

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ МАНИПУЛЯТОРОМ.**

### **Ч. 2: ДЕКОМПОЗИЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

**Николаева Алена Валериановна<sup>1</sup>, Ульянов Сергей Викторович<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Аспирант;

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

<sup>2</sup> Доктор физико-математических наук, профессор;

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

*В статье рассматриваются проблемы проектирования систем управления с различной степенью интеллектуальности для реального объекта управления – Модуля Манипулятора с тремя степенями свободы. Демонстрируется преимущество интеллектуальной системы управления, спроектированной на основе технологий мягких вычислений по сравнению с классической системой автоматического управления и системой управления на основе генетического алгоритма. Исследуются варианты организации единого управляющего звена, а также методы разделения (декомпозиции) управления.*

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, база знаний, технологии мягких вычислений, декомпозиция, модуль манипулятора.

## **INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF A ROBOT MANIPULATOR. PT. 2: CONTROL DECOMPOSITION AND PHYSICAL EXPERIMENT BASED ON SOFT COMPUTING TECHNOLOGY**

**Nikolaeva Alyona<sup>1</sup>, Ulyanov Sergey<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PhD student;

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

<sup>2</sup> Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

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

*The problems of designing control systems with various degrees of intelligence for practical control object – 3 degrees of freedom manipulator are describes in the article. The advantage of the intelligent control system on soft computing technologies as compared with classical automatic control system and control system on genetic algorithm are showing. Variations of design one control link and divided control are considered.*

**Ключевые слова:** intelligent control system, knowledge base, soft computing technology, decomposition, manipulator.

## Введение

В современном производстве большое внимание уделяется повышению эффективности за счет увеличения уровня автоматизации и применения различных робототехнических устройств. Большую часть в области комплексной автоматизации промышленного производства занимают роботы манипуляторы [1, 2].

Однако сфера применения манипуляционных устройств на этом не ограничивается: роботы манипуляторы как автономные устройства, так и в составе комплексов, находят применение в аэрокосмической области, медицине [1] и др. Манипулятор может быть, например, роботом сервисного обслуживания, или решать специальные задачи военно-промышленного комплекса.

Сложность робота манипулятора как объекта управления (ОУ), неопределенность среды функционирования ставят задачу разработки системы управления, способной функционировать в условиях неполной информации о среде функционирования, возмущениях и информационного риска.

В современных интеллектуальных системах управления (ИСУ), независимо от степени интеллектуальности, ключевым элементом является база знаний (БЗ), а проблемами – объективное формирование знаний, выбор методов обучения и генерации управляющих алгоритмов, и др.

Согласно [3], основу построения ИСУ составляют три положения:

- теория ситуационного управления [4];
- иерархический принцип;
- использование информационных интеллектуальных технологий и их комбинаций.

В [4] формулируется и четвертое положение (в [5] подтверждается результатами моделирования):

- пропорциональная зависимость степени интеллектуальности системы от уровня неопределенности, в которой система функционирует.

Подобный подход позволяет конкретно ставить задачи проектирования ИСУ с различной степенью интеллектуальности с учетом принципа не разрушения нижнего исполнительного уровня [6].

На основе математической модели манипулятора с тремя степенями свободы в [5] было проведено исследование поведения идеализированных моделей систем управления: классической системы автоматического управления (САУ) на пропорционально-интегрально-дифференциальном (ПИД) регуляторе и ИСУ на основе генетического алгоритма (ГА). Было продемонстрировано, что ИСУ на ГА, в отличие от САУ на ПИД-регуляторе, успешно справляется с поставленной задачей точного позиционного управления.

Однако при введении в модель системы управления и ОУ ряда ограничений, т.е. при попытке приблизить идеализированную модель к реальной физической модели, качество управления резко ухудшается. После перехода к новому типу систем управления – ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях –, удалось добиться гарантированного решения задачи управления путем периодической подстройки параметров системы управления дополнительным звеном системы – нечетким регулятором (НР) с соответственно спроектированной БЗ. Но увеличивающаяся с числом переменных сложность процесса создания и настройки БЗ привела к необходимости создания структур систем с разделенным управлением, что дало как следствие частичное снижение качества управления.

Для обоснования сформулированного в [5] тезиса (об улучшении качества управления с увеличением интеллектуальности системы управления) в данной статье проведено исследование поведения реального ОУ: робота манипулятора с тремя степенями свободы под управлением САУ на ПИД-регуляторе, ИСУ на ГА, ИСУ на ОБЗ на основе мягких вычислений с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением.

# 1. Физическая реализация системы управления манипулятором с тремя степенями свободы

## 1.1. Описание реальной модели объекта управления

Для исследования качества систем управлений, был разработан Модуль Манипулятора с тремя степенями свободы (рис. 1).

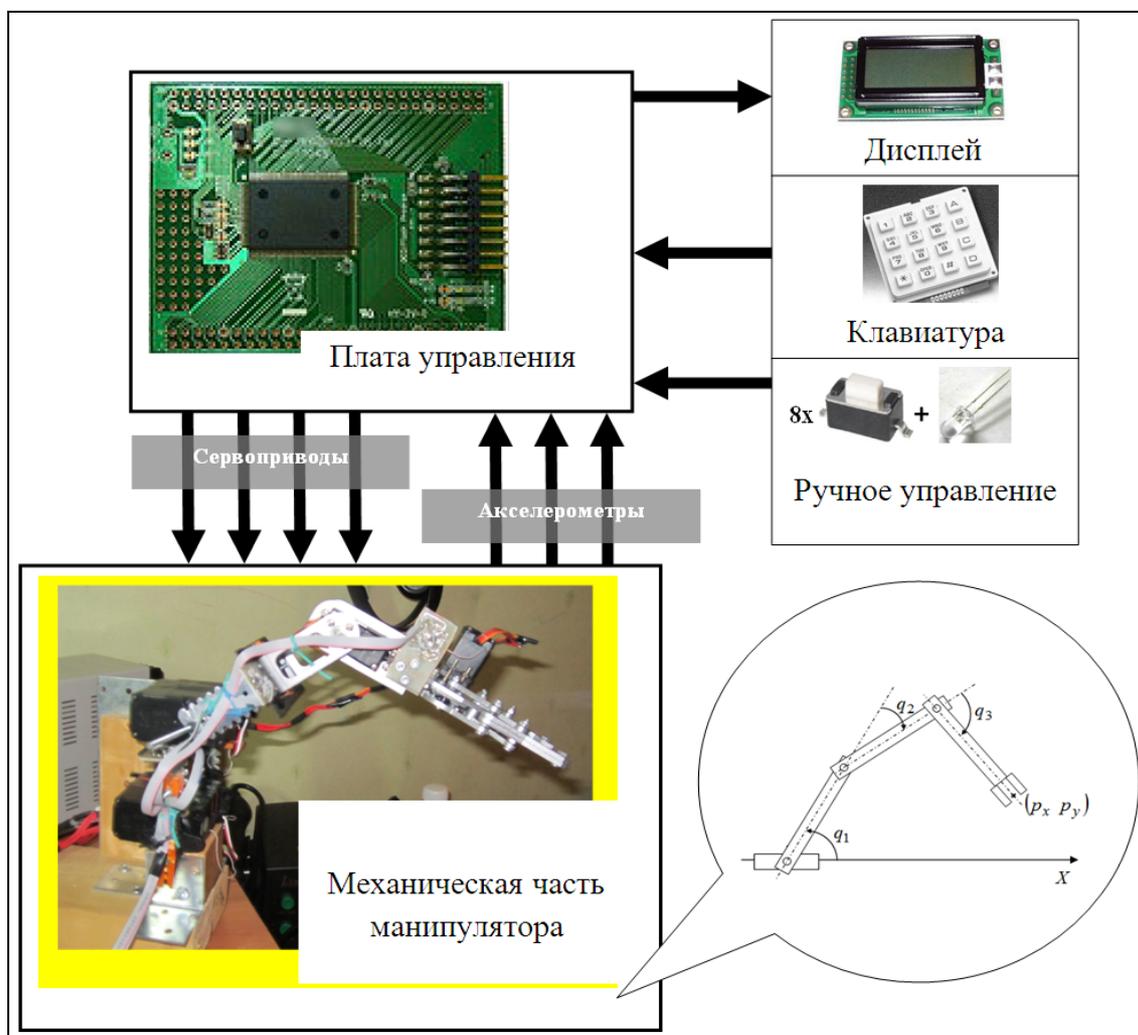


Рис. 1. Модуль Манипулятора с тремя степенями свободы

В робототехнике строится математическая модель робота манипулятора, проводится моделирование ОУ, идентификация параметров математической модели, и затем сравнение результатов моделирования на математической модели ОУ и реальном физическом роботе манипуляторе [2, 7, 8].

В отличие от традиционного подхода, в данной работе поведение звеньев Модуля Манипулятора было формализовано таблицами соответствий, что позволило описать поведение Модуля Манипулятора в среде *MatLab/Simulink*, т.е. была создана модель реального ОУ без привлечения математической модели манипулятора.

Создание модели реального ОУ позволило ускорить идентификацию модели ОУ и получение приемлемых параметров управления для разных типов систем управления и с различным уровнем интеллектуальности.

Для демонстрации преимуществ и недостатков рассматриваемых типов систем управления в применении к манипулятору с тремя степенями свободы в данной работе была проведена серия

экспериментов, как для *MatLab/Simulink*-моделей, так и для физической модели Модуля Манипулятора.

В связи с отмеченной выше особенностью разработки модели робота манипулятора рассмотрим порядок и этапы проведения физического эксперимента.

## 1.2. Порядок проведения испытаний

Серия экспериментов состоит из двух этапов:

- работа в штатных ситуациях управления,
- работа в непредвиденных ситуациях управления.

В качестве штатных ситуаций управления выступают десять экспериментов в соответствии с группой точек рабочего пространства, определенных как тестовых (рис. 2).

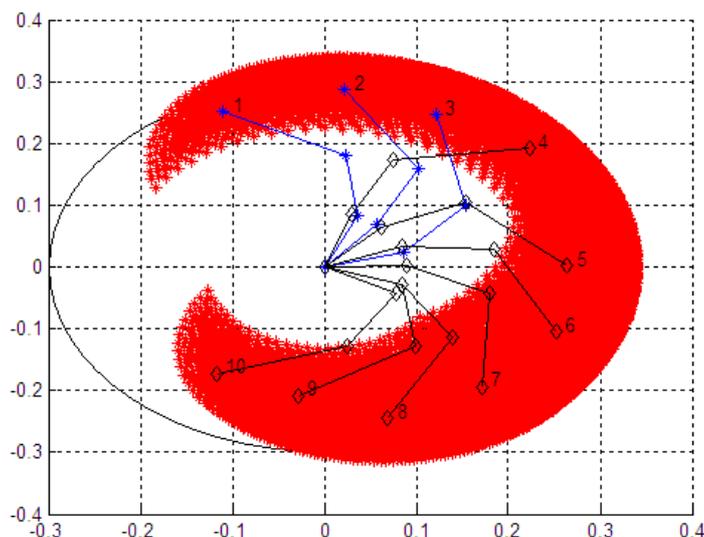


Рис. 2. Тестовое пространство

За начальное положение манипулятора принимается конфигурация:

$$q_1 = 60 \text{ град}; q_2 = 0 \text{ град}; q_3 = 0 \text{ град}.$$

В качестве нештатных ситуаций управления выступают три случая:

1. на 11-той итерации положение второго звена принудительно изменяется до значения  $q_2 = 45$  град;
2. изменены начальные условия:  $q_1 = 60$  град;  $q_2 = 45$  град;  $q_3 = -43$  град;
3. изменены начальные условия:  $q_1 = 60$  град;  $q_2 = 45$  град;  $q_3 = -43$  град и на 11-той итерации положение второго звена принудительно изменяется до значения  $q_2 = 45$  град.

Каждая из трех непредвиденных ситуаций тестируется на десяти точках тестового пространства.

Таким образом, проводится 30 экспериментов для непредвиденных ситуаций управления.

## 1.3. Определение критериев качества

Для оценки и сравнения результатов испытаний всех типов систем управления (как для *MatLab/Simulink* моделей, так и для Модуля Манипулятора) введена система критериев качества, учитывающая методы оценки переходных процессов теории автоматического управления [9, 10]. Данные методы были адаптированы для конкретного ОУ (манипулятора с тремя степенями свободы) в следующем виде:

1. Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления  $PTS_{KCS}$  (Position Task Solution in known control situations).

Задача позиционирования считается решенной, если по завершению заданного числа итераций  $I_{max} = 300$  выполняется условие:

$$\begin{cases} PTS = 1, \text{ if } |q_{1ref} - q_1| + |q_{2ref} - q_2| + |q_{3ref} - q_3| \leq 1 \text{ deg} \\ PTS = 0, \text{ else} \end{cases},$$

где  $q_{1ref}, q_{2ref}, q_{3ref}$  – желаемые положения звеньев,  $q_1, q_2, q_3$  – текущие положения звеньев.

$$PTS \text{ выполнение} \equiv \frac{\sum_{i=1}^N PTS}{N},$$

где  $N$  – число экспериментов.

2. Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления  $PTS_{ACCS}$  (Position Task Solution in the above considered control situations).

3. Быстродействие  $I_T$ .

Количество итераций от начала воздействия, в течение которых осуществляется позиционирование каждого из звеньев с допустимой ошибкой  $2\Delta < 1 \text{ deg}$ , определяется как:

$$I_T = I \left( (|q_{1ref} - q_1| < 1 \text{ deg}) \cap (|q_{2ref} - q_2| < 1 \text{ deg}) \cap (|q_{3ref} - q_3| < 1 \text{ deg}) \right)$$

$$I_T \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N I_T}{NI_{max}}$$

4. Относительное значение перерегулирования  $\sigma$

Отношение максимального отклонения (от установившегося значения) текущего положения к установившемуся значению положения звена:

$$\sigma = \max \left[ \max \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \max \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \max \left| \frac{q_{3ref} - q_3}{q_{3ref}} \right| \right];$$

$$\sigma \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sigma}{N}.$$

5. Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершению заданного числа итераций  $\varepsilon$

$$\begin{cases} \varepsilon = \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \text{ if } (|q_{1ref} - q_1| > |q_{2ref} - q_2|) \cap (|q_{1ref} - q_1| > |q_{3ref} - q_3|) \\ \varepsilon = \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \text{ if } (|q_{2ref} - q_2| > |q_{1ref} - q_1|) \cap (|q_{2ref} - q_2| > |q_{3ref} - q_3|); \\ \varepsilon = \left| \frac{q_{3ref} - q_3}{q_{3ref}} \right|, \text{ if } (|q_{3ref} - q_3| > |q_{1ref} - q_1|) \cap (|q_{3ref} - q_3| > |q_{2ref} - q_2|) \end{cases}$$

$$\varepsilon \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon}{N}.$$

6. Время одной итерации  $t$ .

Реальное время выполнения одной итерации  $I$  выбранного типа системы управления:

$$t \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{t}{t_{const}}, t < t_{const}.$$

7. Сложность реализации управления  $P$ .

Оценка изменения коэффициентов управления:

$$P \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \int_{i=1}^N \left(\frac{dK}{dt}\right)^2 dt}}{\max(K)}.$$

8. Общая оценка управления  $FCB$  (Full Control Behavior)

$$FCB \equiv w_1 \cdot P[PTS_{KCS}] + w_2 \cdot P[PTS_{ACCS}] + w_3 \cdot P[I_T] + w_4 \cdot P[\sigma] + w_5 \cdot P[\varepsilon] + w_6 \cdot P[t] + w_7 \cdot P,$$

где  $w_i$  – весовые коэффициенты, значения которых приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения весовых коэффициентов

Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления	$PTS_{KCS}$	$w_1$	0,1
Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления	$PTS_{ACCS}$	$w_2$	0,4
Быстродействие	$I_T$	$w_3$	0,2
Относительное значение перегулирования	$\sigma$	$w_4$	0,05
Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершению заданного числа итераций	$\varepsilon$	$w_5$	0,1
Время одной итерации	$t$	$w_6$	0,1
Сложность реализации управления	$P$	$w_7$	0,05

## 2. Системы управления с постоянными коэффициентами ПИД-регулятора

В данном разделе рассматриваются два типа систем управления с постоянными коэффициентами.

Для определения параметров управления САУ на ПИД-регуляторе необходимы первоначальные знания о системе управления и характере поведения ОУ [10, 11], т.е. корректное определение коэффициентов ПИД-регулятора возможно с привлечением эксперта.

В то же время для определения параметров управления ИСУ на ГА, необходимо лишь корректно определить критерий качества – *fitness*-функцию (функцию пригодности) ГА, которую возможно задать в терминах, предъявляемых к системе требований.

Например в терминах введенных критериев качества *fitness*-функция может быть определена как:

$$fitness = (PTS = 1) \cap (I_T \rightarrow 0),$$

т.е. решение задачи позиционирования с максимальным быстродействием.

Результаты проведения серии экспериментов, представленные в виде введенных критериев качества, для САУ на ПИД регуляторе и ИСУ на ГА для *MatLab/Simulink* моделей и для Модуля Манипулятора приведены в Таблице 2, а также на рис. 3 и 4.

Из результатов сравнения двух типов систем управления (САУ на ПИД-регуляторе и ИСУ на ГА) видно, что использование ИСУ на ГА дает преимущество в штатных ситуациях управления, улучшены показатели относительного перерегулирования и относительной ошибки позиционирования. Однако в целом качество управления при использовании ИСУ на ГА улучшается незначительно (показатель решения задачи в нештатных ситуациях управления даже несколько ухудшается).

Таблица 2. Сравнение критериев качества

Вид решения	САУ на ПИД-регуляторе		ИСУ на ГА	
	MatLab/Simulink модель	Модуль Манипулятора	MatLab/Simulink модель	Модуль Манипулятора
1 Решение в штатных ситуациях	0,3	0,2	0,7	0,5
2 Решение в непредвиденных ситуациях	0,133333	0,133333	0,1	0
3 Быстродействие	0,009583	0,008083	0,102167	0,02075
4 Относительное значение перерегулирования	0,57468	0,275375	1	0,9282
5 Относительная ошибка позиционирования	0,298193	0,195925	0,820618	0,797575
6 Время одной итерации	0,981955	0,775325	0,981935	0,7483
7 Сложность реализации управления	1	1	1	1
8 Общая оценка управления	0,291999	0,235844	0,410689	0,305148

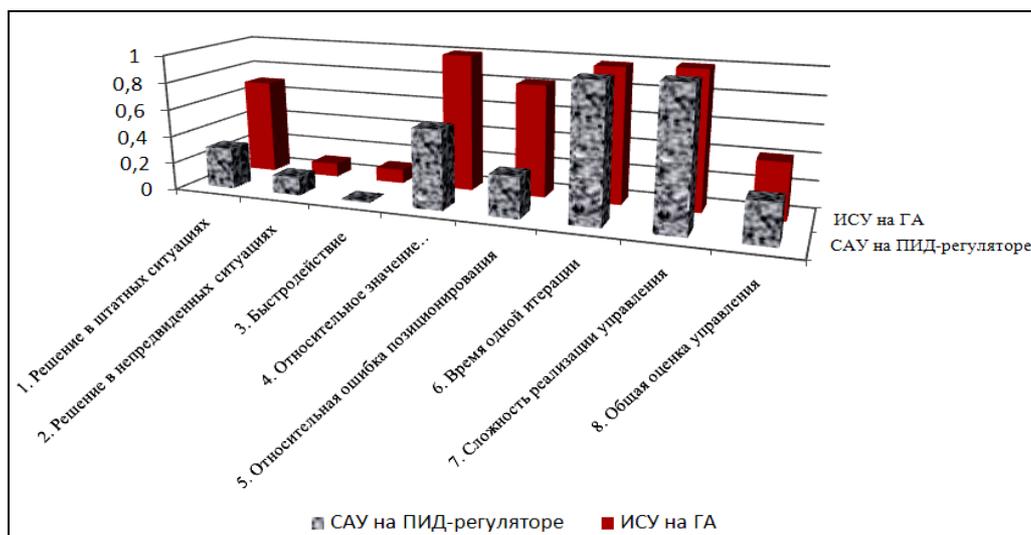


Рис. 3. Сравнение результатов работы САУ на ПИД-регуляторе и ИСУ на ГА при тестировании *MatLab/Simulink* моделей

Это объясняется тем, что принцип организации управления в САУ на ПИД-регуляторе и ИСУ на ГА аналогичен. В обоих случаях предварительно осуществляется установка коэффициентов ПИД-регулятора: в САУ на ПИД-регуляторе – с использованием первоначальных знаний о системе управления и ОУ и применением методов теории автоматического управления [9-12]; в ИСУ на ГА – с точки зрения решаемой задачи управления и применением эволюционных поисковых алгоритмов.

В процессе управления коэффициенты ПИД-регулятора не изменяются, что, с одной стороны, облегчает проектирование системы управления, а с другой, лишает систему управления возможности перестроения и адаптации.

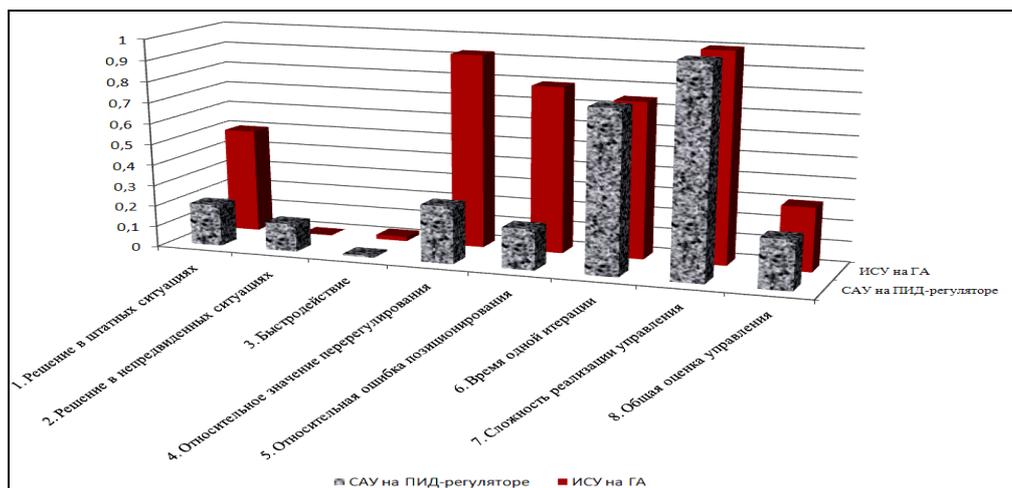


Рис. 4. Сравнение результатов работы САУ на ПИД-регуляторе и ИСУ на ГА при физическом тестировании Модуля Манипулятора

Поэтому в [5] в качестве следующей ступени развития ИСУ, была предложена структура с динамической адаптацией коэффициентов ПИД-регулятора, реализованной на основе технологий мягких вычислений.

### 3. Применение технологий мягких вычислений

Основным элементом рассматриваемых ИСУ является нечеткий регулятор (НР), управляющий коэффициентами ПИД-регулятора. НР осуществляет управление за счет интегрированной в него базы знаний (БЗ), включающей данные о виде и параметрах функций принадлежности входных и выходных нечетких переменных, а также набор нечетких продукционных правил.

Создание БЗ производится с помощью интеллектуального инструментария Оптимизатор Баз Знаний (ОБЗ) на основе мягких вычислений ([13-15]).

Рассмотрим последовательность создания БЗ для ИСУ на ОБЗ на основе мягких вычислений манипулятором с тремя степенями свободы.

1. *Создание обучающего сигнала (ОС).* Первоначально необходимо определить типовую ситуацию управления. В качестве типовых ситуаций управления можно рассматривать штатные ситуации управления (см. п.1.2: *Порядок проведения экспериментов*).

Для создания ОС были использованы три эксперимента, для каждого из которых были созданы ОС1, ОС2 и ОС3, для чего с помощью *MatLab/Simulink* моделей были воспроизведены ситуации управления, в которых параметры ПИД-регулятора определялись с помощью ГА.

На рис. 5 – 7 приведены соответственно ОС1, ОС2 и ОС3, на которых в левом столбце [ $errP1$ ,  $errD1$ ,  $errI1$ ,  $errP2$ ,  $errD2$ ,  $errI2$ ,  $errP3$ ,  $errD3$ ,  $errI3$ ] – вектор входных переменных пропорциональных, дифференциальных и интегральных ошибок первого, второго и третьего звеньев манипулятора, в правом столбце [ $KP1$ ,  $KD1$ ,  $KI1$ ,  $KP2$ ,  $KD2$ ,  $KI2$ ,  $KP3$ ,  $KD3$ ,  $KI3$ ] – вектор выходных переменных (определенных ГА) пропорциональных, дифференциальных и интегральных коэффициентов ПИД-регулятора первого, второго и третьего звеньев манипулятора соответственно.

Итоговый ОС, используемый для получения БЗ состоит из последовательно соединенных ОС1, ОС2 и ОС3.

#### 2. *Формирование модели нечеткого вывода.*

Необходимо конкретизировать:

- тип нечеткой модели: Сугено 0 (нулевого порядка);
- интерпретация нечетких операций – нечеткая конъюнкция как произведение;
- число входных и выходных переменных: 9 и 9.

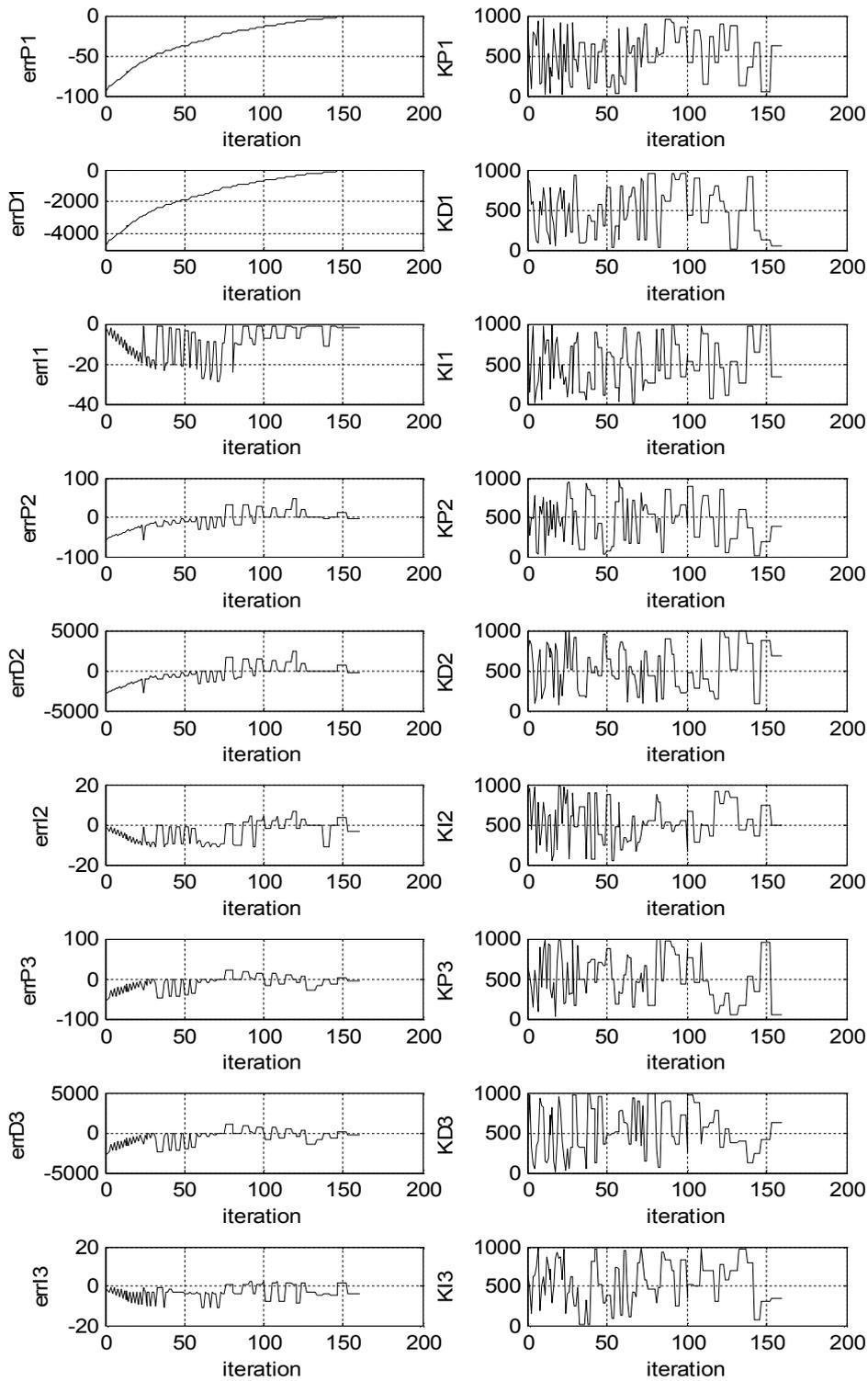


Рис. 5. Обучающий сигнал 1

3. Создание лингвистических переменных для входных значений. С помощью ГА<sub>1</sub> определяются оптимальное число и форма функций принадлежности.

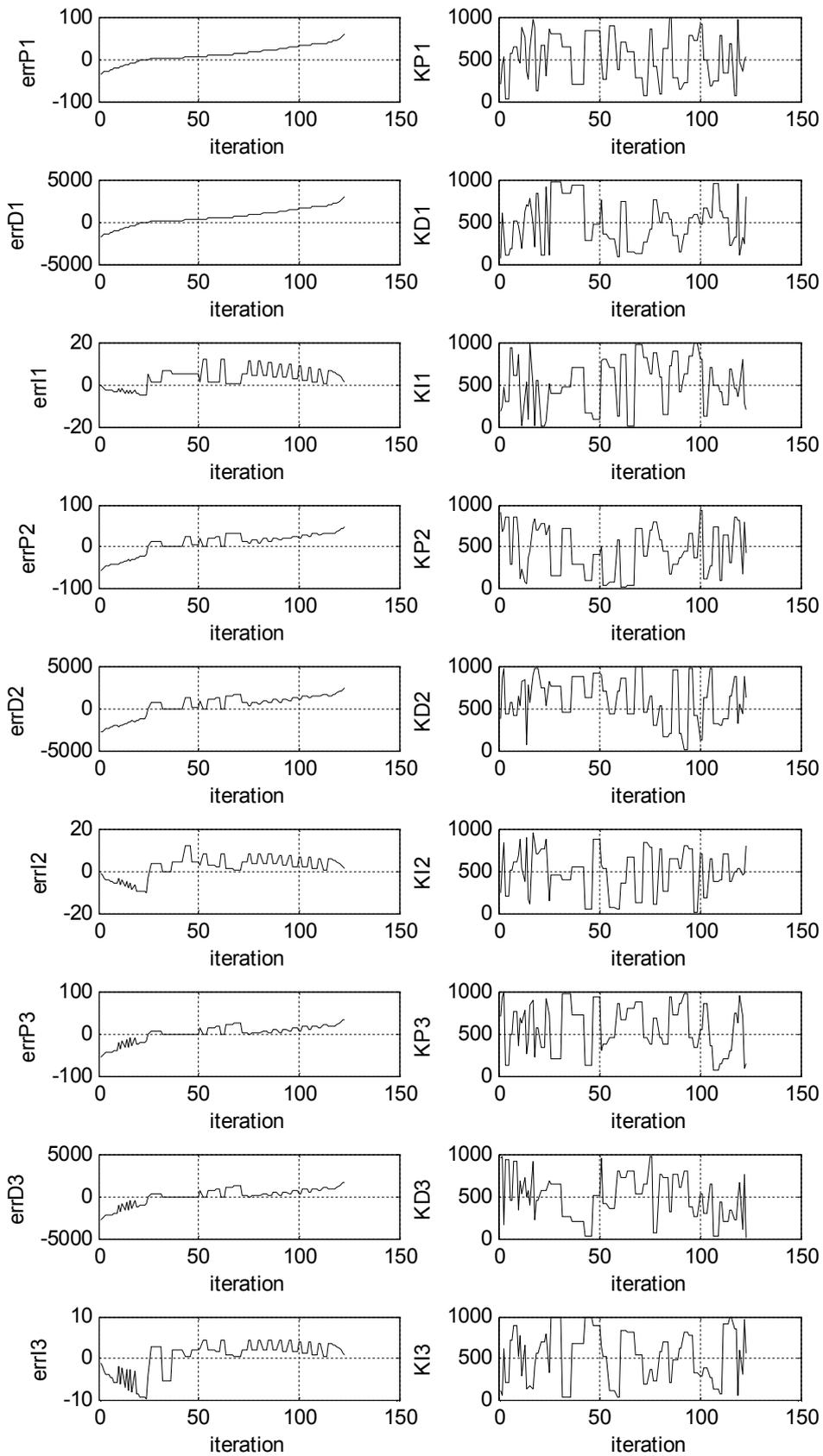


Рис. 6. Обучающий сигнал 2

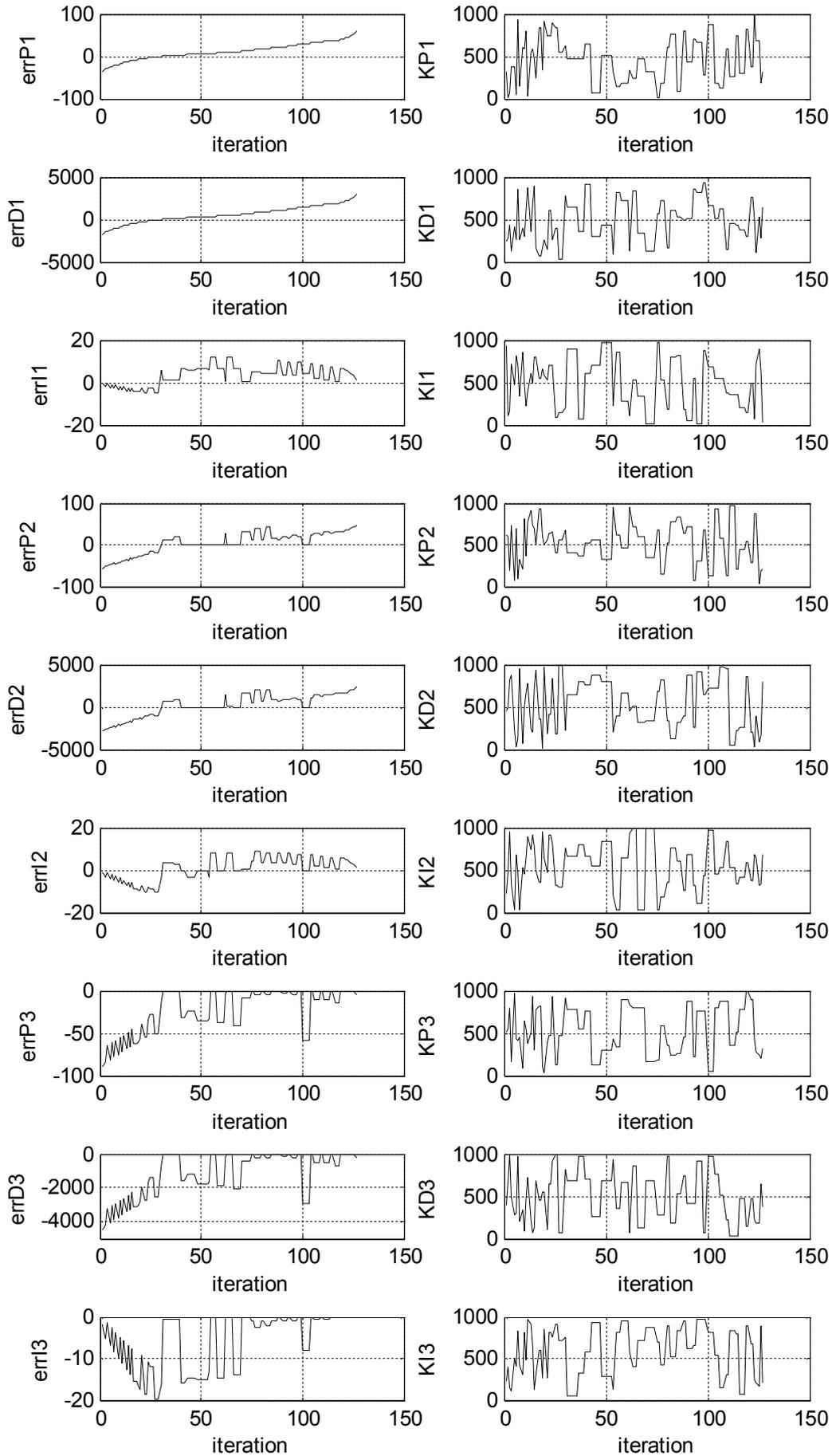


Рис. 7. Обучающий сигнал 3

При создании БЗ первоначально было задано создание пяти функций принадлежности для всех входных переменных, т.е. вектор  $[n_1 n_2 n_3 n_4 n_5 n_6 n_7 n_8 n_9] = [5 5 5 5 5 5 5 5 5]$ , что привело бы к созданию  $n_1 \times n_2 \times n_3 \times n_4 \times n_5 \times n_6 \times n_7 \times n_8 \times n_9 = 1953125$  нечетких правил.

После работы ГА<sub>1</sub> вектор  $[n_1 n_2 n_3 n_4 n_5 n_6 n_7 n_8 n_9]$  принял значение  $[4 4 4 4 3 4 4 3 3]$ , а максимальное число нечетких правил составило 110592.

4. Создание базы правил.

Благодаря использованию алгоритма отбора правил [11] (прохождение заданного порога активации), из 110592 правил были отобраны 33 наиболее робастных.

5. Настройка базы правил. Оптимизация левых и правых частей правил БЗ.

Используется традиционный метод обратного распространения ошибки.

Тестирование полученной БЗ НР проводится в составе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Результаты проведения серии экспериментов, представленные в виде введенных критериев качества, как для *MatLab/Simulink* модели, так и для Модуля Манипулятора приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Критерии качества для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

		ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях	
		<i>MatLab/Simulink</i> модель	Модуль Манипулятора
1	Решение в штатных ситуациях	1	1
2	Решение в непредвиденных ситуациях	1	1
3	Быстродействие	0,870667	0,813167
4	Относительное значение перерегулирования	1	0,999625
5	Относительная ошибка позиционирования	0,999603	0,999625
6	Время одной итерации	0,969978	0,771525
7	Сложность реализации управления	0,9682	0,965925
8	Общая оценка управления	0,969501	0,938026

На рис. 8 и 9 приведено сравнение ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с ранее рассмотренными САУ на ПИД-регуляторе и ИСУ на ГА соответственно для *MatLab/Simulink* модели и Модуля Манипулятора.

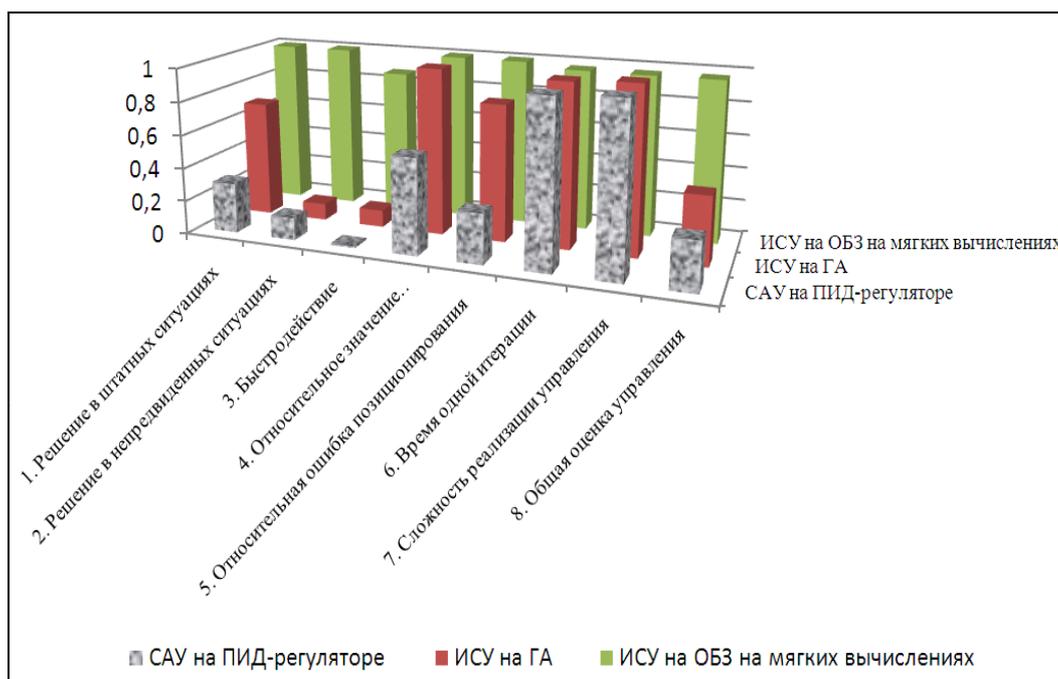


Рис. 8. Сравнение результатов работы САУ на ПИД-регуляторе, ИСУ на ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях при тестировании *MatLab/Simulink* моделей

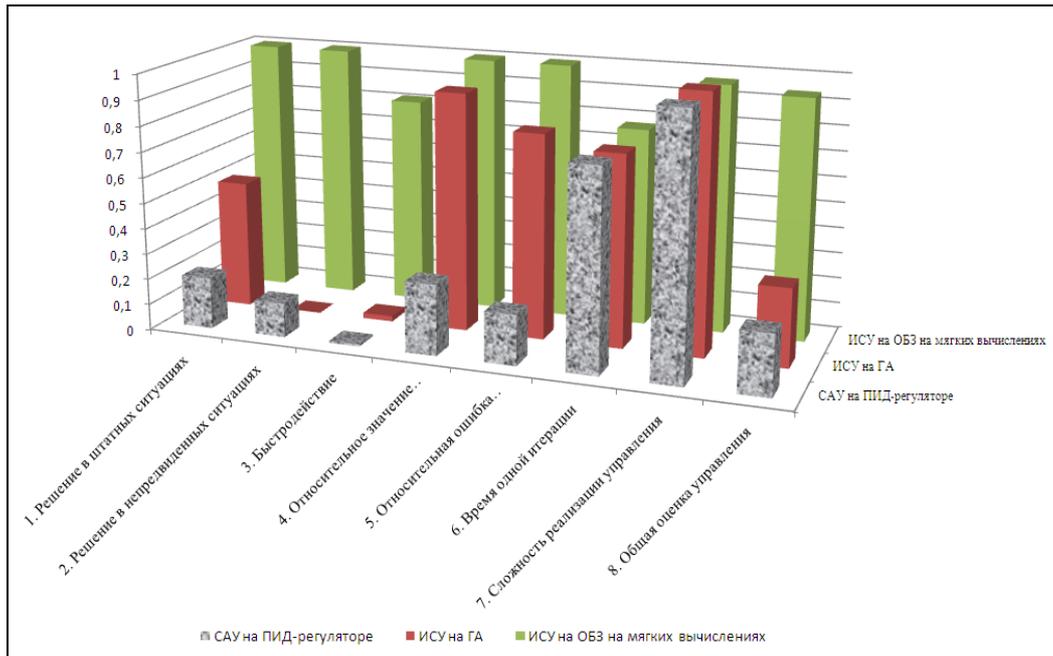


Рис. 9. Сравнение результатов работы САУ на ПИД-регуляторе, ИСУ на ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, при физическом тестировании Модуля Манипулятора

Из результатов сравнения видно, что использование ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях позволяет получить максимальные оценки критериев качества «Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления» и «Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления», а также добиться улучшения всех показателей, кроме как по критериям «Время одной итерации» и «Сложность реализации управления», т.к. динамическая настройка коэффициентов требует дополнительных вычислений.

На рис. 10-12 приведено поведение манипулятора с тремя степенями свободы под управлением соответственно САУ на ПИД-регуляторе, ИСУ на ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в непредвиденной ситуации 5 (на 11-й итерации положение второго звена принудительно изменяется до значения  $q_2 = 45$  град).

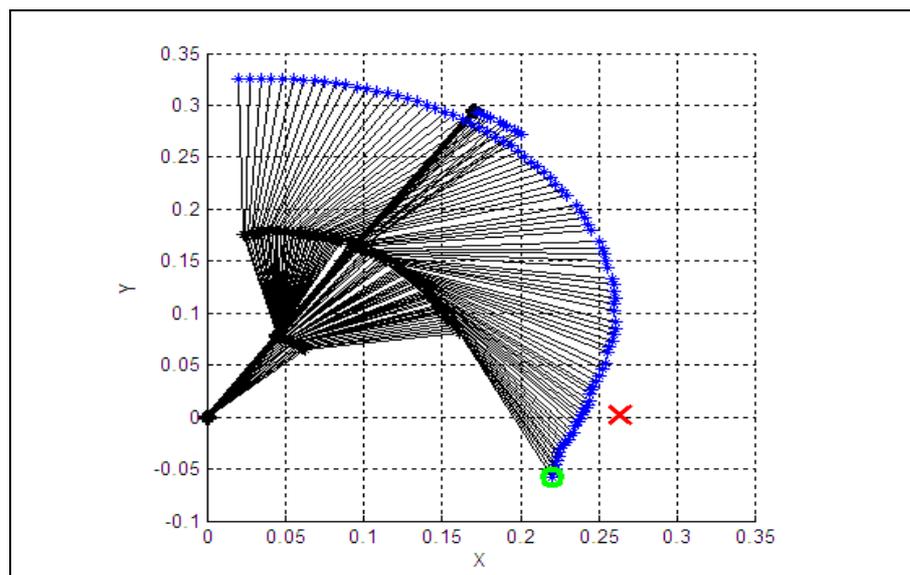


Рис. 10. Поведение манипулятора с тремя степенями свободы под управлением САУ на ПИД-регуляторе в непредвиденной ситуации 5

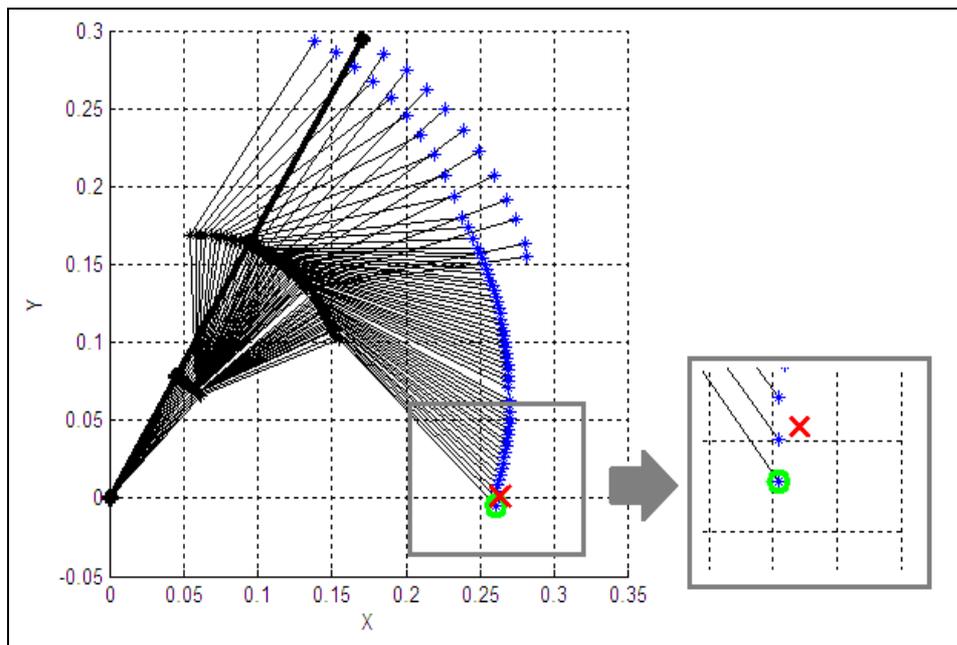


Рис. 11. Поведение манипулятора с тремя степенями свободы под управлением ИСУ на ГА в непредвиденной ситуации 5

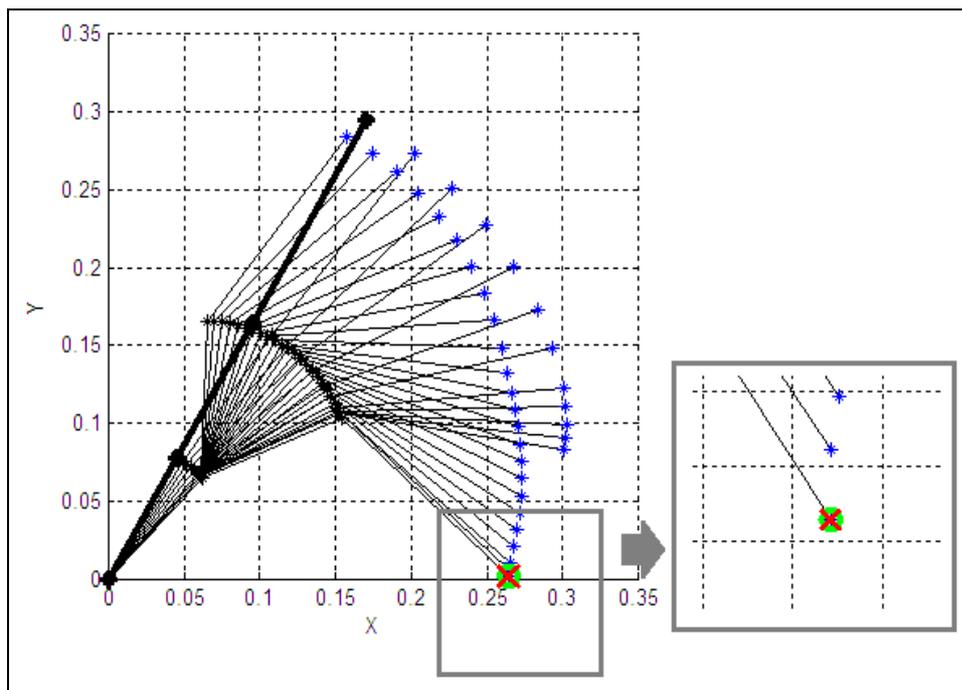


Рис. 12. Поведение манипулятора с тремя степенями свободы под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в непредвиденной ситуации 5

Из результатов на рис. 10-12 видно, что под управлением САУ на ПИД-регуляторе и ИСУ на ГА, в отличие от ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, задача позиционирования не решается.

Изменение коэффициентов ПИД-регулятора (для рассмотренной ситуации управления при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях) приведены на рис. 13-15 для пропорциональных, дифференциальных и интегральных коэффициентов соответственно.

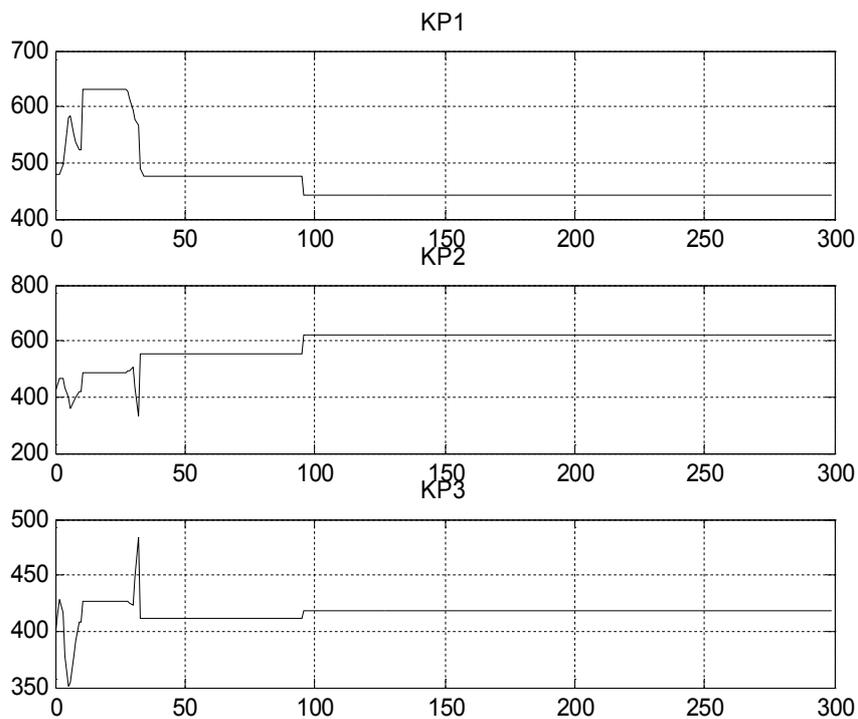


Рис. 13. Изменение пропорциональных коэффициентов ПИД регулятора при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

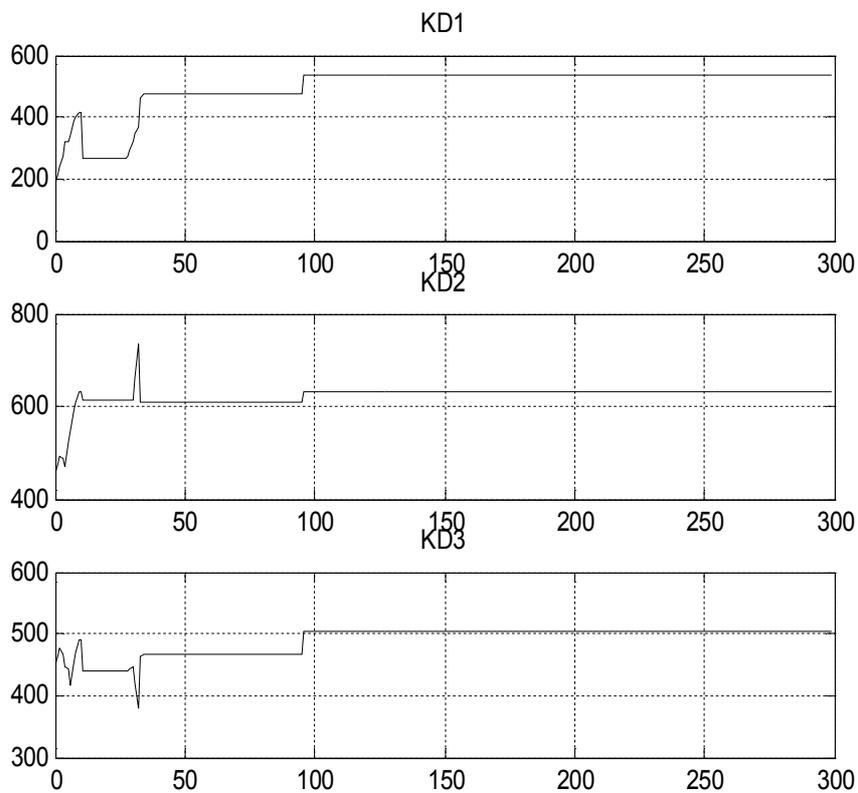


Рис. 14. Изменение дифференциальных коэффициентов ПИД регулятора при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

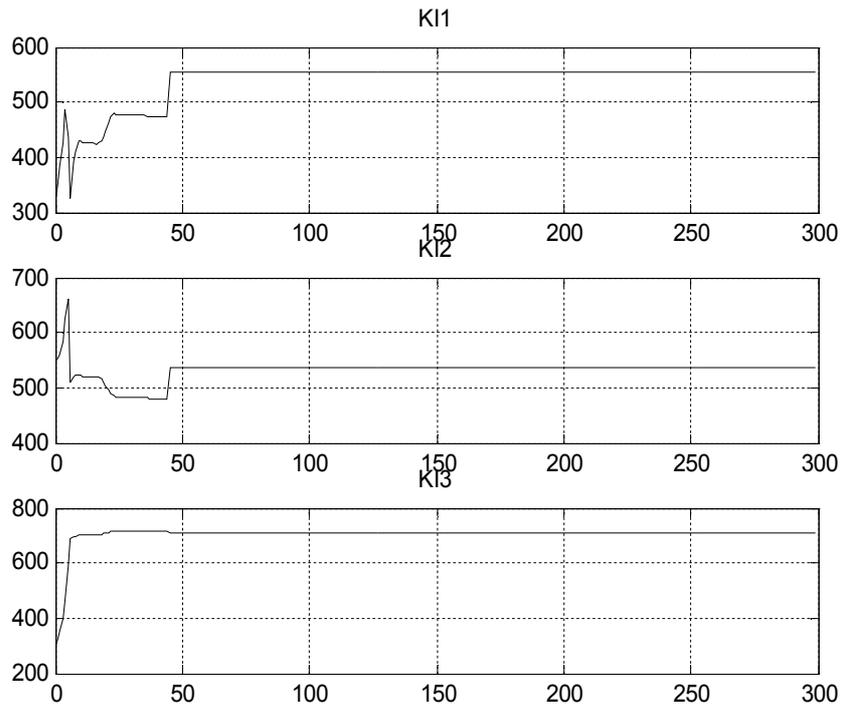


Рис. 15. Изменение интегральных коэффициентов ПИД регулятора при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

В данном разделе приводилась зависимость максимального числа нечетких правил от количества функций принадлежности для входных переменных. Предположим меньшее количество функций принадлежности – для каждой входной переменной равное трем. Тогда зависимость максимального числа нечетких правил от числа степеней свободы манипулятора имеет вид, приведенный на рис. 16.

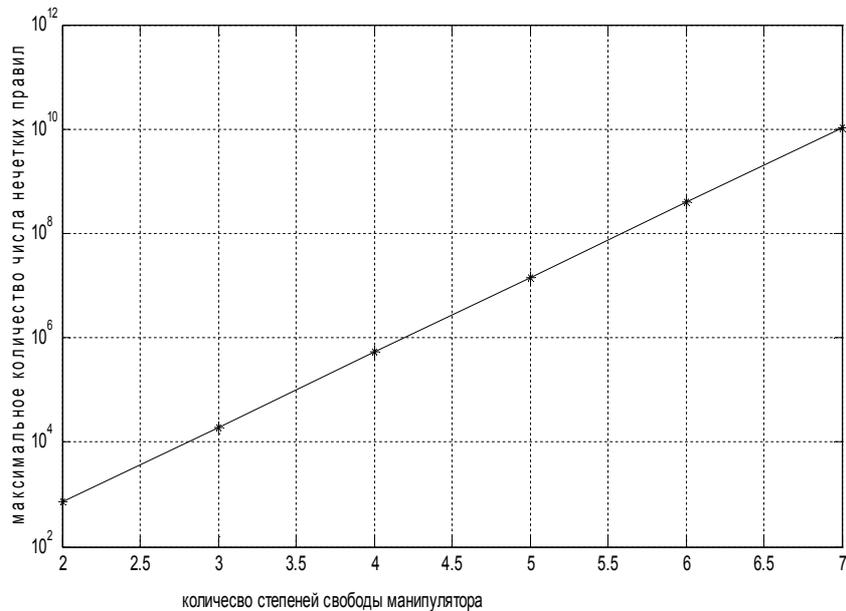


Рис. 16. Зависимость максимального числа нечетких правил от числа степеней свободы манипулятора

Следовательно, при необходимости введения дополнительных звеньев, расширения функций уже существующих или добавления прочих устройств, требующих координационного управления, каждая степень свободы будет увеличивать максимальное число нечетких правил более чем на пол-

тора порядка. Это приводит к увеличению сложности создания БЗ, и, как следствие, увеличению времени создания БЗ, повышению требований к вычислительным ресурсам процессора, на котором создаются БЗ и объему памяти системы, в которой размещается БЗ.

При возникновении ситуации, когда сложность реализации единой БЗ высока, одним из реальных выходов может быть разделение БЗ на несколько, соответственно использовать не один НР, а, например, в рассмотрении манипулятора с тремя степенями свободы, три НР, для индивидуального управления звеньями.

#### **4. Декомпозиция управления ИСУ на основе ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением**

Способы разделения управления рассматривались в [5].

Рассмотрим разделение управления, при котором один НР управляет одним звеном манипулятора, т.е. необходимо создать три БЗ для соответственно трех НР.

Число входных и выходных переменных для каждой из баз снизится в три раза, и как следствие снизится максимальное число нечетких правил.

Рассмотрим процесс создания БЗ

##### *1. Создание обучающего сигнала (ОС).*

Созданы три ОС для трех БЗ (соответственно трех звеньев) Каждый из ОС в свою очередь, состоит из двух ОС (соответственно двух типовых экспериментов).

На рис. 17-19 приведены конечные ОС для создания трех независимых БЗ соответственно ОС1, ОС2 и ОС3, на которых в левом столбце [errP1, errD1, errI1], [errP2, errD2, errI2] или [errP3, errD3, errI3] – вектор входных переменных пропорциональных, дифференциальных и интегральных ошибок первого, второго и третьего звеньев манипулятора; в правом столбце [KP1, KD1, KI1], [KP2, KD2, KI2] или [KP3, KD3, KI3] – вектор выходных переменных (определенных ГА) пропорциональных, дифференциальных и интегральных коэффициентов ПИД-регулятора первого, второго и третьего звеньев манипулятора.

##### *2. Формирование модели нечеткого вывода.*

Для каждой из трех БЗ:

- тип нечеткой модели: Сугено 0;
- интерпретация нечетких операций: нечеткая конъюнкция как произведение;
- число входных и выходных переменных: 3 и 3.

*3. Создание лингвистических переменных для входных значений.* С помощью ГА<sub>1</sub> определяются оптимальное число и форма функций принадлежности.

При создании БЗ1, БЗ2 и БЗ3 и оптимизации ГА1, число функций принадлежности составило [3 3 5], [5 5 9] и [7 7 8], максимальное число нечетких правил соответственно 45, 225 и 392 соответственно.

##### *4. Создание базы правил.*

Для БЗ1 из 45 правил отобрано 18, для БЗ2 из 225 правил – 26, для БЗ3 из 392 правил – 48.

Напомним, что при создании БЗ для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, максимальное число нечетких правил составляло 110592, из которых было отобрано 33 наиболее робастных.

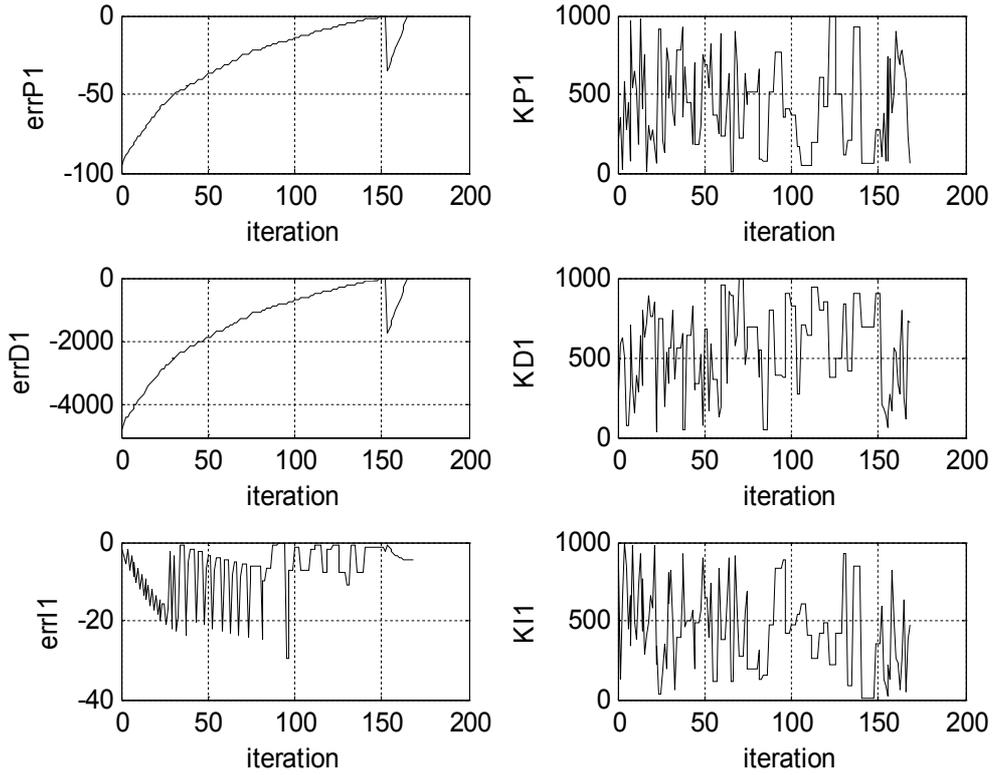


Рис. 17. OC1 для БЗ1

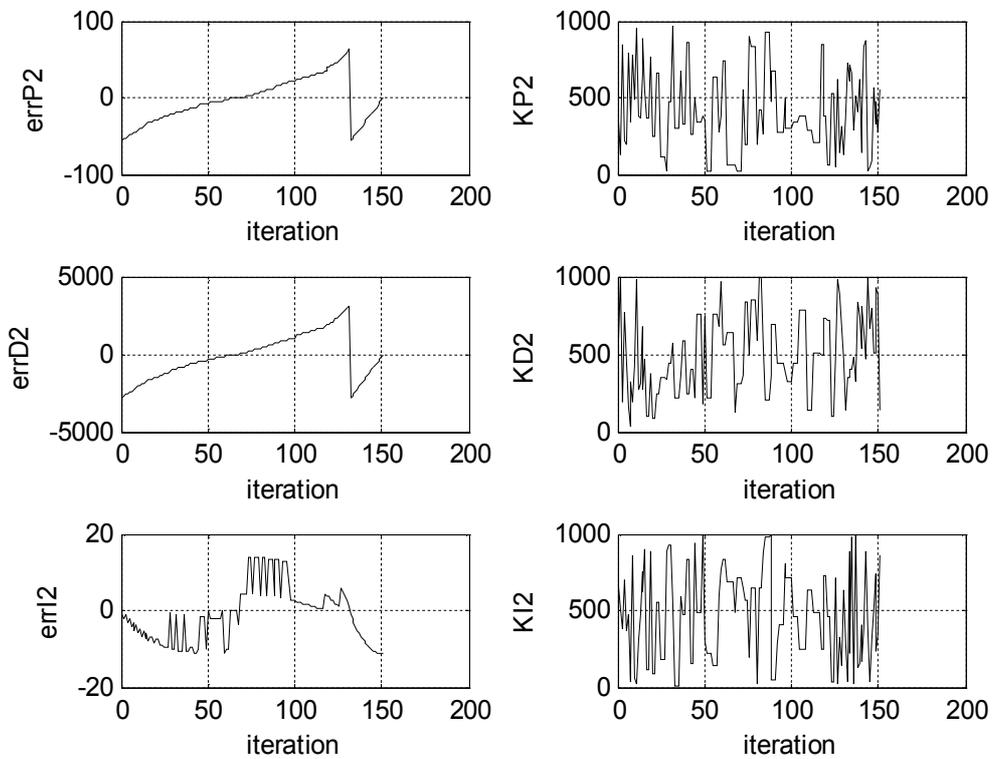


Рис. 18. OC2 для БЗ2

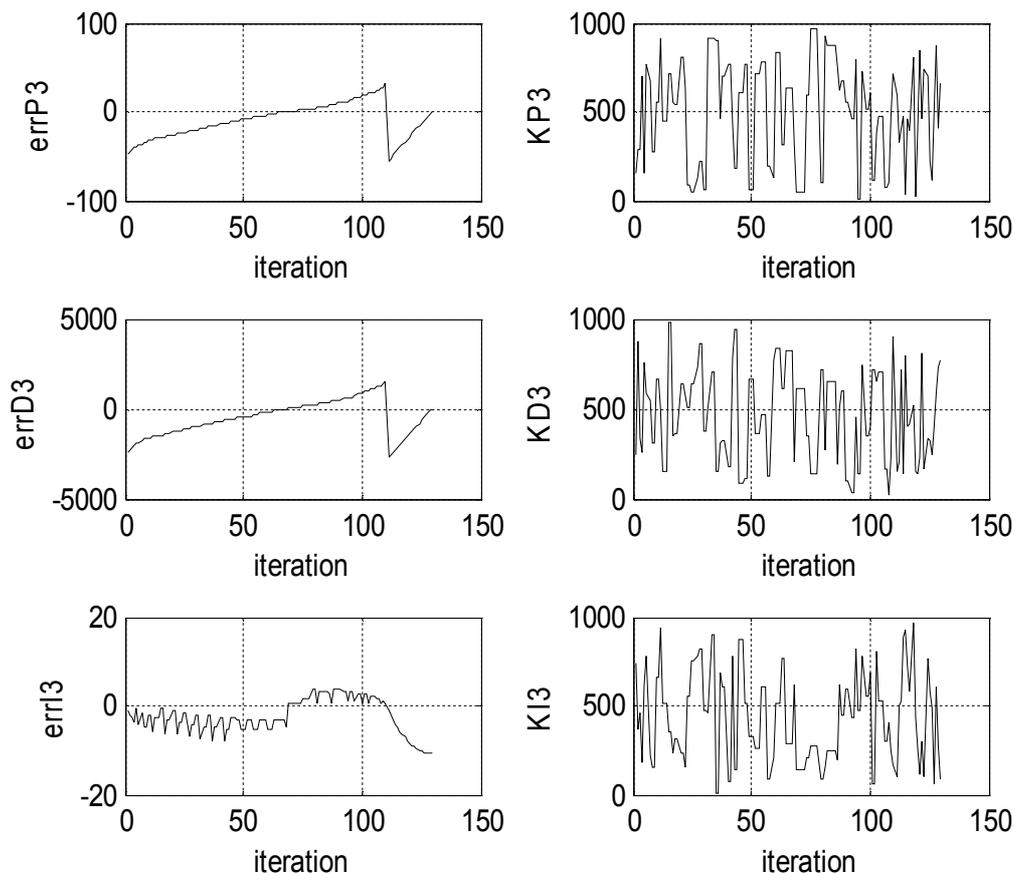


Рис. 19. ОСЗ для БЗ3

В рассматриваемом случае с разделенным управлением, максимальное число правил (для БЗ3) составляет 392, что существенно снижает время отбора наиболее робастных правил.

Однако, в целом количество отобранных правил (18+26+48 = 92 – суммарное количество отобранных правил БЗ1, БЗ2 и БЗ3) более чем в 2 раза превышает количество отобранных правил при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

Следовательно, размещение конечных БЗ при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением потребует большего объема памяти конечного устройства, в котором размещается система.

5. *Настройка базы правил.* Оптимизация левых и правых частей правил БЗ.

Используется традиционный метод обратного распространения ошибки.

Тестирование полученных БЗ1, БЗ2 и БЗ3 соответственно НР1, НР2 и НР3 проводится в составе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением.

Результаты проведения серии экспериментов, представленные в виде введенных критериев качества, для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, как для *MatLab/Simulink* моделей, так и для Модуля Манипулятора, приведены в Таблице 4.

На рис. 20-21 приведено сравнение ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением соответственно для *MatLab/Simulink* моделей и Модуля Манипулятора.

Таблица 4. Критерии качества для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением

		ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР		ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением	
		MatLab/Simulink модель	Модуль Манипулятора	MatLab/Simulink модель	Модуль Манипулятора
1	Решение в штатных ситуациях	1	1	1	1
2	Решение в непредвиденных ситуациях	1	1	0,833333	0,9
3	Быстродействие	0,870667	0,813167	0,516917	0,569167
4	Относительное значение перерегулирования	1	0,999625	0,996353	0,9955
5	Относительная ошибка позиционирования	0,999603	0,999625	0,888263	0,989375
6	Время одной итерации	0,969978	0,771525	0,96783	0,75755
7	Сложность реализации управления	0,9682	0,965925	0,948788	0,935675
8	Общая оценка управления	0,969501	0,938026	0,819583	0,845085

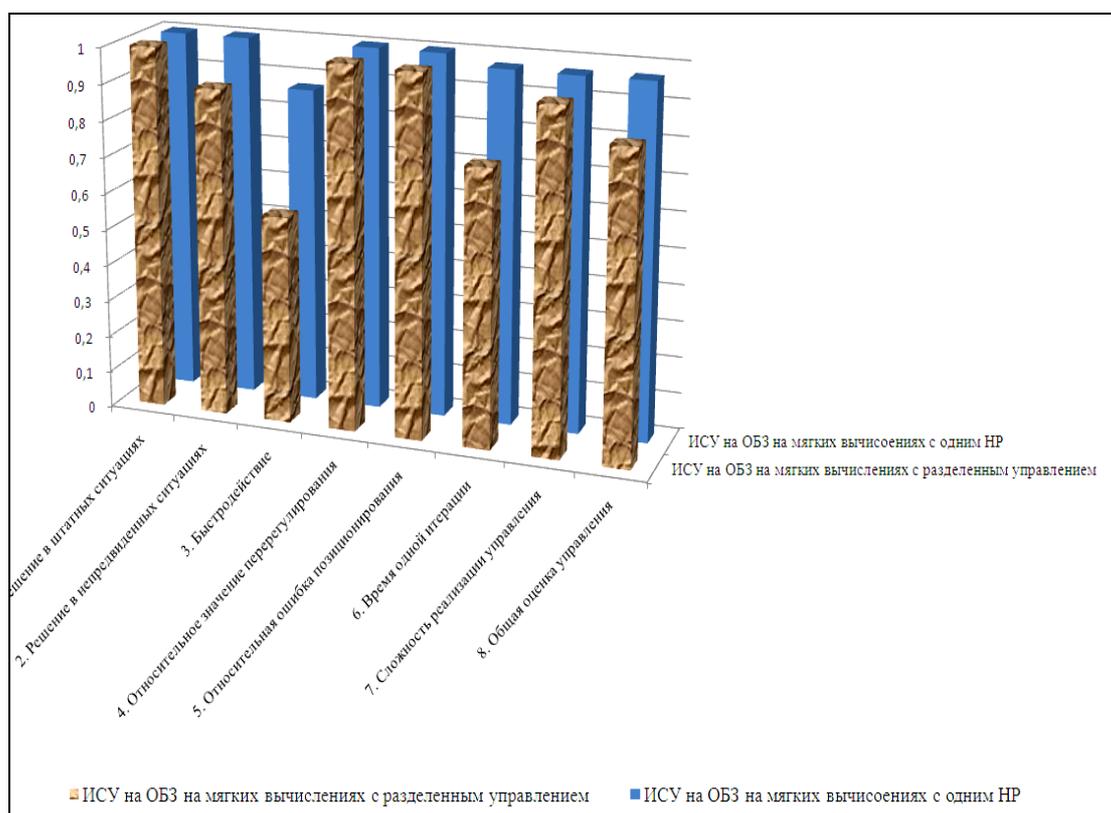


Рис. 20. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением при тестировании MatLab/Simulink моделей

Из результатов сравнения видно, что при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением все показатели качества несколько ухудшаются, что происходит в результате рассогласования работы разделенных независимых БЗ.

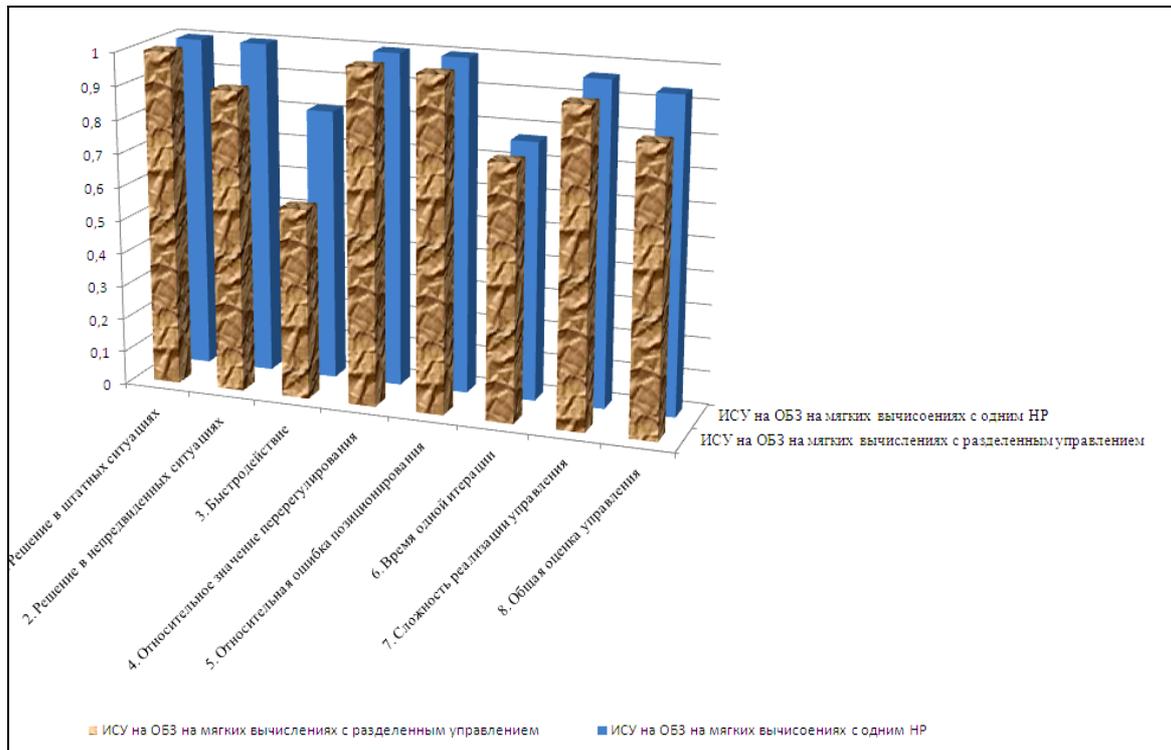


Рис. 21. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением при физическом тестировании Модуля Манипулятора

В следующей части 3<sup>1</sup> для устранения отмеченного недостатка рассмотрен метод организации координационного управления с применением технологий квантовых вычислений [6].

## Заключение

Приведенные результаты позволяют, в отличие от других методов (например, оптимизации ПИД-регуляторов методом PSO – particle swarm optimization [16, 17]), разработчикам систем управления проектировать достаточный (требуемый в соответствии с критерием качества управления) уровень интеллектуальности систем управления в зависимости от:

- степени неопределенности общей системы (контур управления, модель ОУ, среда функционирования);
- поставленных задач управления;
- допустимых погрешностей решений;
- предполагаемых вычислительных и трудовых ресурсов и др.

## Список литературы

1. International assessment of research and development in robotics. – WTEC Panel Report. – 2006.
2. Черноусько Ф. Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы: Динамика, управление, оптимизация. – Наука, 1989.

<sup>1</sup> См. настоящий номер журнала

3. Макаров И.М., Лохин В.М. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем автоматического управления. – М.: Наука, 2009.
4. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – Наука: Физматлит, 1990.
5. Николаева А.В., Петров С.П., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором. Ч. 1: Технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2012. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/25.> – 0421200111\0021.
6. Ulyanov S.V. Self-organized intelligent robust control based on quantum fuzzy inference – Recent Advances in Robust Control – Novel Approaches and Design Methods / A. Mueller (Ed.), Ch. 9. – In Tech, 2011. – Pp. 187-220.
7. Lewis F.L., Munro N. Robot manipulator control. – N.Y., 2004.
8. Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation. Parts I, II and III // J. of Dynamics, Systems, Measurement, and Control, 1985. – Vol. 107. – №1.
9. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1989.
10. Bucz Š, Kozakova A. PID Controller design for specified performance introduction to PID controllers – Theory, Tuning and Application to Frontier Areas (Ed. by R. C. Panda). – InTech, 2012.
11. Михайлов В.С. Теория управления. – К.: Выща школа, 1988.
12. Khan H. PID controller: Comparative analysis and design diverse realizations (Moving towards efficient control in robotics and industries). – Lambert Academic Publishing House, 2012.
13. Николаева А.В., Петров С.П., Мишин А.А., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором на основе генетического алгоритма. // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2011. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/21.> – 0421100111\0021.
14. Ульянов С. В., Тятюшкина О. Ю, Григорьев П.Н., Резникова Н.В. Применение оптимизатора баз знаний на основе мягких вычислений в интеллектуальном робастном управлении. // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №2. – Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 0421000111\0017.
15. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Построение робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. II. Оптимизатор Баз Знаний на мягких вычислениях и робастность ИСУ // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2006. – №5.
16. Thweny F., Al - Yasiri A. Design and implementation of PSO based PID controller for MA 2000 robot. – Lambert Academic Publishing House, 2013.
17. Adeel M. Implementation of a PID Controller on FPGA for DC Motor Speed. – Lambert Academic Publishing House, 2013.