

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАТОРА БАЗ ЗНАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK. Ч. 2.

Тятюшкина Ольга Юрьевна

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.

Приведены результаты моделирования интеллектуальной системы управления глобально неустойчивым объектом «шарик – доска» в условиях непредвиденных ситуаций и информационного риска. Показано преимущество применения разработанного оптимизатора баз знаний перед классическими методами проектирования коэффициентов усиления традиционного регулятора в среде MatLab/Simulink применительно к сложно-структурированным объектам управления.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, генетический алгоритм.

KNOWLEDGE BASE OPTIMIZATOR APPLICATION FOR INTELLIGENT CONTROL SYSTEM DESIGN IN MATLAB/ SIMULINK. PT. 2.

Tyatyushkina Olga

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.

Results of modeling of an intelligent control system of globally unstable object as «beam – ball» in the conditions of unforeseen situations and information risk are presented. Advantage of application developed optimizer of knowledge bases environment of MatLab/Simulink before classical methods is shown.

Keywords: intelligent control system, genetic algorithm.

Введение

В теории автоматического регулирования известны два основных принципа управления: 1) принцип глобальной отрицательной связи (ГОС); и 2) принцип компенсации ошибки управления [1]. Первый принцип обеспечивает устойчивость динамического ОУ. Принцип компенсации ошибки управления обеспечивает управляемость ОУ. При этом критерии качества управления такие как, устойчивость и управляемость находятся в противоречии: а именно увеличение одного качества управления приводит к снижению другого качества управления.

Обеспечение компромиссного соотношения между противоречиями двух критериев качества управления осуществляется методами проектирования оптимального регулятора, позволяющие ввести в неявном виде критерии динамического поведения ОУ. Аналитическое конструирование оптимального регулятора, обеспечивающее в общем уровне требуемый уровень робастности, является алгоритмически неразрешимой проблемой. Поэтому существующий программный инструментарий MatLab/Simulink типа ANFIS не обеспечивает решение задачи проектирование требуемого уровня робастности САУ [2, 4].

Для решения этой проблемы был разработан новый принцип глобальной интеллектуальной обратной связи (ГИОС) для извлечения, обработки и формирования баз знаний (БЗ) нечеткого регулятора (НР), с помощью которого осуществляется оптимальное управление коэффициентами усиления традиционного регулятора и достигается требуемый уровень робастности.

Данный комбинированный принцип управления (сочетание двух обратных связей (ГОС и ГИОС)), позволяет реализовать принцип не разрушения нижнего уровня системы управления, используя его достоинства на верхнем уровне управления.

Основной задачей современной теории управления является разработка и проектирование интеллектуальных систем управления (ИСУ), отвечающих трём основным качествам управления: устойчивости, управляемости и робастности. Эти качества управления обеспечивают требуемую точность управления (минимум ошибки управления) и надёжность работы ОУ в условиях неполной информации о внешних возмущениях, неопределённости структуры ОУ или слабо формализованных факторах, описывающих цели управления (т.е. задающий сигнал).

В данной статье показана возможность повышения эффективности применения инструментария MatLab/Simulink в задачах проектирования робастных ИСУ, функционирующих в условиях неопределённости, нестандартных ситуаций или информационного риска на примере ранее рассмотренной задачи в [3, 4].

1. Глобально неустойчивый объект управления: динамическая система «шарик – доска» (beam – ball system)

Динамическая система «шарик – доска» (beam – ball system) является весьма популярной и широко используемой системой (т.н. benchmark) для изучения моделей управления в теории управления. Система (рис. 1) представляет собой движущийся (с одной степенью свободы) шарик 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.

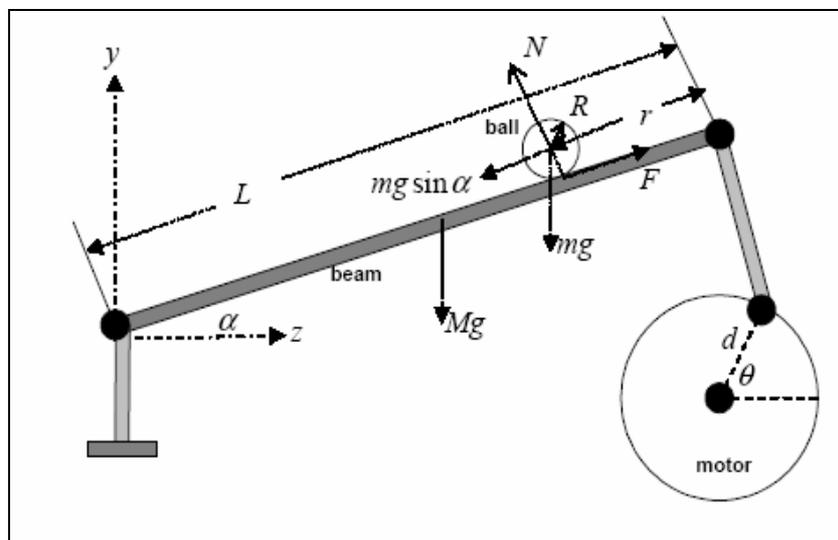


Рис. 1. Иллюстрация динамической системы «шарик – доска»

Динамическое поведение системы «шарик – доска» описывается следующими уравнениями:

$$\ddot{\alpha} = \frac{(\tau(t) + \xi(t)) - 2mr\dot{\alpha} - (mgr + \frac{L}{2}Mg) \cos \alpha}{J + mr^2}, \tag{1}$$

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

где α – угол поворота доски, r – положения шара, L – длина доски, M – масса доски, m – масса шара; $J = I_a + I_b$, где I_a – момент инерции доски ($0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$), I_b – момент инерции шара ($2 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$); N – сила трения, ($F = 0$ в данной модели);

$\xi(t)$ – внешнее стохастическое воздействие на ОУ с заданной функцией плотности распределения случайной величины, $\tau(t)$ – управляющая сила.

1.1. Исследование свободного движения ОУ

На первом шаге исследуем свободное движение ОУ, его динамическое и термодинамическое поведение. Параметры математической модели обозначены как «param» = [m M L J_{beam} g J_{ball}], где m – масса шарика; M – масса доски; L – длина доски; J_{beam} – момент инерции доски; g – гравитационное ускорение; J_{ball} – момент инерции шарика. Рассмотрим следующие параметры модели: $m = 0.06$ [кг]; $M = 0.12$ [кг]; $L = 1$ [м]; $J_{\text{beam}} = 0.02$ [$\text{кг} \cdot \text{м}^2$]; $J_{\text{ball}} = 2/10^6$ [$\text{кг} \cdot \text{м}^2$]; $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$. Переобозначим положение шарика на доске как $r \equiv x$ и угол наклона доски как $\alpha \equiv z$. Рассмотрим также следующие начальные данные: $[x_0, \dot{x}_0] = [0.2 \text{ (м)} \ 0]$; $[z_0, \dot{z}_0] = [10 \text{ (градусы)} \ 0]$.

На рис. 2 и 3 показано динамическое поведение данного объекта управления в заданных выше условиях.

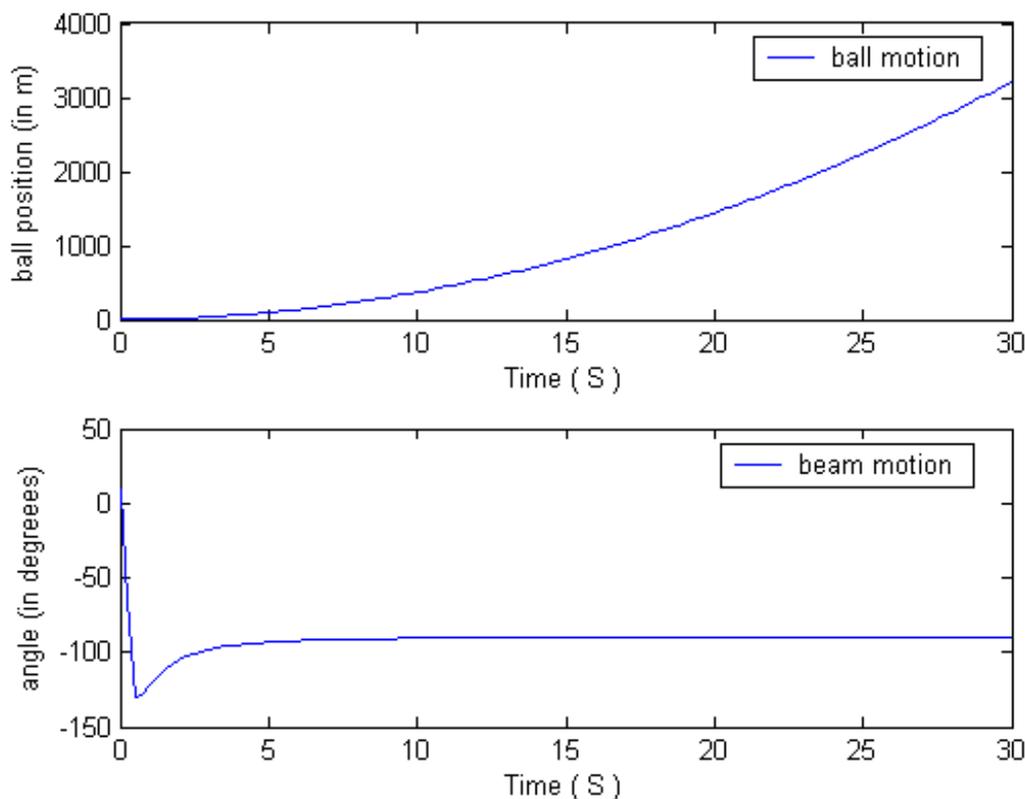


Рис. 2. Система «шарик – доска». Свободное движение

Заключение. Как видно из приведенных выше результатов моделирования свободного движения, динамическая система (1) обладает глобальной динамической неустойчивостью по обобщенной координате r (оси x). При отсутствии управляющей силы происходит неограниченный рост положения шарика, т.е. шарик падает с доски.

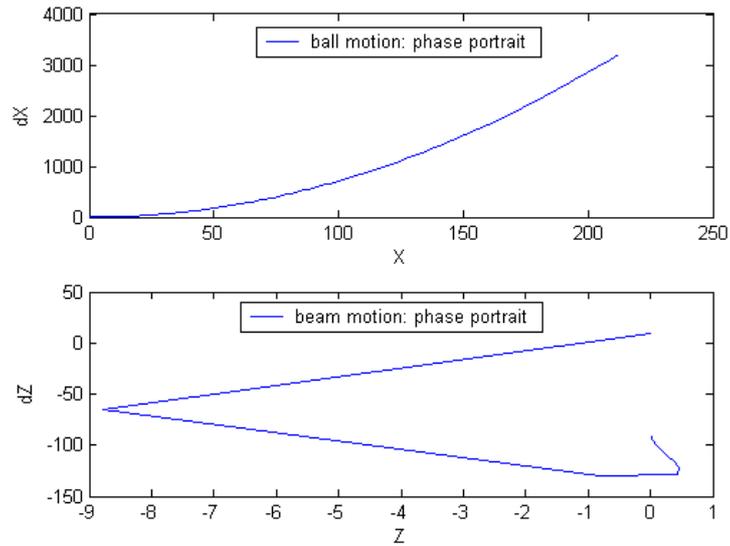


Рис. 3. Система «шарик – доска». Свободное движение. Фазовый портрет

1.2. Стохастическое моделирование

Исследуем движение данного ОУ при различных внешних шумах, показанных на рис. 4.

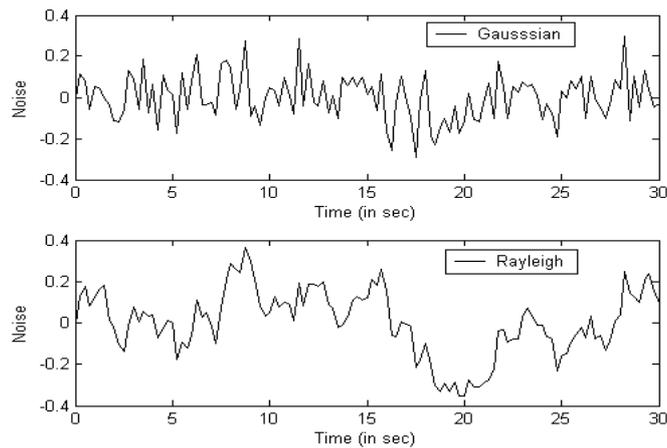
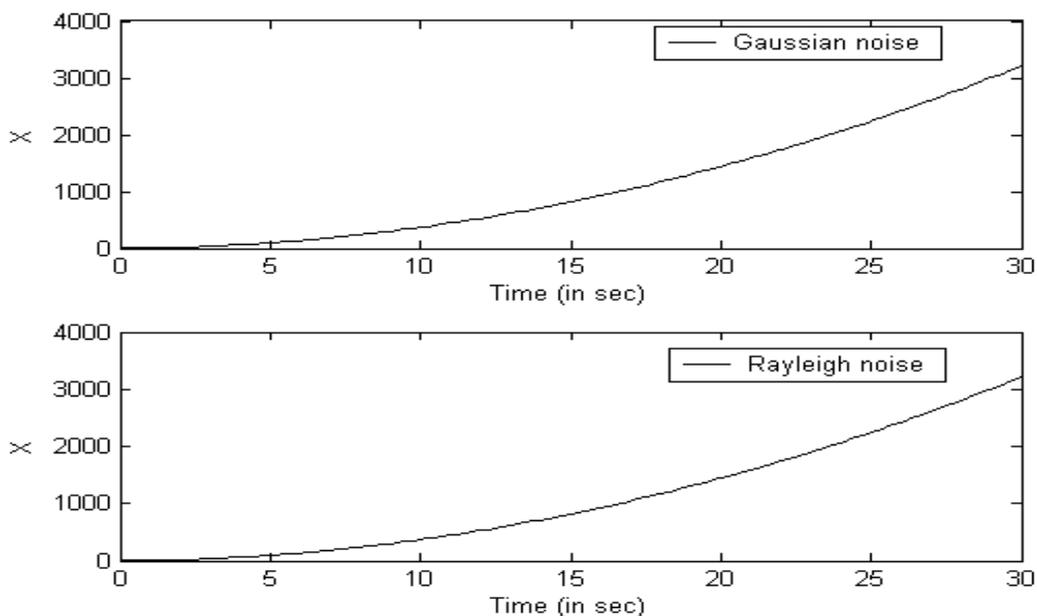
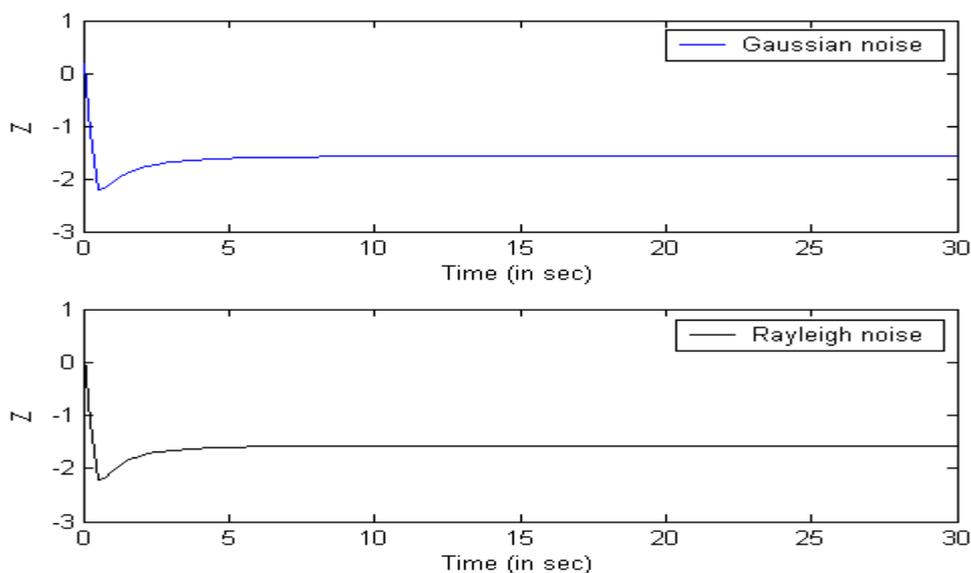


Рис. 4. Гауссовский (вверху) и Рэлеевский (внизу) стохастические шумы

Очевидно, что при наличии шумов движение системы по оси x имеет неограниченный рост. На рис. 5 (а и б) показано динамическое поведение данного ОУ в условиях шумов, показанных на рис. 4.



(а) Движение шарика



(б) Движение доски

Рис. 5. Система «шарик – доска». Стохастическое движение

Задача управления

Задачей управления является удержание (стабилизация) шара в положении центра доски ($x_{ref} = 0.5$) и при этом наклон доски должен быть нулевым ($z_{ref} = 0$). Введем также следующие ограничения на силу управления $|\tau| \leq 5$.

Примечание. Это сложная задача управления, так как шарик не находится в одном положении, а движется с ускорением пропорциональным наклону доски. Существует несколько решений заданной задачи управления классическими методами. Например в работе [6] рассматривается решение задачи управления с помощью т.н. модифицированного ПД-регулятора, а также разработано несколько интеллектуальных контроллеров таких, как нечеткий регулятор [5], нейронный контроллер, нечеткий нейронный регулятор [7]. Однако, эти разработки сделаны для случая отсутствия задержки

времени в контуре управления, отсутствия внешних стохастических воздействий и ограничений на силу управления.

Рассмотрим следующую модель управления:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_{PID}(beam) - \tau_{PID}(ball) = \\ &= (K_P^{beam} \cdot e_{beam} + K_D^{beam} \cdot \dot{e}_{beam} + K_I^{beam} \int e_{beam}) - \\ &- (K_P^{ball} \cdot e_{ball} + K_D^{ball} \cdot \dot{e}_{ball} + K_I^{ball} \int e_{ball}). \end{aligned} \tag{2}$$

В соответствии со схемой управления (2) будем использовать два ПИД-регулятора.

Моделирование разработанной модели ИСУ и ОУ осуществлялось в системе Matlab/Simulink версии 6.5, как показано на рис. 6.

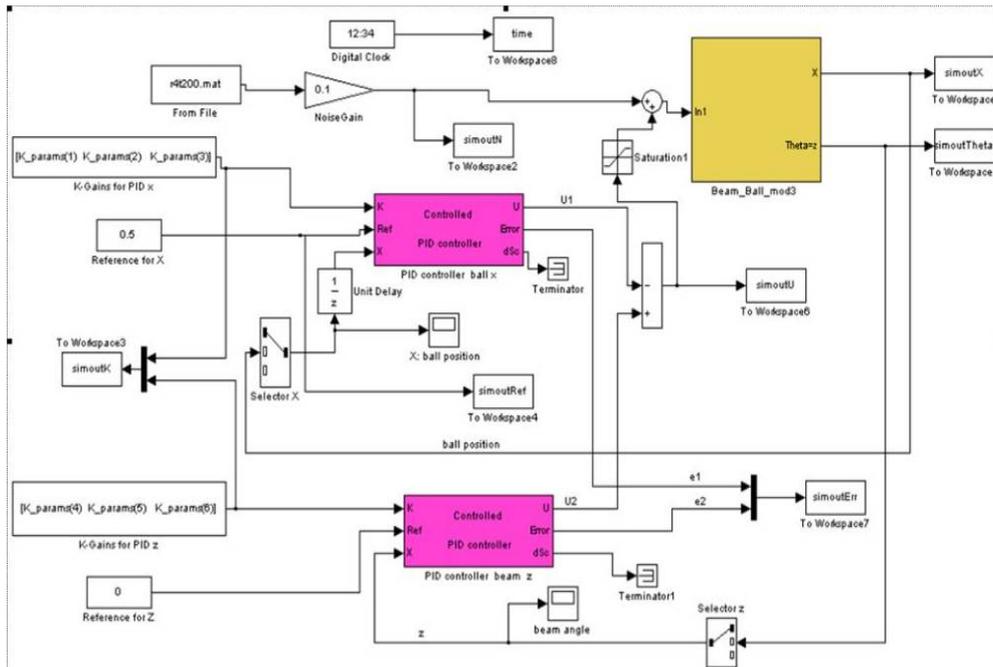


Рис. 6. Система «шарик – доска». Матлаб-Симулинк структура ПИД управления

2. Исследование классического ПИД управления в различных условиях

Рассмотрим различные варианты структур классического управления, а именно ПД и ПИД управление. Для данного глобально неустойчивого ОУ подобрать «вручную» коэффициенты усиления даже в простейшем случае (при отсутствии шумов и времени задержки в канале измерения) трудно. Поэтому будем искать эти коэффициенты с помощью ГА. Назовем этот процесс «настройкой ПИД» (PID TUNING).

Поиск коэффициентов усиления в классическом ПИД управлении с помощью генетического алгоритма

Для этого процесса будем использовать следующую функцию пригодности (запись в МатЛаб): $y = -\text{sum}(\text{sum}([\text{simoutErr}(:, [1 \quad 4])].^2)) / \text{Norm} - \text{sum}(\text{sum}([\text{simoutErr}(:, [2 \quad 5])].^2)) / \text{Norm} + \text{tout}(\text{end})$, где simoutErr – вектор ошибки управления (размерность вектора = 6, смотри структуру на рис. 5).

Рассмотрим также следующее пространство поиска значений коэффициентов усиления $K = [10 \ 10 \ 10]$, и *время управления* = 0.25 сек.

Для ПД-управления пространство поиска значений коэффициентов усиления $K = [10 \ 10 \ 0]$.

Для ПИД-управления пространство поиска значений коэффициентов усиления $K = [10 \ 10 \ 10]$. Внешние условия TS00: отсутствие шумов и отсутствие времени задержки в канале измерения.

Результаты поиска:

$K = [9.0719 \ 9.7680 \ 0 \ 9.8453 \ 1.3762 \ 0]$ для ПД-управления;

$K = [6.0168 \ 9.6906 \ 2.9230 \ 9.7680 \ 1.2602 \ 5.0500]$ для ПИД-управления.

3. Сравнение качества управления и выбор структуры управления для условий TS00

На рис. 7 и 8 показано движение системы «шарик – доска» с ПД- и ПИД- управлением в условиях TS00.

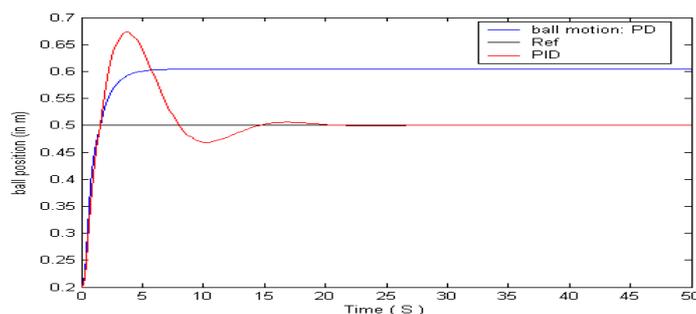


Рис. 7. Движение шарика на доске

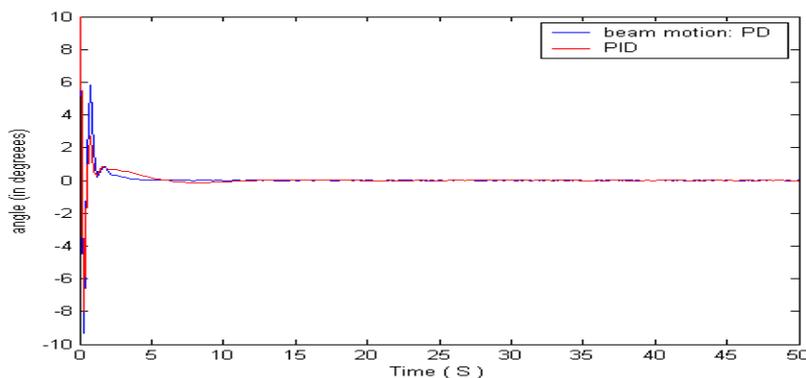


Рис. 8. Движение доски

Из рисунка видно, что в случае ПИД управления, управление успешно – шарик удерживается в центре доски и угол наклона доски держится в 0 градусов. В случае ПД-управления шарик «не слетает с доски», но находится не в центре доски ($x_{ref} = 0.5$), а в положении $x = 0.6$.

Примечание. На рисунках ниже PD означает ПД-регулятор, PID – ПИД-регулятор, Ref – задающий сигнал (цель управления).

3.1. Внешние условия TS01: наличие стохастического шума и отсутствие времени задержки в канале измерения

В качестве внешнего шума выбран Рэлеевский шум, показанный на рис 5.6.4.

$K = [9.0719 \ 9.7680 \ 0 \ 9.8453 \ 1.3762 \ 0]$ для ПД-управления;

$K = [6.0168 \ 9.6906 \ 2.9230 \ 9.7680 \ 1.2602 \ 5.0500]$ для ПИД-управления.

Сравнение качества управления и выбор структуры управления для условий TS01

На рис. 9 и 10 показано движение системы «шарик – доска» с ПД- и ПИД- управлением в условиях TS01.

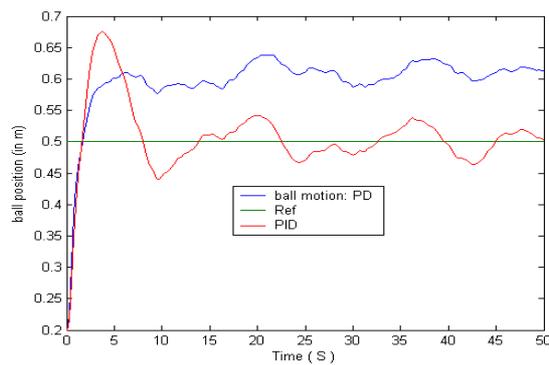


Рис. 9. Движение шарика на доске в условиях TS01

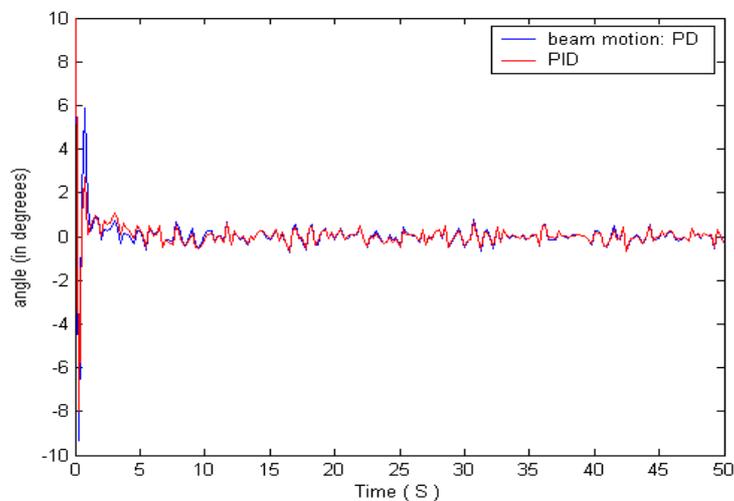


Рис. 10. Движение доски в условиях TS01

3.2. Внешние условия TS02: отсутствие стохастического шума, наличие времени задержки в канале измерения и наличие ограничений на силу управления

В данных условиях моделируется время задержки в канале измерения движения шарика, равное 0.005 сек. При этом ограничение на силу управления – следующее: $|\tau| \leq 10 (N)$.

$K = [7.6355 \ 8.5043 \ 0 \ 9.2534 \ 2.6027 \ 0]$ для ПД-управления;

$K = [6.6355 \ 8.2598 \ 0.2547 \ 9.7680 \ 0.6027 \ 8.8012]$ для ПИД-управления

Сравнение качества управления и выбор структуры управления для условий TS02

На рис. 11 и 12 показано движение системы «шарик – доска» с ПД- и ПИД- управлением в условиях TS02.

Вывод. В качестве структуры управления нижнего уровня выберем ПИД-регулятор.

4. Проектирование интеллектуального управления (Smart control design)

Для поставленной выше задачи управления определим структуру ИСУ. Она состоит из *нечеткого регулятора*, управляющего двумя ПИД-регуляторами, действующими вдоль осей координат x и z . Матлаб-Симулинк структура ИСУ для данного ОУ показана на рис. 13.

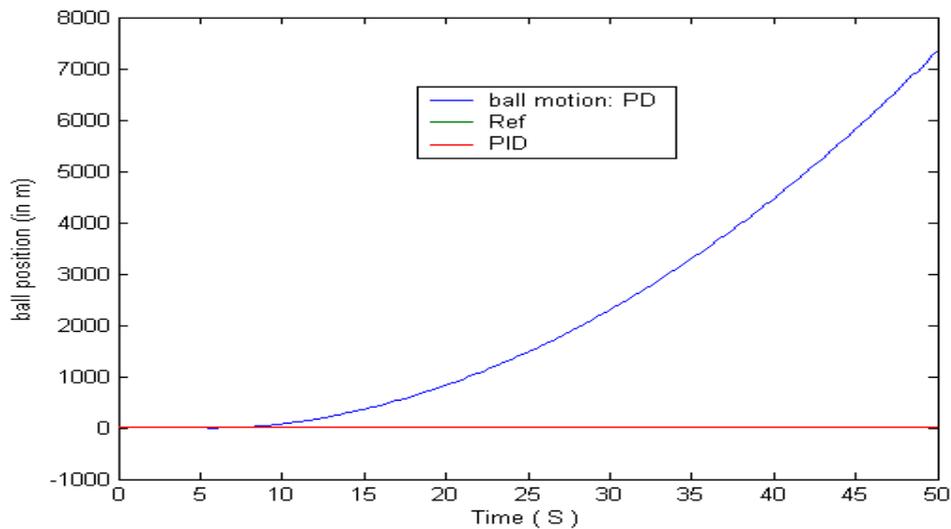


Рис. 11. Движение шарика на доске в условиях TS02

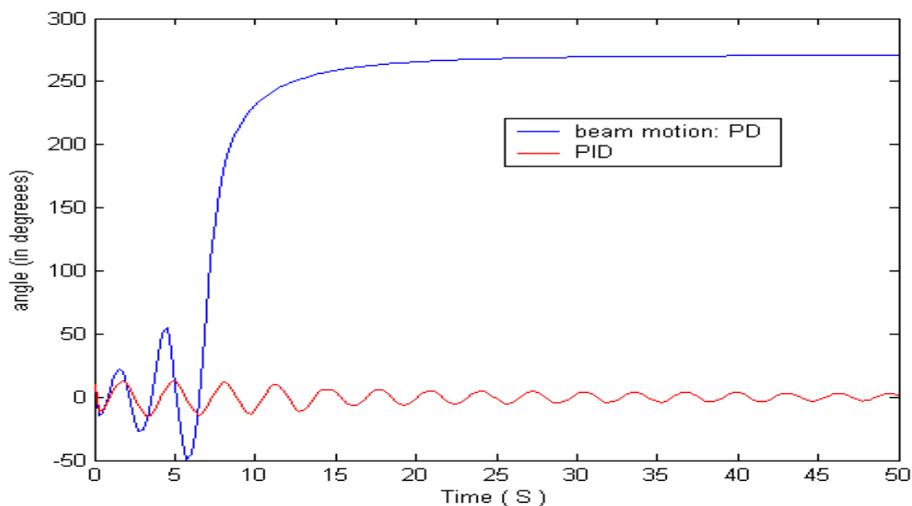


Рис. 12. Движение доски в условиях TS02

Опишем две типовых (обучающих) ситуации для проектирования баз знаний.

TS1:

- Рэлеевский шум (рис. 4);
- параметры модели: $m = 0.06$ [кг]; $M = 0.12$ [кг]; $L = 1$ [м]; $J_{beam} = 0.02$ [кг·м²]; $J_{ball} = 2 \cdot 10^6$ [кг·м²];
- начальное положение: $[x_0, \dot{x}_0] = [0.2$ (м) 0]; $[z_0, \dot{z}_0] = [10$ (градусы) 0];
- задающие сигналы: $x_{ref} = 0.5$, $z_{ref} = 0$;
- задержка по времени в канале измерения = 0.005 сек;

- ограничение на силу управления: $|\tau| \leq 10 (N)$

TS2:

- Гауссовский шум (рис. 4);
- остальные факторы – те же, что и в TS1 ситуации.

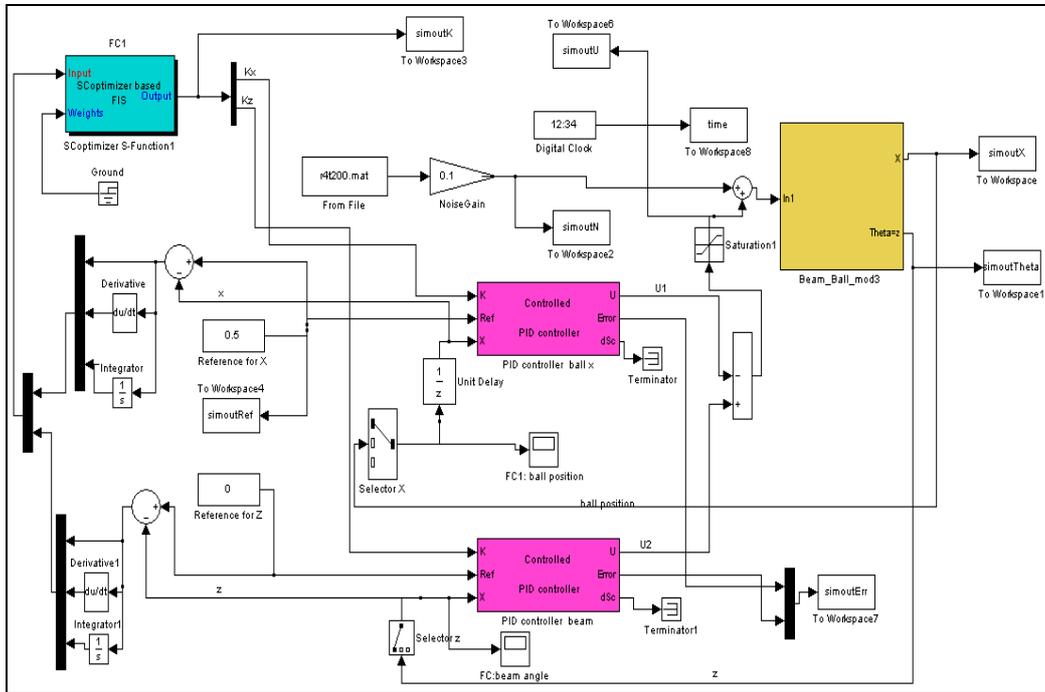


Рис. 13. Матлаб-Симулинка структура ИСУ для системы «шарик – доска»

4.1. Построение нечеткой нейронной сети на основе ОБЗ для обучающей ситуации TS1

Входом ННС является шесть переменных: $\{e_x, \dot{e}_x, \int e_x, e_z, \dot{e}_z, \int e_z\}$, а выходом является шесть переменных: $\{(K_p, K_D, K_I)_x, (K_p, K_D, K_I)_z\}$.

Процесс построения БЗ1 на базе ОБЗ инструментария описывается следующим образом:

- создание лингвистических переменных с помощью ΓA_1 : число функций принадлежности для каждой входной переменной равно 8, 8, 7, 9, 8, 9;
- полное число нечетких правил = 290304 правил;
- отбор правил: с помощью «суммарного» критерия, БЗ состоит из 105 правил;
- оптимизация БЗ с помощью ΓA_2 и Матлаб-оптимизации на основе математической модели;
- обучение БЗ с помощью алгоритма обратного распространения ошибки.

На рис. 14 показано представление БЗ1 для обучающей ситуации TS1 в инструментарии ОБЗ.

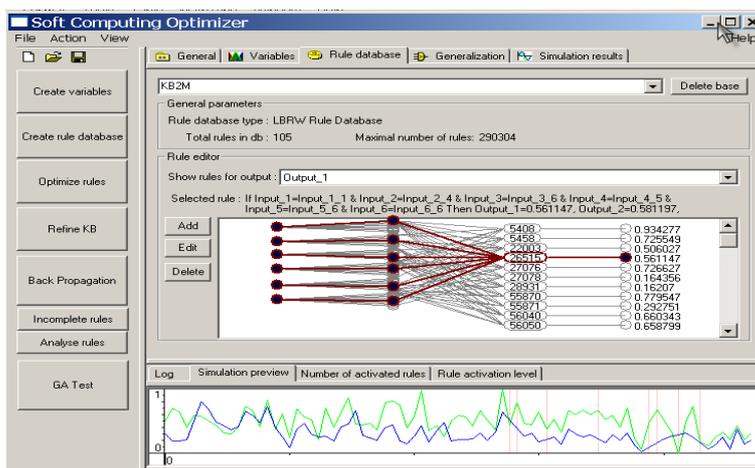


Рис. 14. База Знаний для НР1

4.2. Построение нечеткой нейронной сети на основе ОБЗ для обучающей ситуации TS2

Процесс построения БЗ2 на базе ОБЗ инструментария описывается следующим образом:

- создание лингвистических переменных с помощью ΓA_1 : число функций принадлежности для каждой входной переменной равно 9, 9, 5, 9, 9, 6;
- полное число нечетких правил = 196830 правил;
- отбор правил: с помощью «суммарного» критерия, БЗ состоит из 87 правил;
- оптимизация БЗ с помощью ΓA_2 и Матлаб-оптимизации на основе математической модели;
- обучение БЗ с помощью алгоритма обратного распространения ошибки.

На рис. 15 показано представление БЗ2 для обучающей ситуации TS2 в инструментарии ОБЗ.

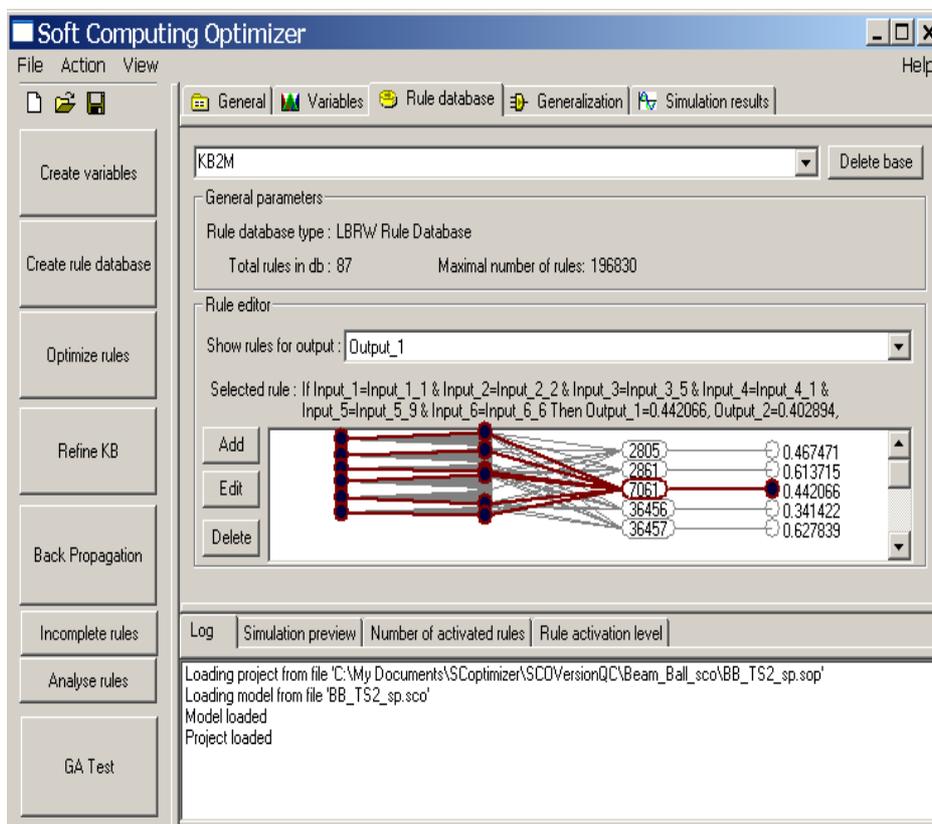


Рис. 15. База Знаний для НР2

4.3. Сравнение качества управления НР1, НР2 и классического ПИД управления

Рассмотрим результаты моделирования движения данного ОУ под управлением трех типов:

- НР1 с построенной базой знаний 1;
- НР 2 с построенной базой знаний 2;
- классический ПИД-регулятор с коэффициентами усиления $K = [4.45 \ 9.98 \ 1.76 \ 8.48 \ 0.82 \ 7.71]$, найденными с помощью ГА для ситуации TS1.

Ситуация управления TS1

На рис. 16-19 показано динамическое поведение ОУ под управлением указанных выше типов управления для обучающей ситуации TS1.

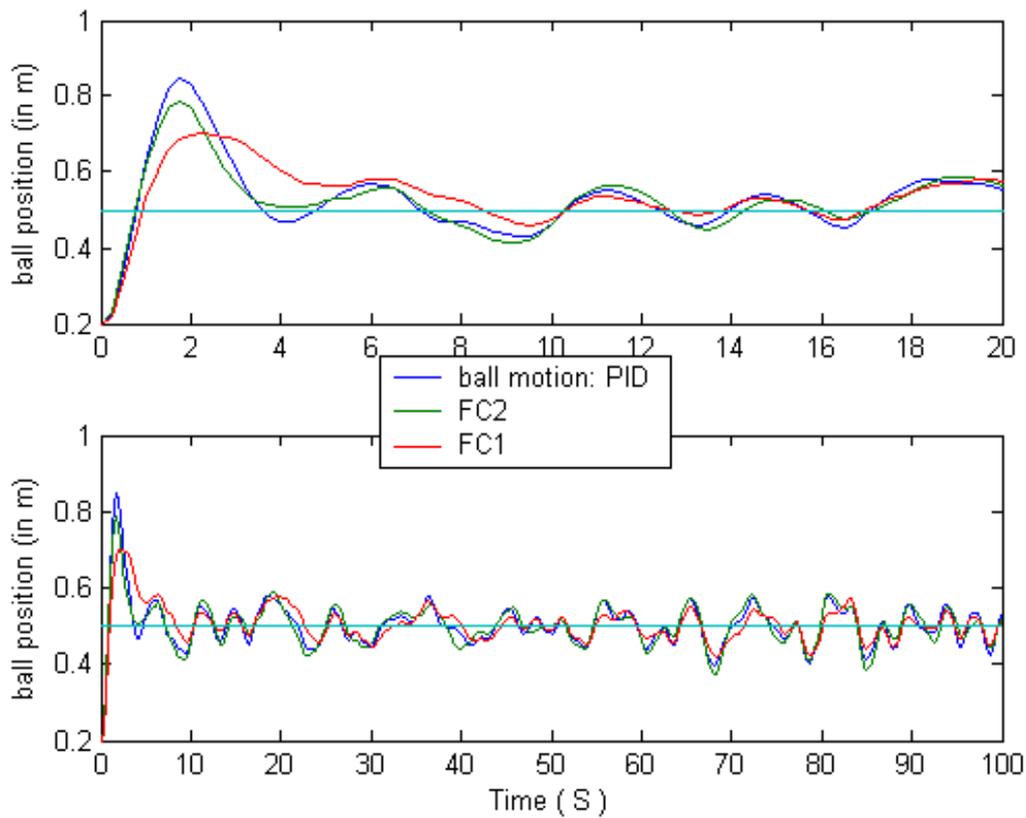


Рис. 16. Движение шарика на доске в условиях TS1

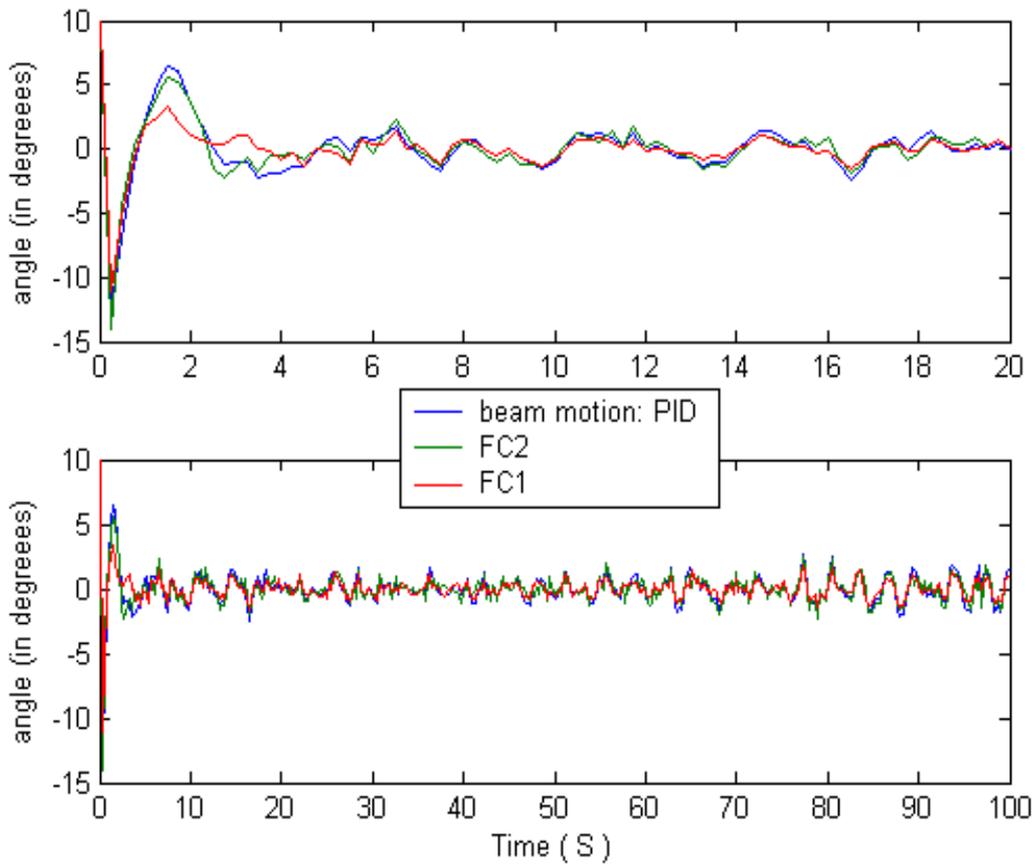


Рис. 17. Движение доски в условиях TS1

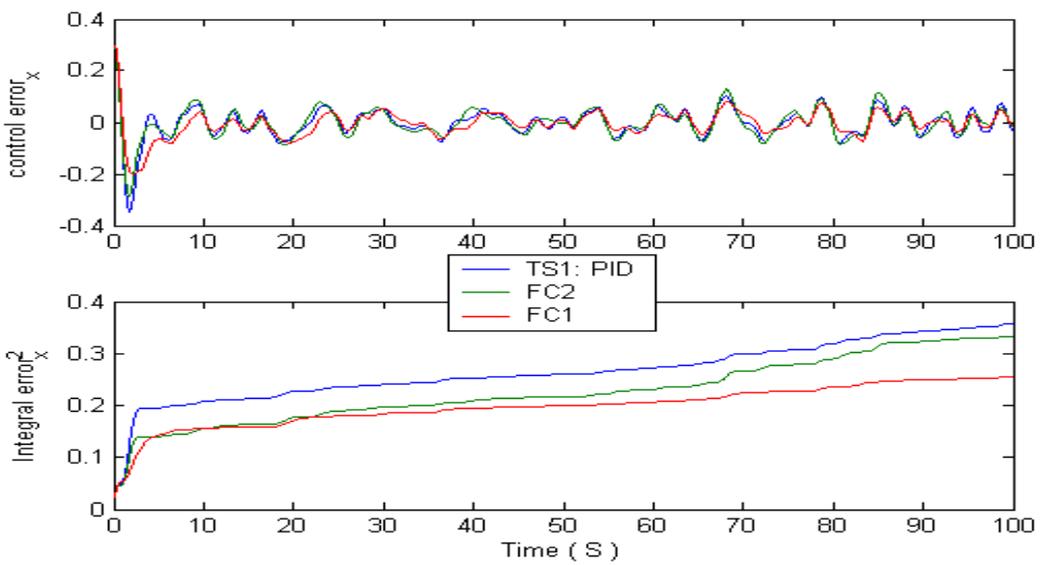


Рис. 18. Система «шарик – доска». Ошибка управление по оси x

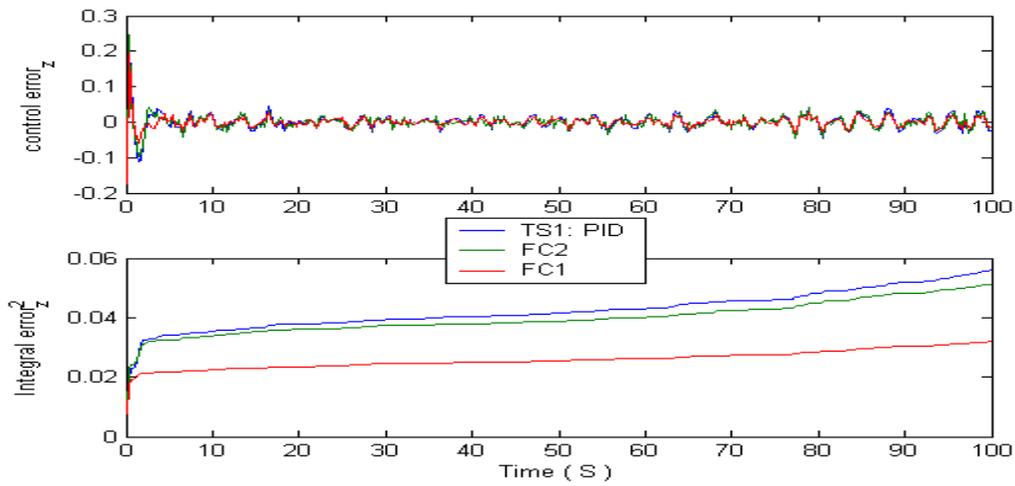


Рис. 19. Система «шарик – доска». Ошибка управление по оси z

На рис. 20-22 показаны законы управления (переменные коэффициенты усиления), вычисляемые на каждом шаге управления как результат нечеткого вывода с выбранной БЗ, а также силы управления.

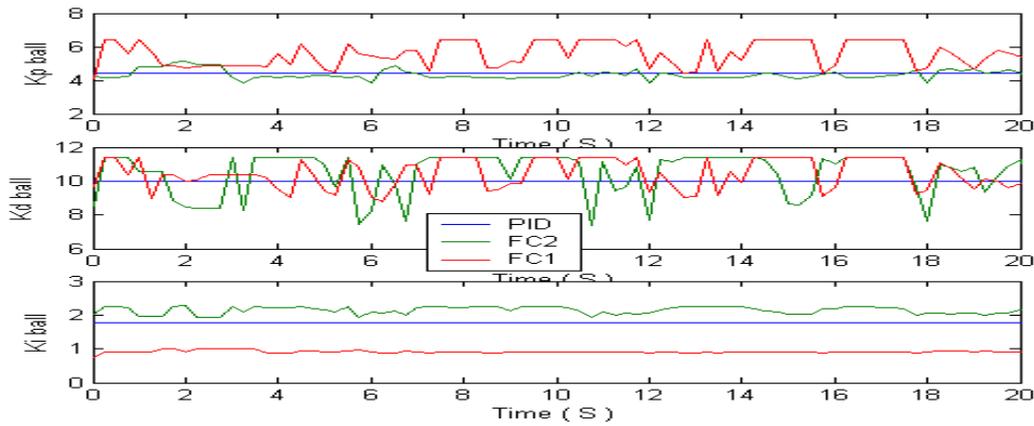


Рис. 20. Законы управления движением шарика в ситуации TS1

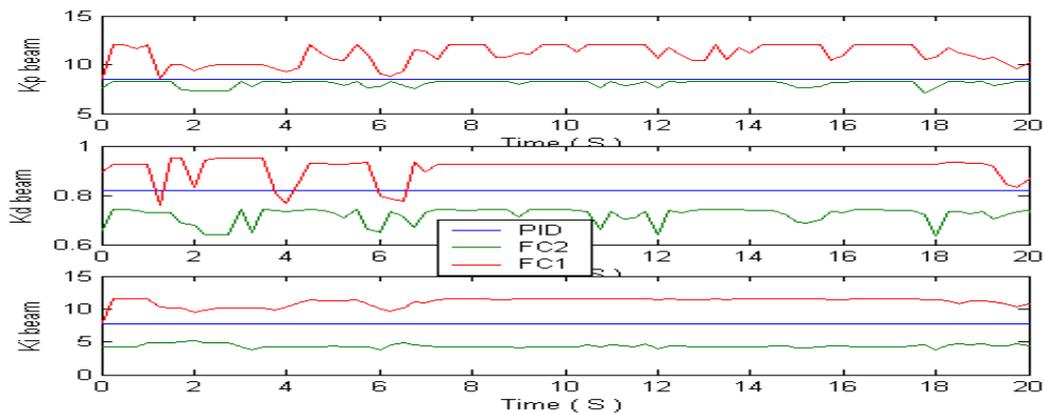


Рис. 21. Законы управления движением доски в ситуации TS1

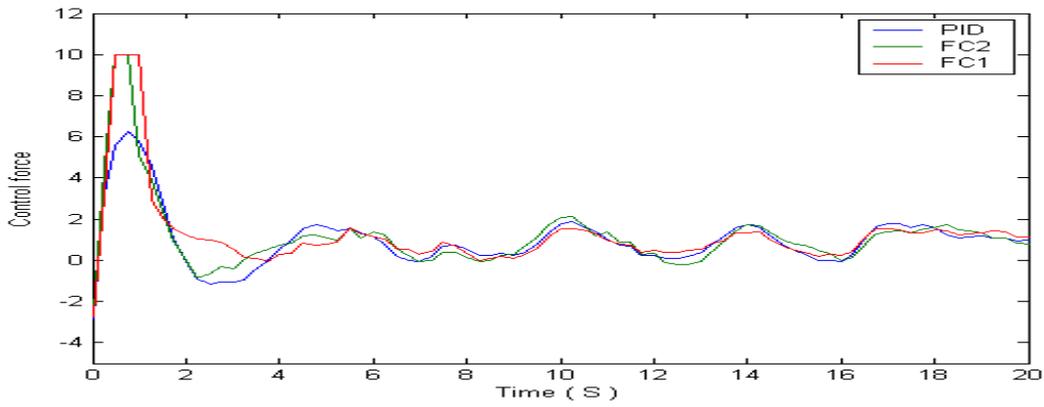


Рис. 22. Силы управления в ситуации TS1

Вывод: в ситуации TS1 НР1 показывает лучшее качество управления.

Ситуация управления TS2

На рис. 23-26 показано динамическое поведение ОУ под управлением указанных выше типов управления для обучающей ситуации TS2.

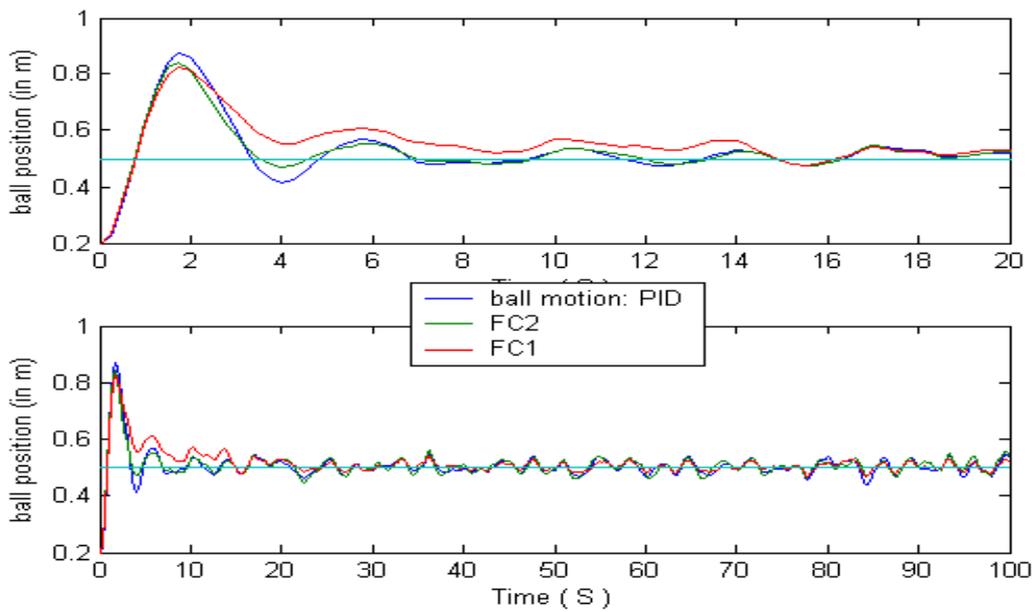


Рис. 23. Движение шарика на доске в условиях TS2

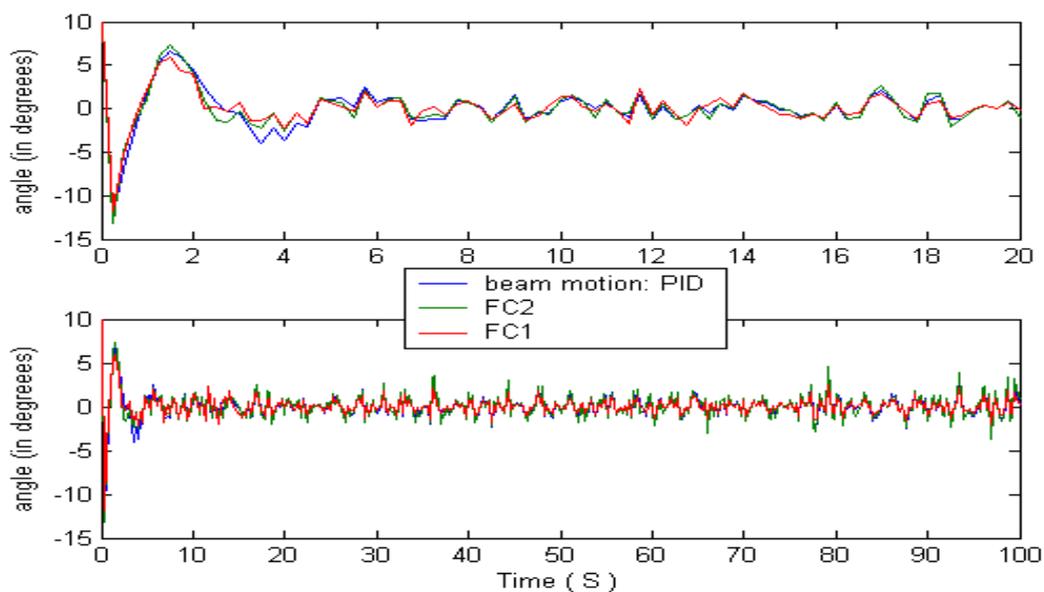


Рис. 24. Движение доски в условиях TS2

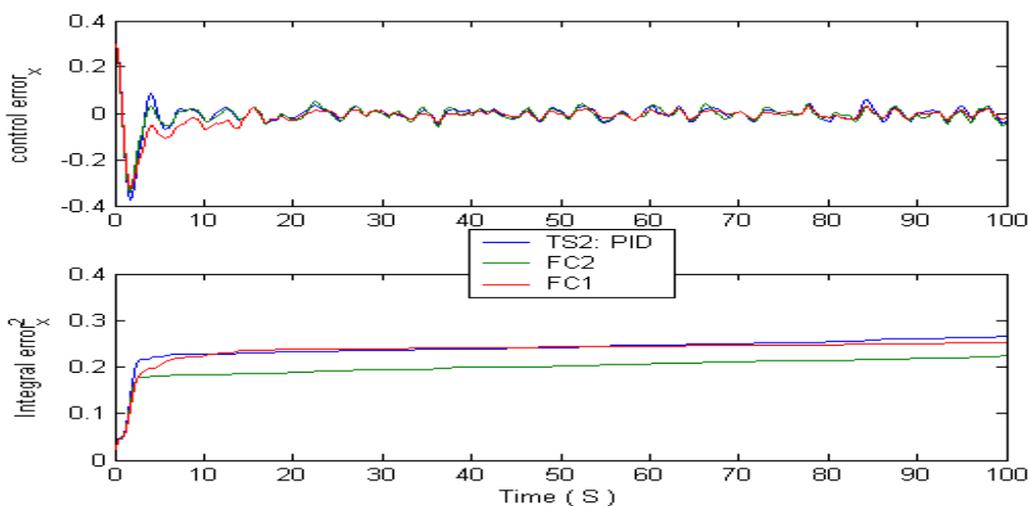


Рис. 25. Система «шарик – доска». Ошибка управление по оси x

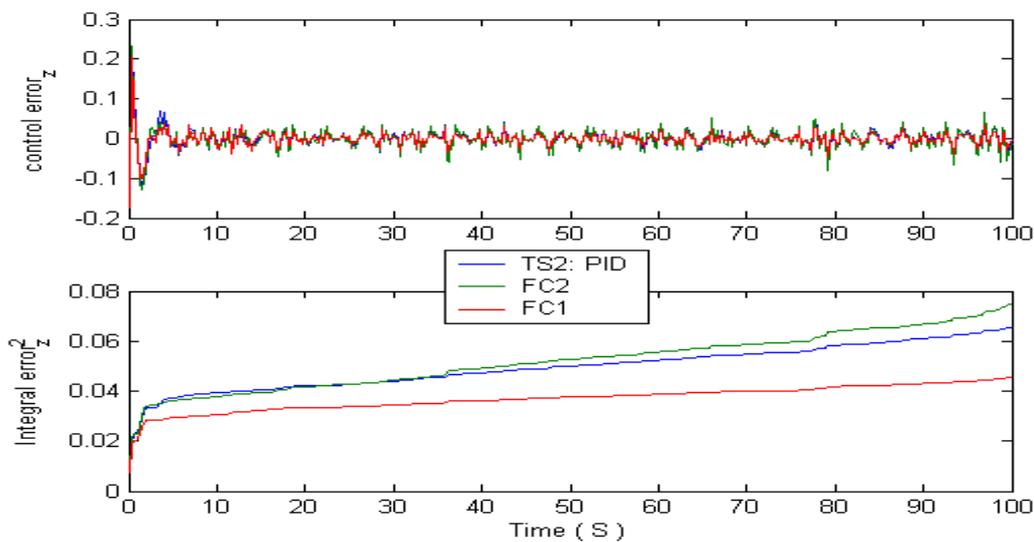


Рис. 26. Система «шарик – доска». Ошибка управление по оси z

На рис. 27-29 показаны законы управления (переменные коэффициенты усиления), вычисляемые на каждом шаге управления как результат нечеткого вывода с выбранной БЗ, а также силы управления.

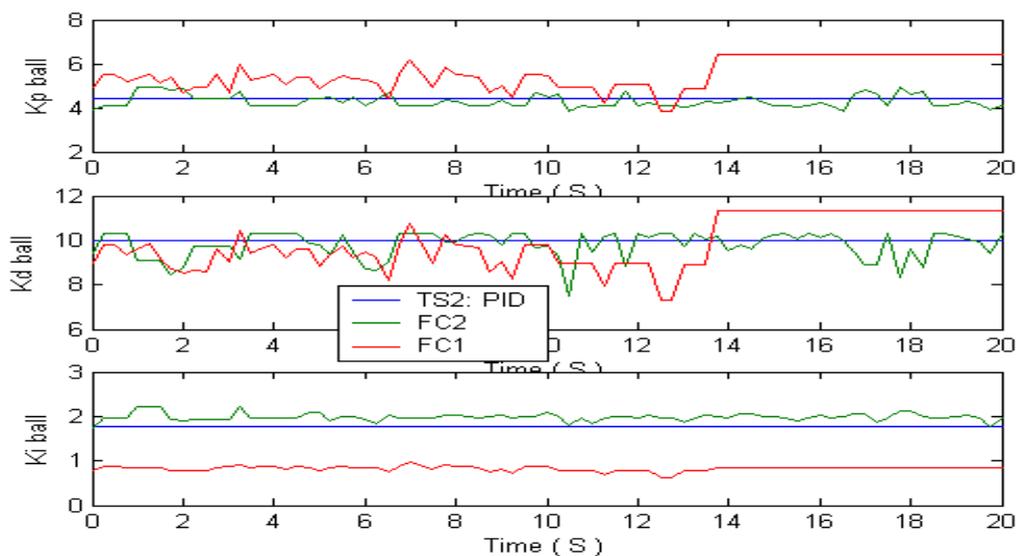


Рис. 27. Законы управления движением шарика в ситуации TS2

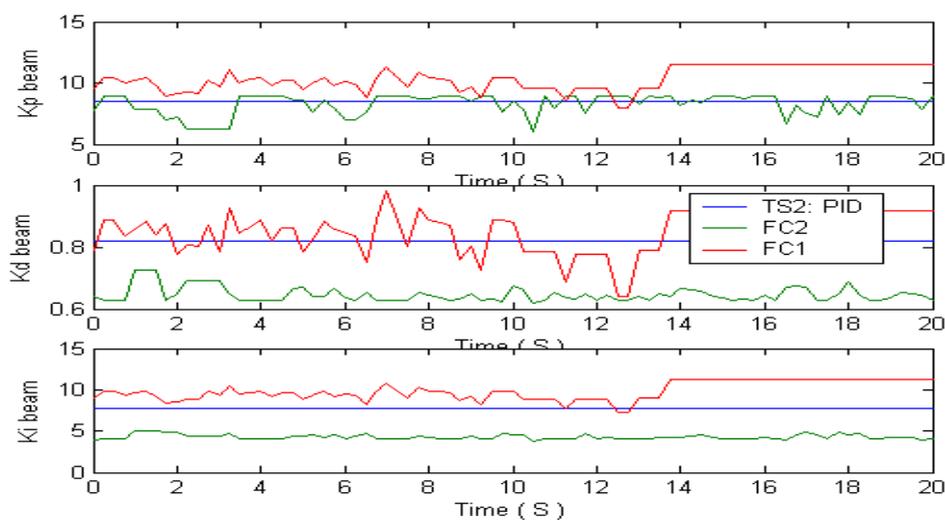


Рис. 28. Законы управления движением доски в ситуации TS2

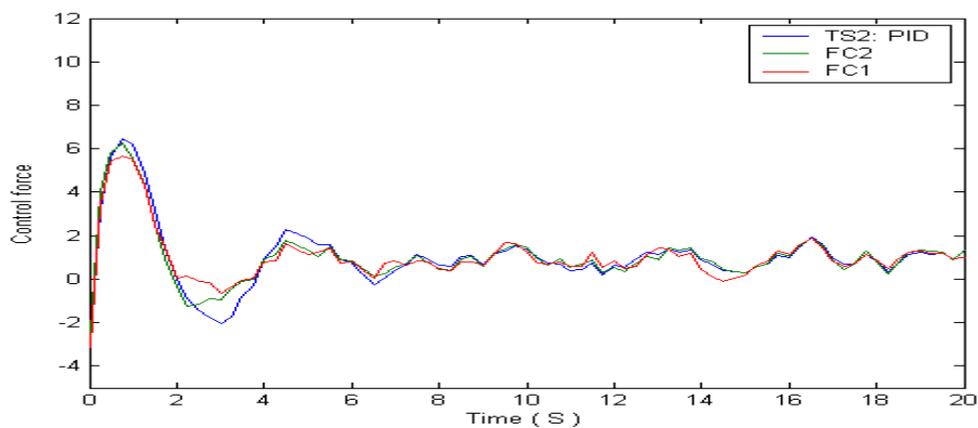


Рис. 29. Силы управления в ситуации TS2

Вывод: в ситуации TS2 HP2 показывает лучшее качество управления.

5. Исследование робастности построенных баз знаний и сравнение с ПИД управлением

Рассмотрим новую ситуацию (S0), характеризующуюся следующими параметрами:

- новый внешний шум – равномерно распределенный (рис. 30);
- новое время задержки в системе измерения положения шарика равное 0.05 сек;
- новые ограничения на силу управления: $|\tau| \leq 5 (N)$;
- остальные факторы – те же, что и в TS1 ситуации.

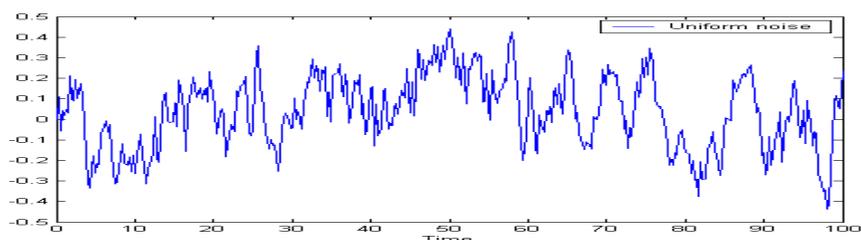


Рис. 30. Равномерно распределенный стохастический шум

Новая Ситуация управления S0

На рис. 31-34 показано динамическое поведение ОУ под управлением указанных выше типов управления для обучающей ситуации S0.

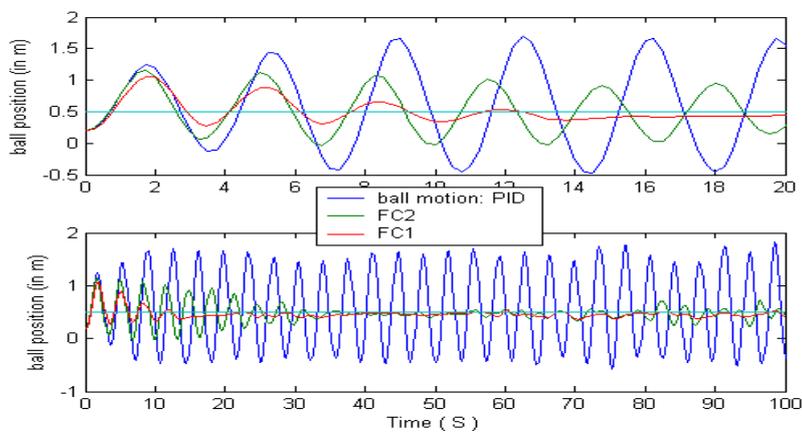


Рис. 31. Движение шарика на доске в условиях S0

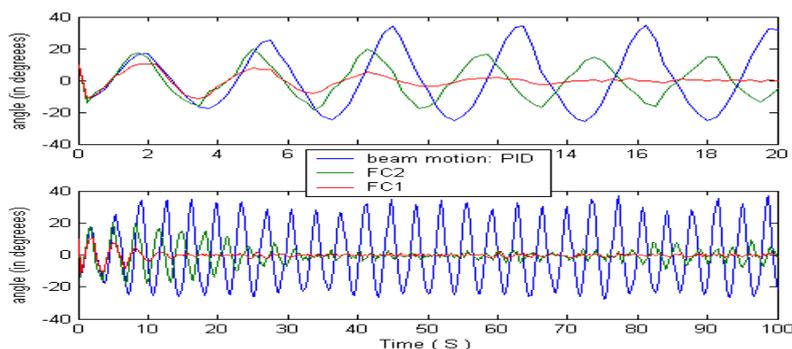


Рис. 32. Движение доски в условиях S0 под управлением трех типов

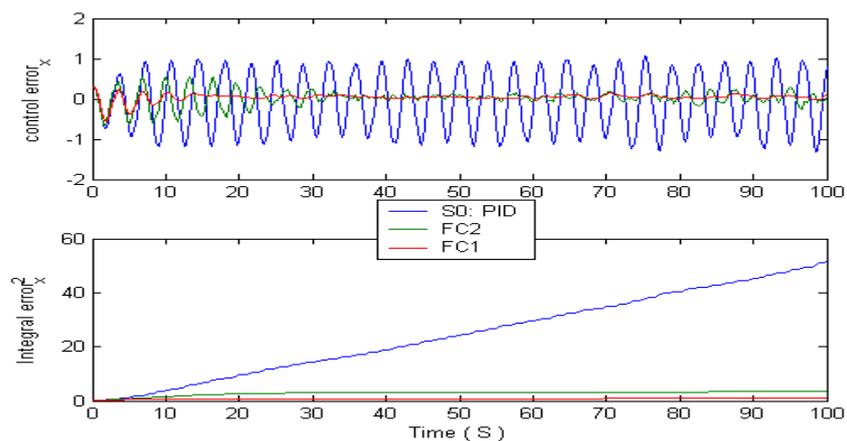


Рис. 33. Система «шарик – доска». Ошибка управление по оси x

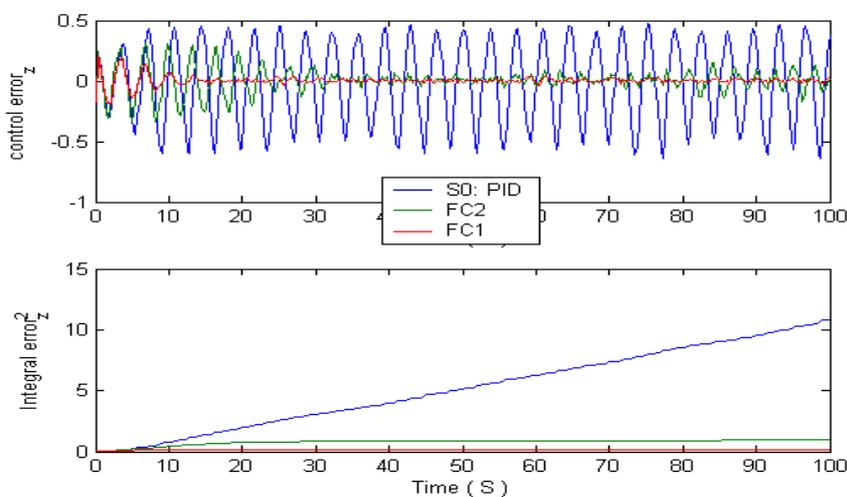


Рис. 34. Система «шарик – доска». Ошибка управление по оси z

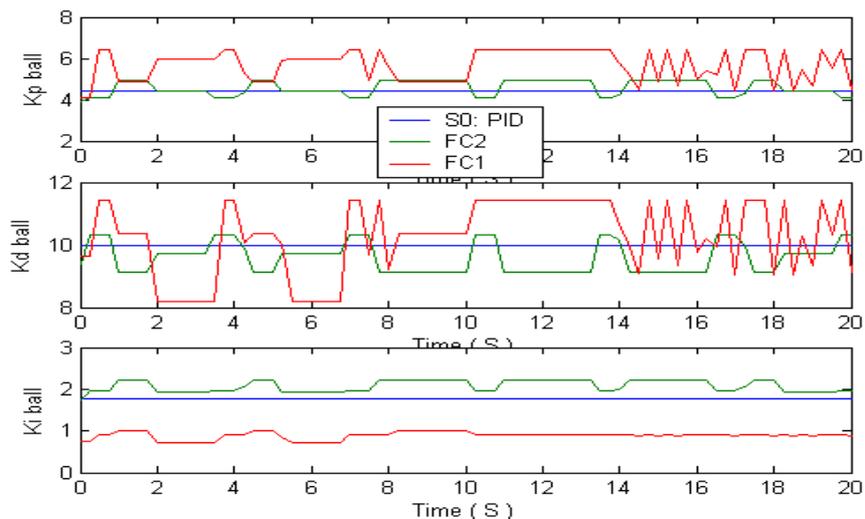


Рис. 35. Законы управления движением шарика в ситуации S0

На рис. 35-37 показаны законы управления (переменные коэффициенты усиления), вычисляемые на каждом шаге управления как результат нечеткого вывода с выбранной БЗ, а также силы управления.

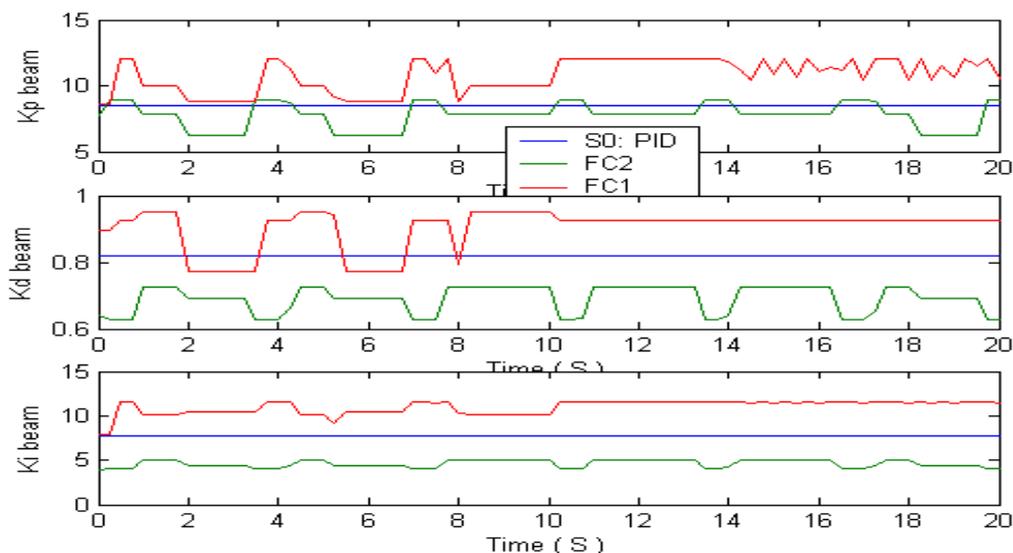


Рис. 36. Законы управления движением шарика в ситуации S0

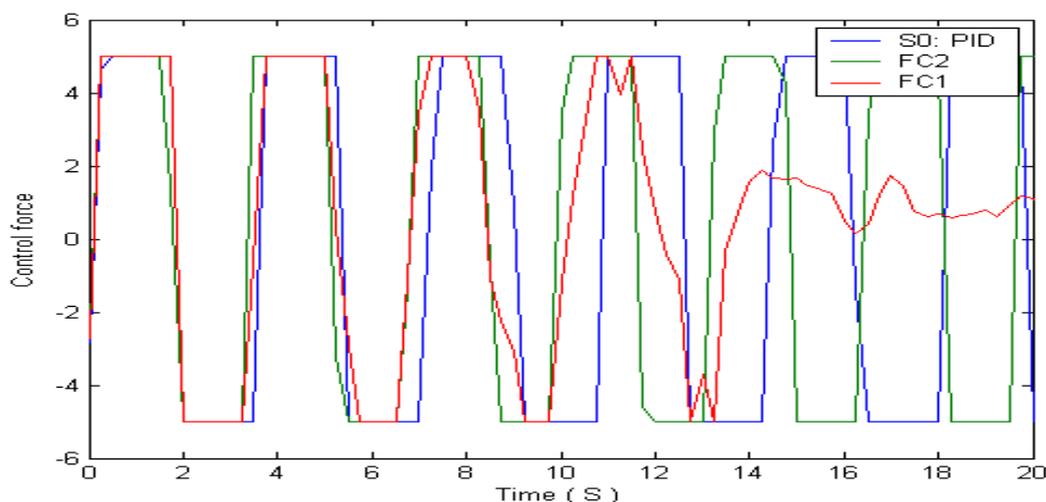


Рис. 37. Сила управления движением шарика в ситуации S0

Таким образом, НР1 и НР2 робастны в новой ситуации. ПИД не справляется с задачей управления (шарик слетает с доски). НР1 показывает лучшее качество управления. Полученные результаты позволили продемонстрировать эффективность нечетких регуляторов, как в типовых ситуациях управления, так и в широком классе нетиповых ситуаций.

Заключение

- Классические системы управления не всегда успешно справляются с задачей управления в случае, если ОУ является глобально неустойчивым, существенно нелинейным, при наличии шумов и времени задержки в каналах измерения; а также при наличии стохастических шумов, особенно типа Рэлеевских шумов (с несимметричной функцией плотности распределения).
- Нечеткие контроллеры, основанные на традиционных инструментариях мягких вычислений, в которых структура нечеткой нейронной сети строится вручную экспертом, уступают в качестве управления и робастности нечетким контроллерам, построенным на основе Оптимизатора Баз Знаний.
- Результаты моделирования широкого класса объектов управления показали, что разработанная технология ИТП ИСУ и разработанный инструментарий ОБЗ демонстрирует повышенные ка-

чества управления и робастность, несмотря на изменение (непредсказуемые) широкого класса факторов таких, как изменение внешних шумов, изменения параметров модели ОУ, изменение времени задержки в каналах измерения, изменения цели управления.

Список литературы

1. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А. и др. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматгиз, 2000.
2. Мишин А. А., Нефедов Н. Ю., Петров С. П., Полуниин 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>.
3. Караткевич С.Г., Литвинцева Л.В., Тятюшкина О.Ю., Григорьев П.Н., Решетников А.Г. Применение интеллектуального программного инструментария в проектировании баз знаний // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/15. – 0421000111\0004>.
4. 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. – Vol. 60.
5. 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.
6. Yu W., Otriz F. 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.
7. 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. – Vol. 5. – Pp. 2397-2402.