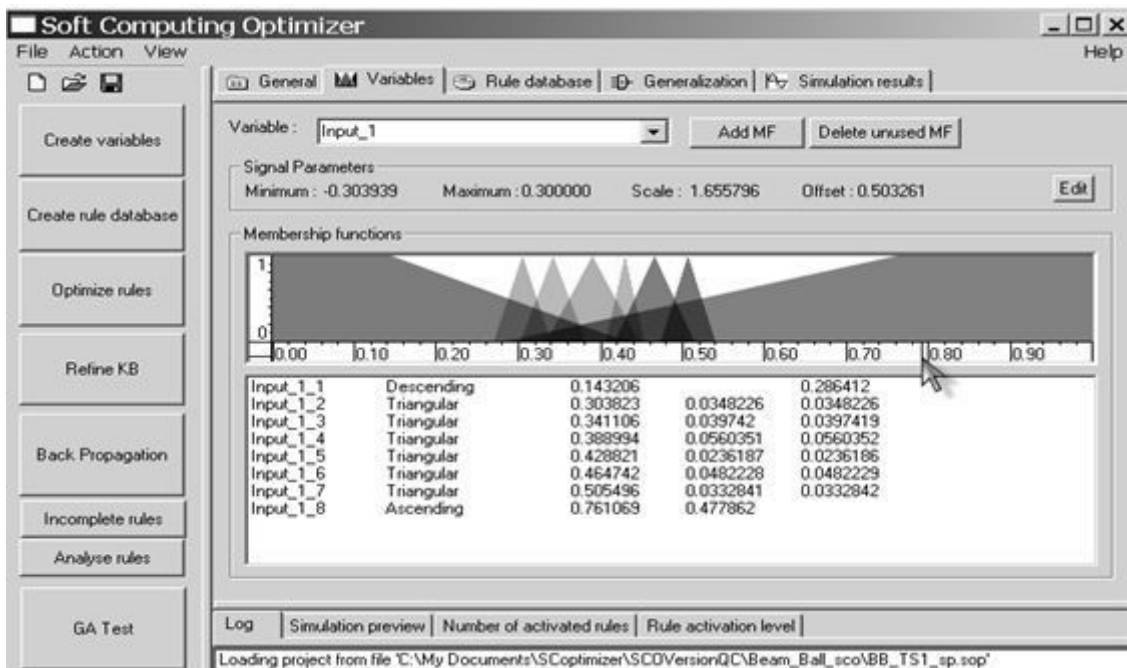


Рис. 2. Пример построения лингвистических переменных с помощью ОБЗ

На рис. 2 показан пример построения лингвистических переменных с помощью ОБЗ. Как видно из рисунка, для описания входных значений ошибки управления ОБЗ с помощью ГА выбрал восемь функций принадлежности.

Этап 5. Создание, оптимизация и настройка базы правил. На этапе создания БЗ используется специальный алгоритм отбора наиболее «робастных правил» в соответствии с разработанными критериями:

1. «Суммарный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют следующему условию: $R_{total_fs}^l \geq TL$, где TL (*threshold level*) – заданный (вручную или выбранный автоматически) уровень активации правила. $R_{total_fs}^l$ вычисляется по следующей формуле:

$$R_{total_fs}^l = \sum_{k=1}^N R_{fs}^l(t_k), \text{ и } R_{fs}^l(t_k) = \prod \left[\mu_{j1}^l(x_1(t_k)), \mu_{j2}^l(x_1(t_k)), \dots, \mu_{jn}^l(x_n(t_k)) \right],$$

где t_k – моменты времени, $k=1, \dots, N$, N равно числу точек в управляющем сигнале; $\mu_{jk}^l(x_k)$, $k=1, \dots, n$ – функции принадлежности входных переменных, l – индекс правила в БЗ; символ « Π » обозначает операцию нечеткой конъюнкции (в частности, может интерпретироваться как произведение).

2. «Максимальный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют условию

$$\max_t R_{fs}^l(t) \geq TL.$$

Далее с помощью серии ГА происходит оптимизация БЗ и ее настройка. Пример построенной с помощью ОБЗ оптимальной БЗ для нечеткого регулятора, решающего задачу управления нашего ОУ, показан на рисунке 3.

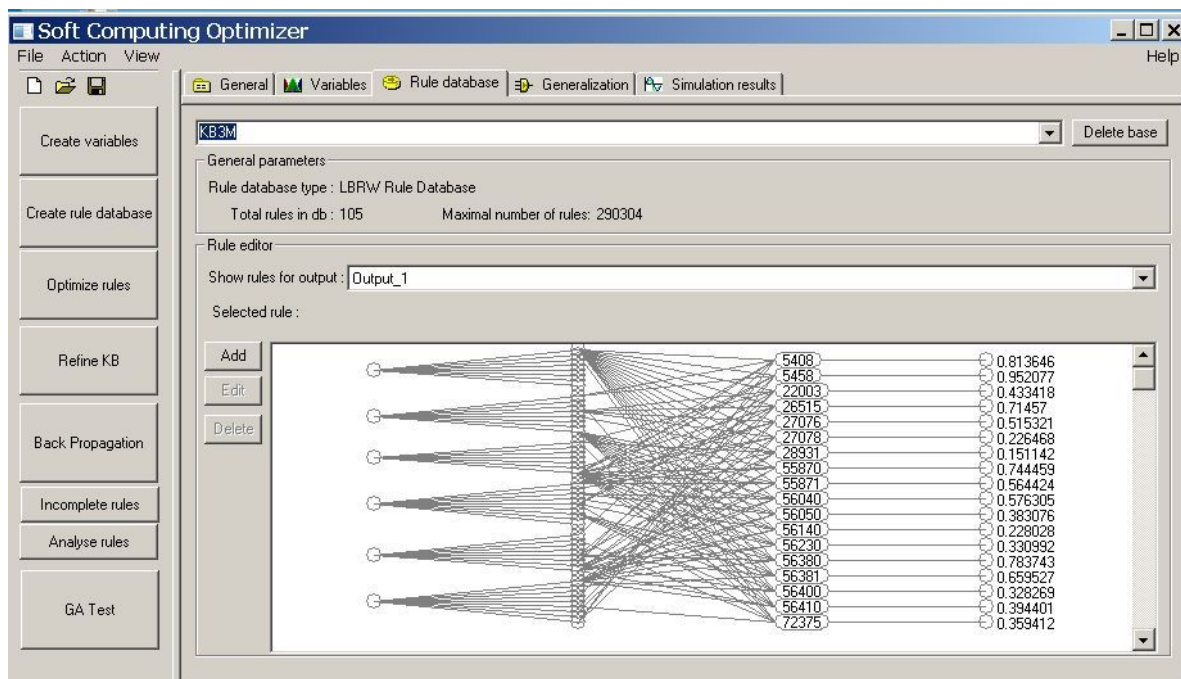


Рис. 3. Пример построенной с помощью ОБЗ оптимальной БЗ

Как видно из рисунка 3, полная структура БЗ для данного НР состоит из 290304 продукционных правил, однако ОБЗ выбрал оптимальную структуру БЗ, состоящую из 105 правил.

Результаты моделирования и их обсуждение

Рассмотрим теперь результаты моделирования поведения нашего динамического объекта под управлением трех типов:

- ПИД-регулятора с постоянными коэффициентами усиления $K = [5,1660 \ 9,3039 \ 0,8348 \ 9,9227 \ 0,8348 \ 9,3426]$, найденными с помощью ГА;
- нечеткий регулятор (НР1) с базой знаний 1, разработанной для типовой ситуации 1;
- нечеткий регулятор (НР2) с базой знаний 2, разработанной для типовой ситуации 2.

Замечание 1: В типовую ситуацию 1 включены параметры модели, ограничение и задержка времени в измерительной системе, описанные выше, а также следующие начальные условия: $[r_0 \dot{r}_0] = [0,2 \ 0]$; $[\alpha_0 \ \dot{\alpha}_0] = [10 \ 0]$ и Рэлеевский внешний шум (см. рис. 4 (а)). Типовая ситуация 2 отличается от первой включением другого типа внешнего шума – Гауссовского (см. рис. 4 (б)).

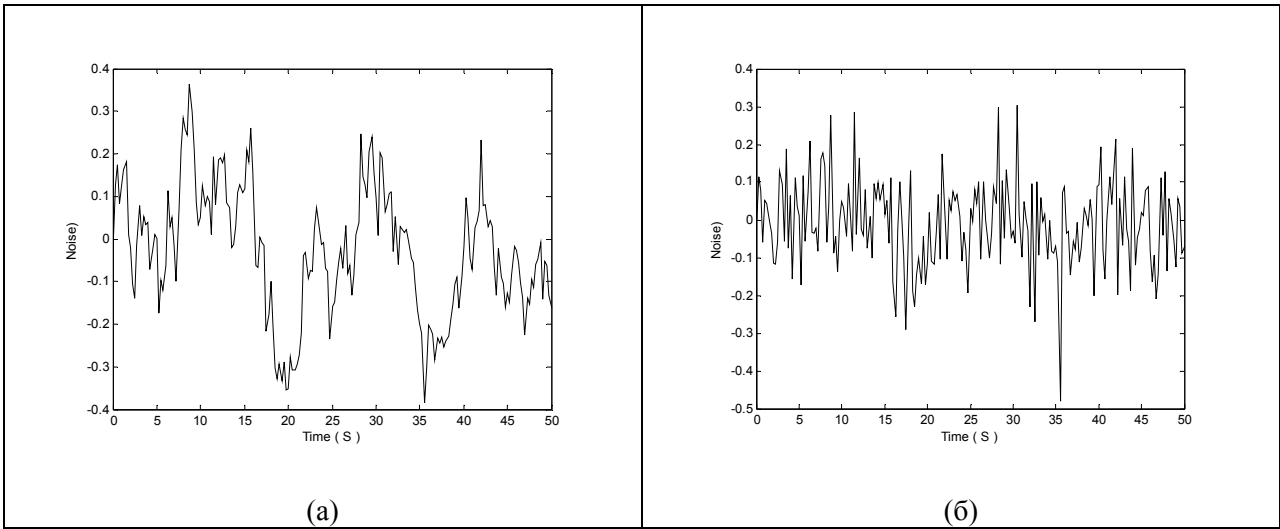


Рис. 4. Внешние шумы в типовых ситуациях 1 и 2

Моделирование разработанной модели ИСУ и ОУ осуществлялось в системе Matlab/Simulink версии 6.5. На рисунке 5 показана Матлаб-симулинк структура системы управления ОУ.

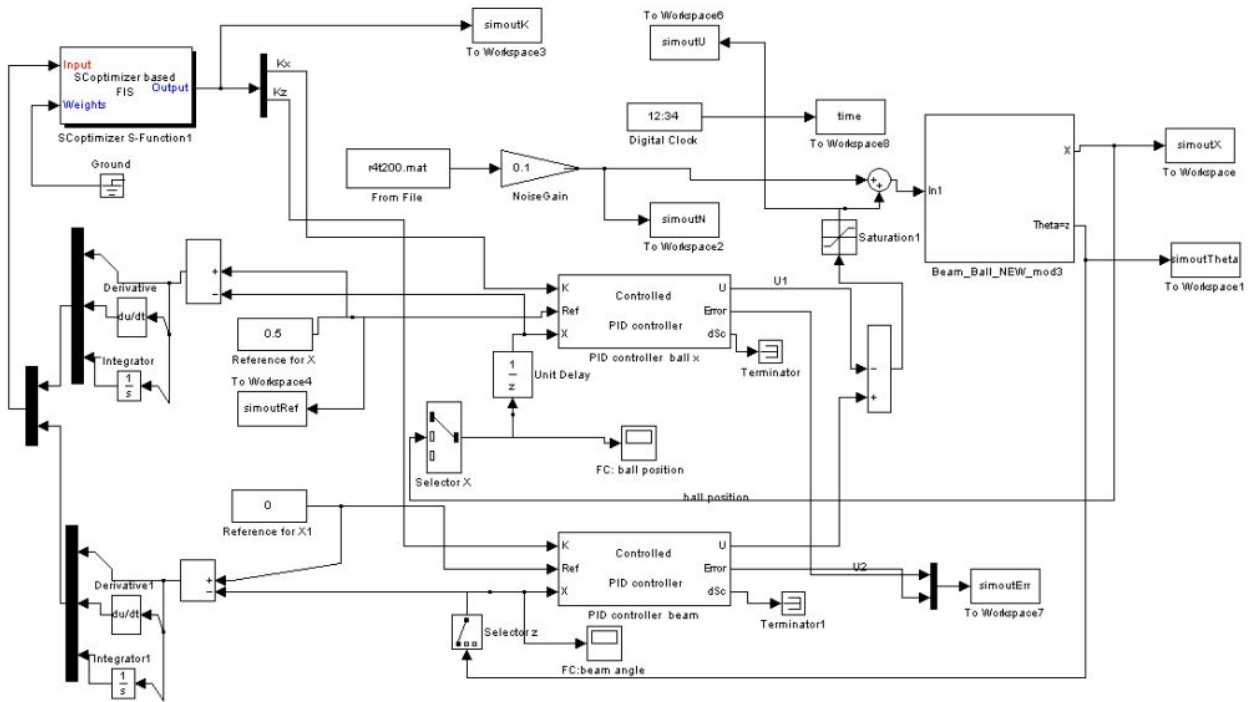


Рис. 5. Матлаб-симулинк структура системы управления ОУ

На рисунке 6 показано сравнение динамического поведения заданного ОУ в типовой ситуации для трех вышеуказанных типов управления.

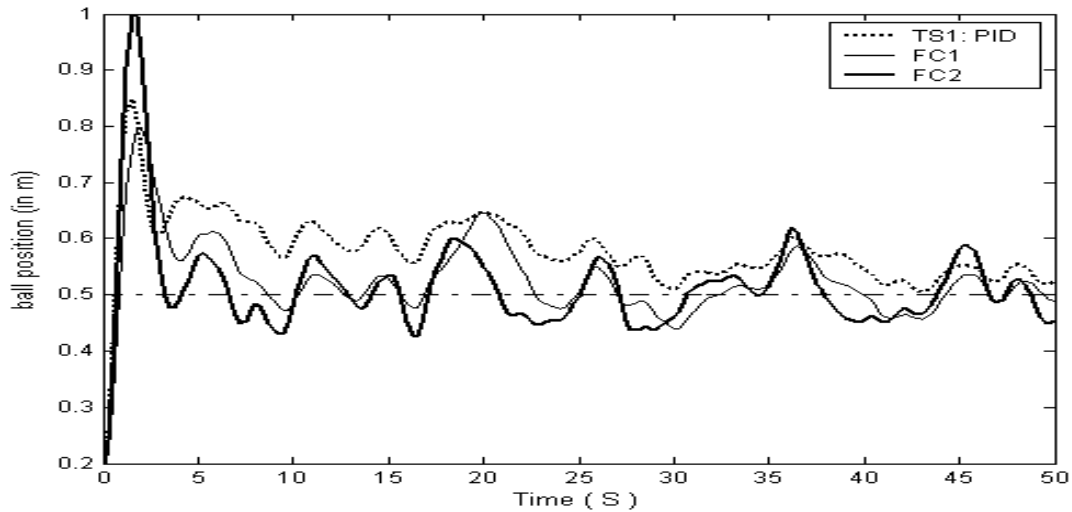


Рис. 6. Движение шарика по доске в типовой ситуации 1

Замечание 2: На рис. 6 английские обозначения обозначают следующее: TS1 – типовая ситуация 1; PID – ПИД-регулятор; FC1 – НР1 с базой знаний 1; FC2 – НР2 с базой знаний 2. Задающий сигнал, равный 0,5 м.

На рисунке 7 показано сравнение интегральной ошибки управления в типовой ситуации для трех типов управления: НР1 и НР2 с переменными коэффициентами усиления и традиционный ПИД с постоянными коэффициентами усиления.

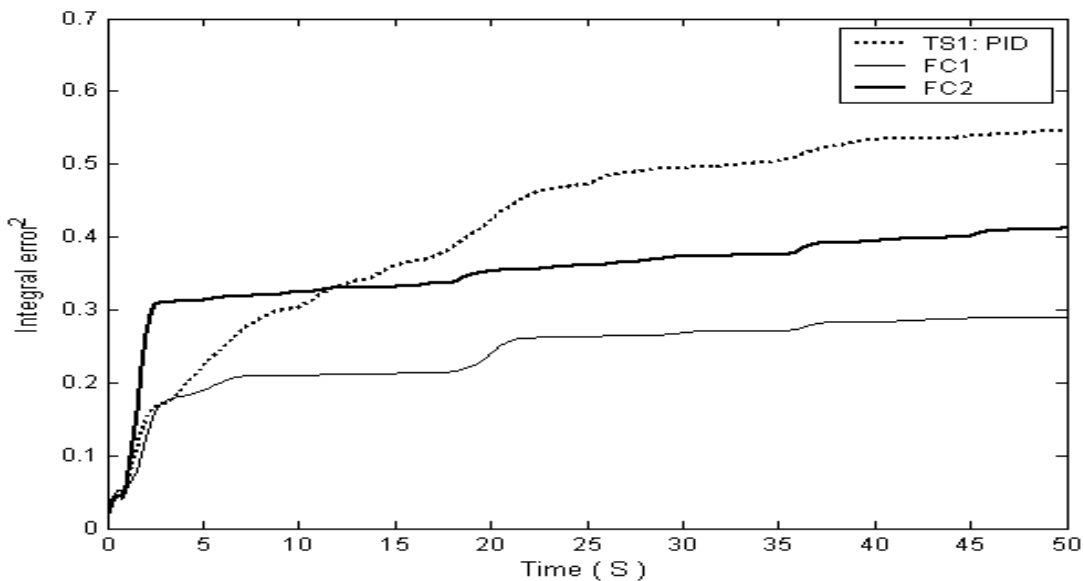


Рис. 7. Сравнение интегральной ошибки управления в типовой ситуации 1

На рисунке 8 показаны законы управления (коэффициенты усиления ПИД-регуляторов) для трех типов управления.

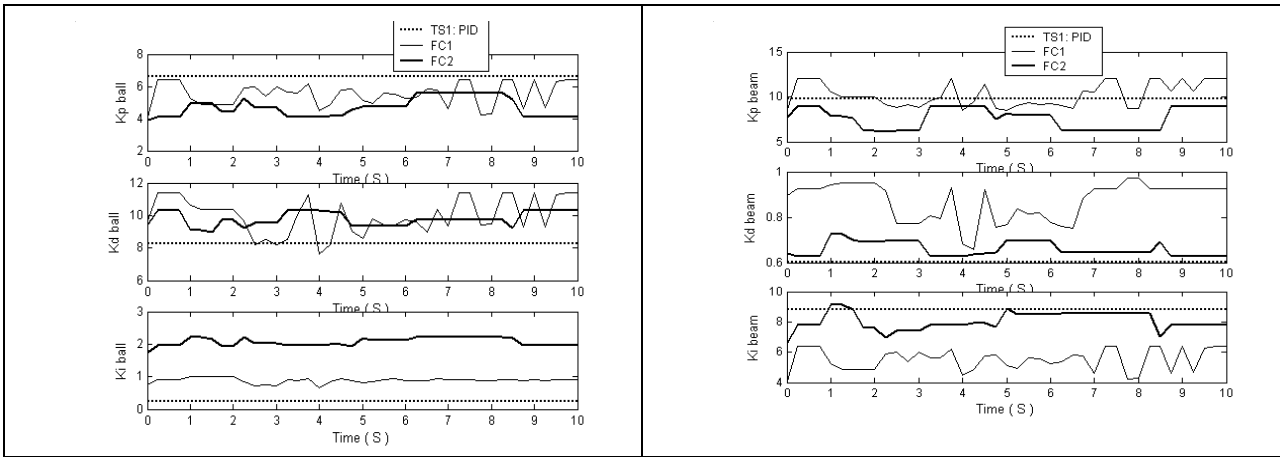


Рис. 8. Законы управления в типовой ситуации 1.

Выводы. Как видно из результатов моделирования, в типовой ситуации 1 лучшей (с точки зрения критерия минимума интегральной ошибки управления) системой управления является нечеткий регулятор НР1.

На рисунке 9 показано сравнение динамического поведения заданного ОУ в новой (непредсказуемой) ситуации, в которой время задержки в канале измерения увеличилось до 0,03 сек.

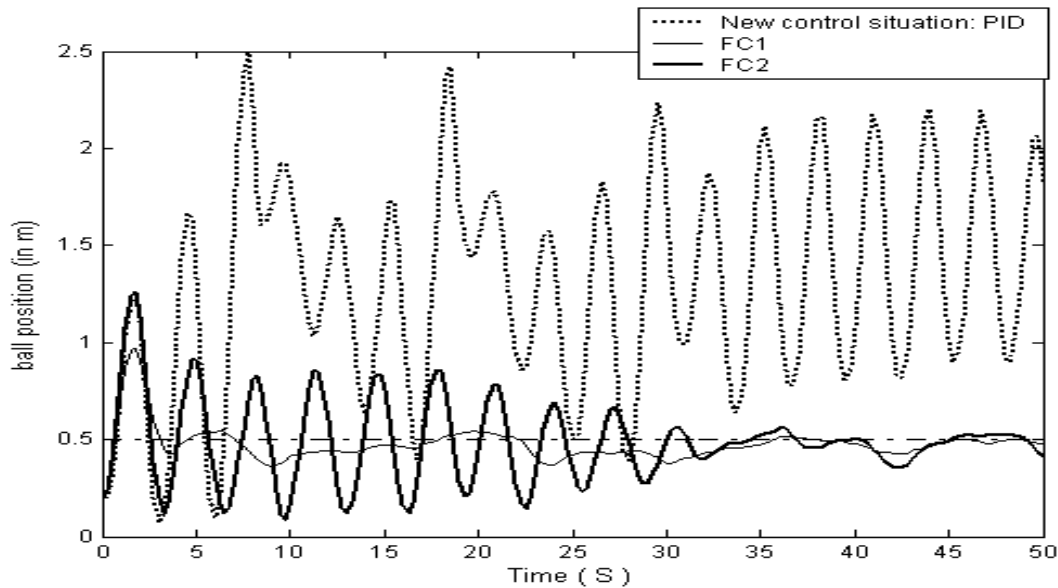


Рис. 9. Движение шарика по доске в новой ситуации

Замечание 3: На рисунке 9 «new control situation» означает новую (непредсказуемую) ситуацию управления.

На рисунке 10 показано сравнение интегральной ошибки управления в новой ситуации для трех типов управления.

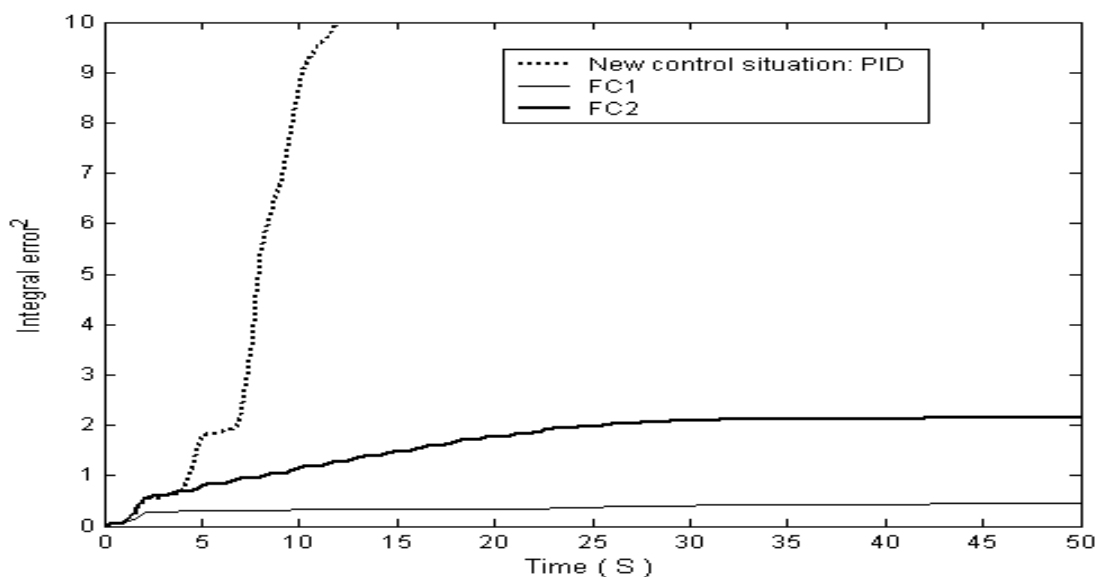


Рис. 10. Сравнение интегральной ошибки управления в новой ситуации

Как видно из результатов моделирования, традиционный ПИД-регулятор плохо справляется с поставленной задачей управления даже в типовой ситуации. В новой же внештатной ситуации ПИД-регулятор просто не справляется с поставленной задачей, и движение ОУ неуправляемо. НР1 с базой знаний 1 успешно решает задачу управления как в типовой, так и новой ситуации. Таким образом, в качестве окончательно спроектированной ИСУ выберем нечеткий регулятор 1.

Заключение

В заключение отметим следующие ключевые моменты применения технологии мягких вычислений в проектировании ИСУ:

- Коэффициенты усиления ПИД-регуляторов являются переменными и описываются в форме законов управления.
- Законы управления формируются на основе Базы Знаний нечеткого ПИД-регулятора.
- Для построения обучающего сигнала используется система стохастического моделирования на основе генетического алгоритма.
- Для построения робастной базы знаний используется множество генетических алгоритмов со сложными функциями пригодности, отражающими динамические, термодинамические критерии, а также критерий управления.
- Оптимизация Базы Знаний реализуется как методами обратного распространения ошибки, так и дополнительными методами оптимизации на базе ГА и сложных критериев качества.

Результаты моделирования динамического поведения рассматриваемого объекта управления («шарик – доска» (beam-ball system)) показали эффективность и робастность спроектированного с помощью ОБЗ нечеткого регулятора. Таким образом, на основе новых видов вычислений и разработанного нового инструментария ОБЗ можно строить робастные интеллектуальные системы управления, способные функционировать на множестве как типовых, так и новых (непредвиденных) ситуаций управления.

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. – 2004. – V. 60.
2. Васильев С.Н., Жерлов А. К., Федосов Е. А. и др. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматгиз, 2000.
3. 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.
4. Wen Yu, Floriberto Otriz. Stability analysis of PD regulation for ball and beam system // Proc. of the 2005 IEEE Conference on Control Applications. – Toronto, Canada, August 28-31, 2005. – Pp. 517-522.
5. Jiang Y. H., McCorkell C., Zmood R. B. Application of neural networks for real time control of a ball-beam system // Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995. – V. 5. – Pp. 2397-2402.