

УДК 004.415.2, 004.588

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

### **Ч. 1: ТЕХНОЛОГИИ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

**Николаева Алена Валериановна<sup>1</sup>, Петров Сергей Павлович<sup>2</sup>,  
Ульянов Сергей Викторович<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Студент;

ГБОУ ВПО Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: yeti89-89@mail.ru.

<sup>2</sup>Студент;

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

<sup>3</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 данной работе рассматривается эволюция структур систем управления: от классических систем автоматического управления до интеллектуальных систем управления с применением технологий мягких вычислений. На каждом этапе производится исследование существующих решений, выявление недостатков, предлагаются новые методы проектирования устойчивых интеллектуальных систем управления. На примере управления манипулятором с тремя степенями свободы демонстрируются возможности каждой предлагаемой структуры системы управления с точки зрения решения задачи позиционирования устройства захвата манипулятора.*

**Ключевые слова:** система автоматического управления, интеллектуальная система управления, генетический алгоритм, оптимизатор баз знаний.

## **DEVELOPMENT OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF A ROBOT-MANIPULATOR. PT. 1: SOFT COMPUTING TECHNOLOGY**

**Nikolaeva Alyona<sup>1</sup>, Petrov Sergey<sup>2</sup>, Ulyanov Sergey<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Student;

Dubna International University of Nature, Society, and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: yeti89-89@mail.ru.

<sup>2</sup>Student;

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

<sup>3</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.

*This paper describes the evolution of the structures of control systems: from classical control systems to intelligent control systems using soft computing technologies. At each stage, performed the study of existing solutions, identification of gaps and proposed new methods for the design of robust control systems. As an example, the control of three-link manipulator with 3DoF is considered. It demonstrates capabilities of each proposed control system structure in terms of the control task solving – positioning of the capture device of the robot arm.*

**Keywords:** automatic control system, intelligent control system, genetic algorithm, knowledge base optimizer.

## **Введение**

Результатом разработки интеллектуальной системы управления (ИСУ) является обеспечение гарантированного управления роботом в непредвиденных ситуациях управления в реальном времени вследствие применения предлагаемых алгоритмов управления. Несмотря на свою актуальность, разработка алгоритма проектирования робастности интеллектуальной системы управления, способной эффективно функционировать в условиях риска, относится к сложной и слабо исследованной области.

Ранее поставленная задача решалась методом экспертных систем или, для исключения субъективности знаний, применением технологий мягких вычислений. При этом эффективность применения ИСУ зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы.

Разработка нечетких регуляторов оказалась самым успешным приложением теории нечетких систем. Для разработчиков систем управления нечеткие системы столь привлекательны в силу того, что они являются универсальными аппроксиматорами объектов управления с плохо определенной динамикой и структурой.

Нечеткие регуляторы, спроектированные с помощью мягких вычислений, 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, а также возможность ее коррекции и адаптации к изменяющейся ситуации управления; гарантируют достижимость требуемого качества управления на основе спроектированной базы знаний; способны функционировать в непредвиденных ситуациях управления.

Увеличение сложности структур объектов управления и трудности прогнозирования непредвиденных (нештатных) ситуаций управления только усиливают актуальность данной проблемы и внимание к поиску ее решения. Такого рода задачи относятся к т. н. проблеме «*System of Systems Engineering*», изучающей в общем виде сложные структуры систем автоматизированного управления с различными уровнями и шкалами интеграции и/или приоритетным обменом информацией между подсистемами с целью установления глобальных (необходимых и достаточных) условий надежного автономного функционирования объекта управления во внешней среде.

Принципиальной особенностью в построении многозвенных манипуляционных устройств является модульность, которая обеспечивает адаптивность и реконфигурируемость динамической структуры в соответствии с решаемой задачей. Автономные роботы-манипуляторы представляют интерес для ряда практических приложений, что объясняет их повсеместное внедрение.

Построение манипуляционных роботов предполагает объединение однотипных модулей в целостную многозвенную конструкцию. Однако увеличение числа степеней свободы манипулятора означает увеличение размерности пространства поиска, что приводит к увеличению времени работы поискового алгоритма, и, как следствие, к необходимости наращивания вычислительной мощности.

В данной работе рассматривается ряд структур систем управления: классической системы автоматического управления (САУ), ИСУ на генетическом алгоритме (ГА) и ИСУ на оптимизаторе баз знаний (ОБЗ) на мягких вычислениях. Каждый этап сопровождается описанием условий, при которых реализованная структура управления способна решать поставленные задачи управления, а также условий потери устойчивости управления. Путем последовательного увеличения интеллектуальности системы управления разрабатывается структура ИСУ, способная функционировать в реальных условиях воздействия внешней среды.

Демонстрация качества управления каждой рассмотренной в работе системы управления производится на планарном манипуляторе с тремя степенями свободы.

### 1. Описание объекта управления

Динамическая модель манипулятора с числом степеней свободы  $n$  [1]:

$$\tau(t) = D(q)\ddot{q}(t) + C(q, \dot{q})\dot{q}(t) + G(q), \tag{0.1}$$

где  $n$ -размерные  $q(t)$  и  $\tau(t)$  – векторы положения и вращающих моментов соединений,  $D(q)$  – матрица инерции размерностью  $n \times n$ ,  $C(q, \dot{q})\dot{q}$  –  $n$ -мерный вектор Кориолиса и центробежной силы,  $G(q)$  –  $n$ -мерный вектор сил гравитации.

Вид манипулятора с тремя степенями свободы представлен на рис. 1.

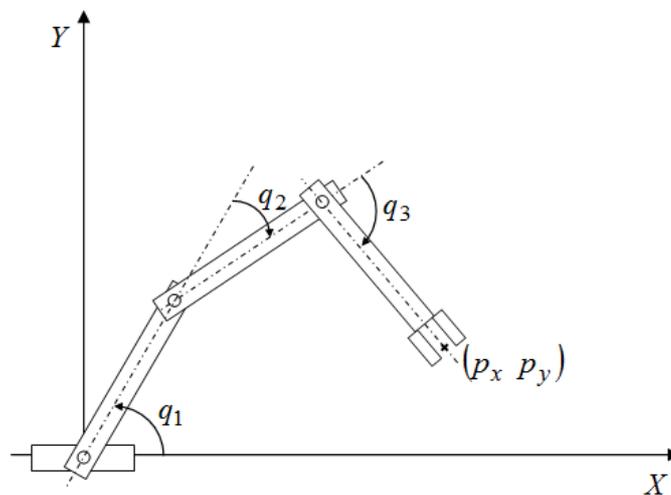


Рис. 1. Манипулятор с тремя степенями свободы

Для реализации модели динамическое уравнение манипулятора выражается относительно  $\ddot{q}$ :

$$\ddot{q} = [\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)]D^{-1}(q), \tag{0.2}$$

где  $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ ,  $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ ,  $G(q) = [G_{11} \ G_{21} \ G_{31}]^T$  – векторы-столбцы, соответственно, положений соединений, управляющих и гравитационных воздействий,

$$D(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}, \quad C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}. \tag{0.3}$$

Подробное описание элементов матриц и векторов приведено в [3].

Задачей манипулятора с тремя степенями свободы является позиционирование устройства захвата в заданной точке  $(p_x \ p_y)$ , что осуществляется установкой положений соединений манипулятора  $q_1, q_2, q_3$ , приводимых приводами в движение, на заданном уровне. Уравнение связи положений соединений и устройства захвата записывается следующим образом:

$$\begin{cases} p_x = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ p_y = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \end{cases}. \tag{0.4}$$

Так как в качестве опорного сигнала модели выступает вектор положений соединений манипулятора  $[q_1, q_2, q_3]$ , необходимо ввести метод нахождения указанного вектора при известных координатах декартова пространства  $(p_x, p_y)$ , т.е. ввести метод решения обратной задачи динамики для манипулятора с тремя степенями свободы.

Для решения обратной задачи динамики в качестве критерия качества принимается условие равномерного распределения нагрузки на приводы двух дальних от основания звеньев.

Условие равномерного распределения выражается в равенстве по модулю углов  $q_1^0, q_2$  и  $q_3$  при отсчете угла  $q_1^0$  относительно радиус-вектора на конечную точку устройства захвата, т.е. если  $q_1^0 = -q_2 = -q_3$ , при известных уравнениях, связывающих углы соединений и координаты конечной точки устройства захвата  $(p_x, p_y)$  из (0.4) получаем:

$$q_1^0 = \frac{\sqrt{p_x^2 + p_y^2} - l_2}{l_2 + l_3}, \quad q_2 = q_3 = -q_1^0, \quad q_1 = q_1^0 + \arctg \frac{p_x}{p_y}. \quad (0.5)$$

Определив математическую модель ОУ и метод определения тестового пространства, далее приступим к виртуальному моделированию САУ.

Согласно приведенной математической модели (0.2) была построена *Matlab/Simulink* модель (см. рис. 2).

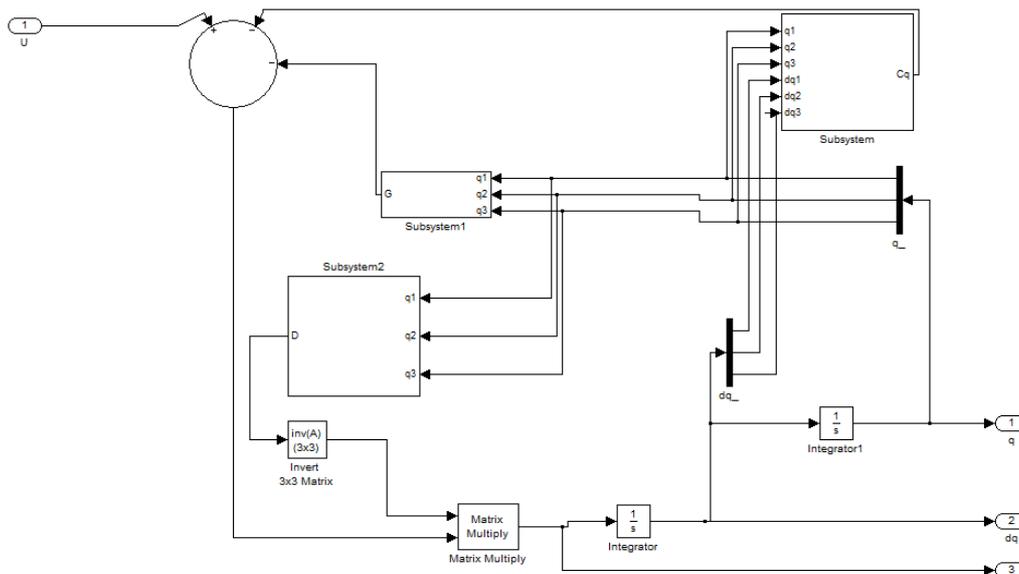


Рис. 2. Манипулятор с тремя степенями свободы

## 2. Разработка модели системы автоматического управления манипулятором с тремя степенями свободы

### 2.1. Описание системы автоматического управления

В работе [3] рассмотрена конструкция САУ на основе ПИД-регулятора с параметрами управления, определяемыми с использованием математической модели линейного цифрового ПИД-регулятора.

Согласно приведенной в [3] методике диапазон изменения условных коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  выражается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
0 \leq K_1 \leq y_{\max}/e \\
2K_1 - y_{\max}/e \leq K_2 \leq 2K_1 \\
2K_2 - 3K_1 \leq K_3 \leq y_{\max}/e + 2K_2 - 3K_1
\end{aligned}
\quad , \quad (0.6)$$

откуда коэффициенты ПИД-регулятора определяются как

$$K_p = (K_1 + K_2 - 3K_3)/2, K_I = (K_1 - K_2 + K_3)/T, K_D = TK_3. \quad (0.7)$$

Так как регулируемая величина (положения соединений  $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ ) представляет собой вектор-столбец, матрица коэффициентов ПИД-регулятора будет иметь вид:

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} K_{p1} & K_{p2} & K_{p3} \\ K_{D1} & K_{D2} & K_{D3} \\ K_{I1} & K_{I2} & K_{I3} \end{bmatrix}, \quad (0.8)$$

где  $K_{p_i}, K_{D_i}, K_{I_i}$  – соответственно пропорциональные, дифференциальные и интегральные коэффициенты звена  $i$ .

В соответствие с (0.6) были сформированы три матрицы коэффициентов ПИД-регулятора, соответствующих минимальным, максимальным и средним значениям из определенных в (0.6) диапазонов. В результате использования полученных матриц коэффициентов цель управления не достигалась, переходные процессы в позиционировании звеньев имели неустойчивый характер.

После проведения дополнительных исследований по влиянию коэффициентов ПИД-регулятора на качество управления была сформирована следующая матрица коэффициентов:

$$K_{pid} = \begin{bmatrix} 202,9226 & 202,9226 & 202,9226 \\ 16,2338 & 16,2338 & 16,2338 \\ 811,6902 & 811,6902 & 811,6902 \end{bmatrix}. \quad (0.9)$$

Таким образом, после определения параметров управления создана математическая основа для реализации управляющего звена. В следующем разделе приводятся результаты конструирования САУ на основе ПИД-регулятора в среде *Matlab/Simulink*.

## 2.2. Моделирование системы управления в среде *Matlab/Simulink*

Реализация модели САУ в среде *Matlab/Simulink* представлена на рис. 3, где ОУ реализован в виде блока *robot*.

В качестве тестового пространства выбрана группа из десяти точек первой четверти рабочего пространства. На рис. 4 приведено изображение выбранной группы, а также максимальный теоретический радиус рабочего пространства манипулятора.

Оценка производится по трем нижеприведенным параметрам.

Параметр 1. Метрическая ошибка позиционирования захватного устройства манипулятора. Приемлемым считается значение не более 0,01.

Параметр 2. Время завершения переходного процесса.

Параметр 3: Длина траектории движения устройства захвата манипулятора.

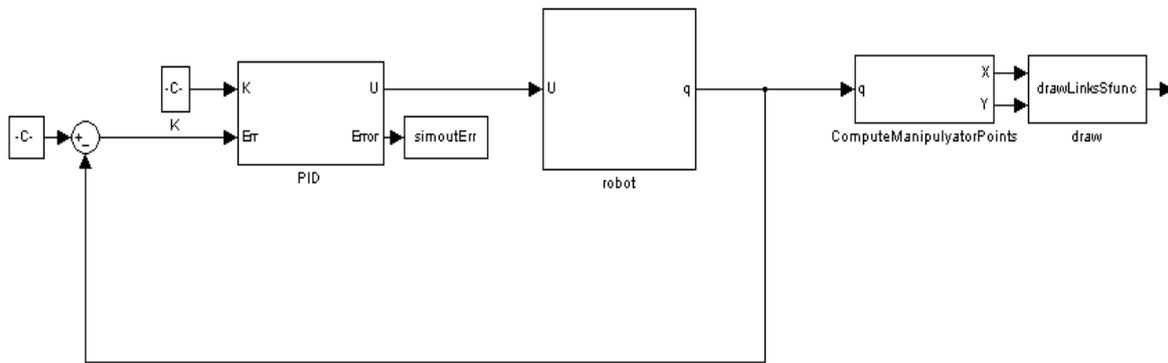


Рис. 3. Модель системы управления в Matlab/Simulink

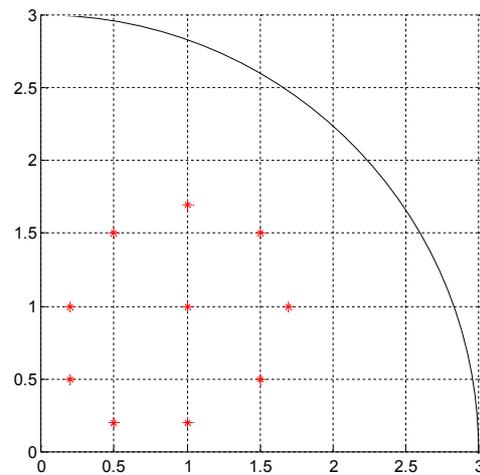


Рис. 4. Группа точек тестового пространства

В табл. 1-2 приведены результаты тестирования модели САУ по трем вышеуказанным параметрам при использовании матриц постоянных коэффициентов, полученных с использованием математической модели линейного цифрового ПИД-регулятора.

Табл. 1. Результаты моделирования САУ на точках 1-5 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{pid}$ | Точка 1              | Точка 2 | Точка 3     | Точка 4              | Точка 5 |        |
|------------------------|----------------------|---------|-------------|----------------------|---------|--------|
| Координата X           | 1                    | 1.5000  | 0.2000      | 1.5000               | 0.5000  |        |
| Координата Y           | 1                    | 1.5000  | 0.5000      | 0.5000               | 1.5000  |        |
| Параметр 1             | Расходящийся процесс |         | 5.0190e-005 | Расходящийся процесс |         |        |
| Параметр 2             |                      |         | q1          |                      |         | 2.9550 |
|                        |                      |         | q2          |                      |         | 0.9785 |
|                        |                      |         | q3          |                      |         | 0.7828 |
| Параметр 3             |                      |         | 6.9888      |                      |         |        |

Табл. 2. Результаты моделирования САУ на точках 6-10 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{min}$ |        | Точка 6     | Точка 7              | Точка 8 | Точка 9 | Точка 10 |                      |
|------------------------|--------|-------------|----------------------|---------|---------|----------|----------------------|
| Координата X           |        | 0.5000      | 1                    | 1.7000  | 1       | 0.2000   |                      |
| Координата Y           |        | 0.2000      | 1.7000               | 1       | 0.2000  | 1        |                      |
| Параметр 1             | < 0.01 | 3.5089e-005 | Расходящийся процесс |         |         | 0.0080   | Расходящийся процесс |
| Параметр 2             | q1     | 1.2684      |                      |         |         | 6.7945   |                      |
|                        | q2     | 0.9833      |                      |         |         | 4.6903   |                      |
|                        | q3     | 0.6490      |                      |         |         | 0.6293   |                      |
| Параметр 3             |        | 5.9952      | 15.3983              |         |         |          |                      |

Из результатов тестирования видно, что при использовании полученных параметров управления из десяти рассмотренных тестовых точек семь создают незатухающие переходные процессы; только три тестовые точки создают сходящиеся переходные процессы (3, 6 и 9) и удовлетворяют заданному метрическому показателю (параметр 1).

Динамика манипулятора с тремя степенями свободы представлена на рис. 5 (а и б, соответственно, для точек 3 и 6). Изменение положений звеньев манипулятора приведено на рис. 6, где а – изменение положений для точки 3, а б – изменение положений для точки 6.

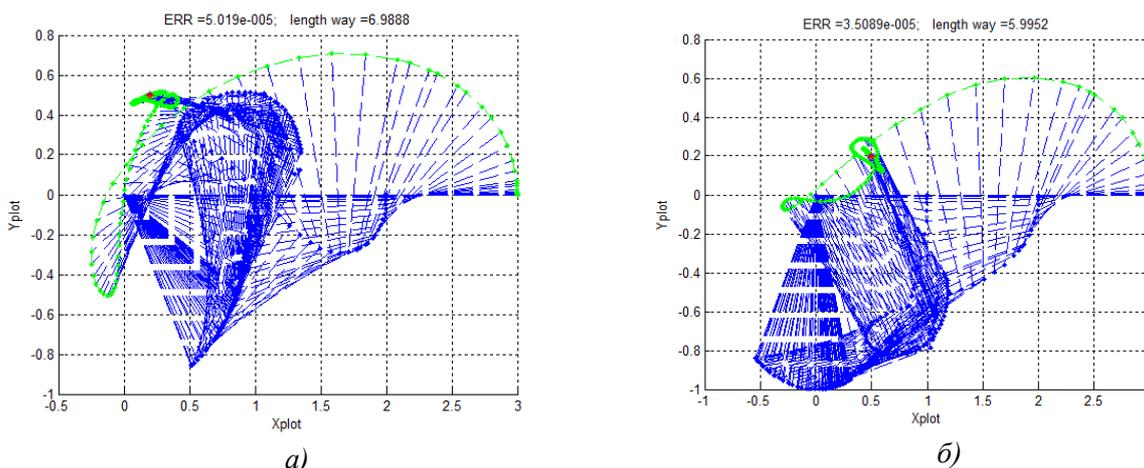


Рис. 5. Траектория движения манипулятора

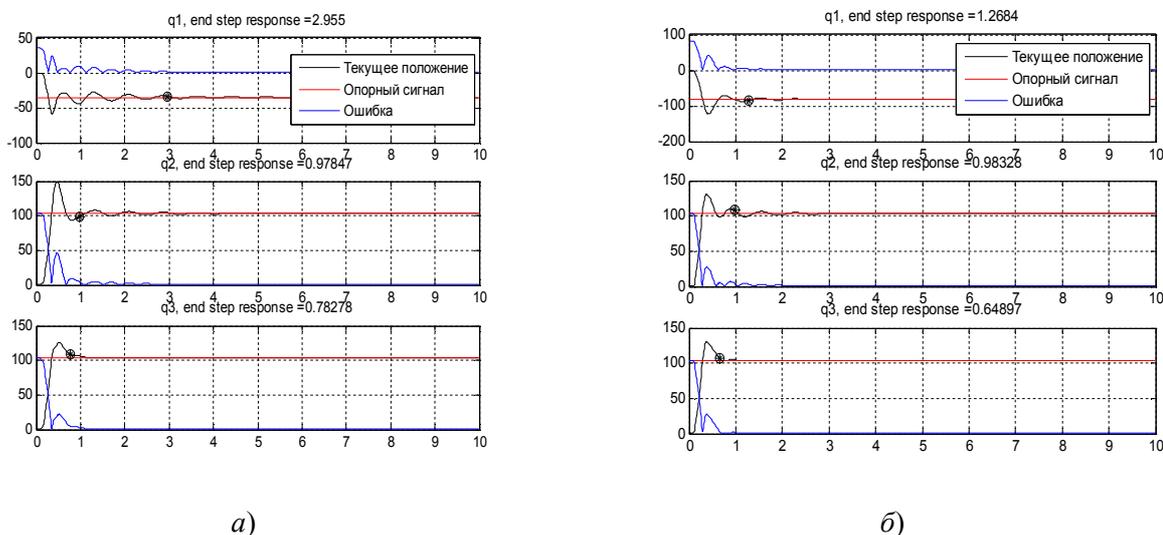


Рис. 6. Изменение положений звеньев манипулятора

При тестировании САУ с применением выбора постоянных коэффициентов ПИД-регулятора из аналитически определенных диапазонов с использованием математической модели линейного цифрового ПИД-регулятора из десяти экспериментов задача позиционирования была решена только в двух экспериментах.

Для улучшения динамики манипулятора с тремя степенями свободы далее будет рассмотрен метод определения постоянных коэффициентов ПИД-регулятора на основе ГА.

### **3. Разработка модели ИСУ манипулятором с тремя степенями свободы на основе генетического алгоритма**

В предыдущей главе была рассмотрена САУ, построенная на ПИД-регуляторе, параметры управления которого принимались из аналитически определенных диапазонов с использованием математической модели цифрового ПИД-регулятора. Полученные коэффициенты изменялись в диапазоне от нулевого до третьего порядка. Однако аналитический выбор набора коэффициентов привел только к двум успешным решениям задачи позиционирования из десяти тестов.

В данной главе предлагается из определенного диапазона коэффициентов ПИД-регулятора случайным процессом (не учитывая используемую в главе 2 аналитическую зависимость) подобрать решение, удовлетворяющее некоторому заданному критерию качества. В качестве поискового механизма будет применен ГА.

В первом разделе приведено описание структурной схемы, разрабатываемой ИСУ на ГА, а также математическая модель ГА; на основе анализа различных моделей ГА произведен выбор оптимальной модели с точки зрения решения задачи позиционирования захватного устройства манипулятора. В разделе 2 приведены результаты тестирования ИСУ на ГА, проведено ее сравнение с САУ, рассмотренной в главе 2. В разделе 3 производится приближение модели ИСУ на ГА к реальной, описывается изменение поведения системы в результате введения ограничений.

#### **3.1. Структура интеллектуальной системы управления на основе генетического алгоритма.**

Конструирование ИСУ на ГА заключается в введении в рассмотренную в главе 2 САУ (рис. 7) звена, реализующего *offline*-поиск параметров управления.

На рис. 7 приведена структурная схема ИСУ на ГА.

Задачей ГА является выбор параметров ПИД-регулятора с целью минимизации ошибки управления.

Математическая модель ГА может быть представлена следующим упорядоченным набором [7], [4]:

$$\langle C, F, P^0, \mu, \Omega(p^\Omega), \Gamma(p^\Gamma), \Delta(p^\Delta), \Psi \rangle, \quad (0.10)$$

где  $C$  – система кодирования: отображение пространства решений в некоторое пространство, на котором определены генетические операции;  $F$  – функция пригодности (ФП): критерий, определяющий качество индивида;  $P^0$  – начальная популяция: набор распределенных в пространстве кодирования элементов;  $\mu$  – размер начальной популяции: количество индивидов в популяции;  $\Omega(p^\Omega)$  – операция селекции, где  $p^\Omega$  – вероятность селекции: вероятностная операция для воспроизведения большего числа хромосом с большим значением функции пригодности в следующем поколении;  $\Gamma(p^\Gamma)$  – операция скрещивания, где  $p^\Gamma$  – вероятность скрещивания: вероятностная операция для обмена генетической информацией между индивидуумами, входящими в данную популяцию;  $\Delta(p^\Delta)$  – операция мутации, где  $p^\Delta$  – вероятность мутации: вероятностная операция для внесения новой информации в данную популяцию;  $\Psi$  – условие остановки: условие завершения работы ГА.

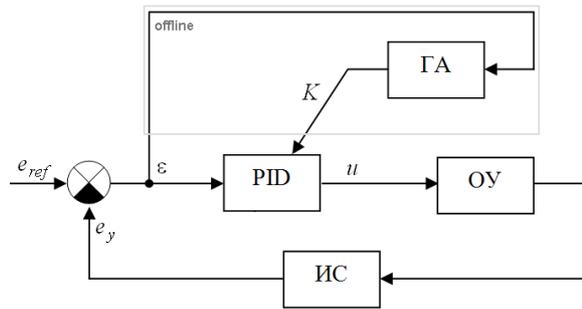


Рис. 7. Структурная схема ИСУ на ГА

Набор параметров ГА определяет характер поискового процесса. После проведения исследований по влиянию параметров модели ГА на качество управления в качестве оптимальной была выбрана следующая модель ГА:

$$\left\langle \begin{array}{l} \text{бинарное кодирование,} \\ [\min(\varepsilon_{P1}^2) + \min(\varepsilon_{P2}^2) + \min(\varepsilon_{P3}^2) + \min(\varepsilon_{I1}^2) + \min(\varepsilon_{I2}^2) + \min(\varepsilon_{I3}^2)] / 6, \\ [\text{rand}(0 : 10^3), \text{rand}(0 : 10^3), \dots, \text{rand}(0 : 10^3)], \\ 200, \Omega(0.5), \Gamma(0.5), \Delta(0.5), \text{количество итераций} > 15 \end{array} \right\rangle \quad (0.11)$$

с соответствующим набором коэффициентов:

$$K_{GA} = \begin{bmatrix} 762.463 & 841.642 & 994.135 \\ 42.0332 & 28.348 & 10.7527 \\ 980.45 & 985.337 & 750.733 \end{bmatrix}. \quad (0.12)$$

Рассмотрим поведение системы при использовании матрицы коэффициентов ПИД-регулятора  $K_{GA}$  (0.12).

### 3.2. Моделирование динамического поведения манипулятора с тремя степенями свободы под управлением интеллектуальной системы на основе генетического алгоритма в среде Matlab/Simulink

В табл. 3-4 приводятся результаты тестирования модели ГА (0.11) с соответствующим набором коэффициентов  $K_{GA}$  (0.12), которая в предыдущем разделе определена как оптимальная. Из табл. 3-4 видно, что во всех предложенных ИСУ десяти экспериментах задача позиционирования решается с точностью, превышающей заданную более чем в 100 раз.

Табл. 3. Результаты моделирования ИСУ на основе ГА на точках 1-5 тестового пространства

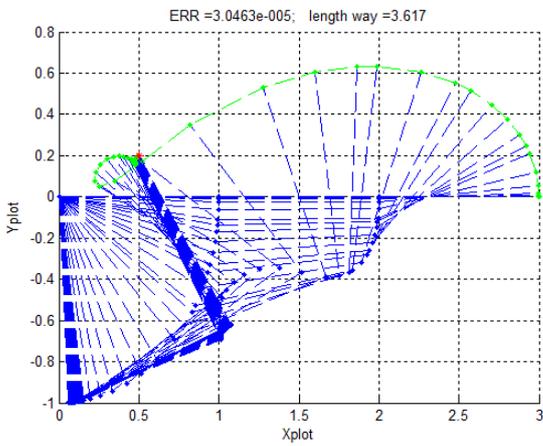
| Тест матрицы $K_{GA}$ | Точка 1 | Точка 2     | Точка 3     | Точка 4     | Точка 5     |             |
|-----------------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Координата X          | 0.5000  | 1           | 1.7000      | 1           | 0.2000      |             |
| Координата Y          | 0.2000  | 1.7000      | 1           | 0.2000      | 1           |             |
| Параметр 1            | < 0.01  | 2.4634e-005 | 8.4443e-006 | 2.7174e-005 | 4.6785e-005 | 5.4963e-005 |
| Параметр 2            | q1      | 0.8763      | 1.7450      | 0.6809      | 0.7234      | 2.8640      |
|                       | q2      | 0.5453      | 0.7958      | 0.4961      | 0.3812      | 0.7232      |
|                       | q3      | 0.3797      | 0.4602      | 0.3794      | 0.3519      | 0.4147      |
| Параметр 3            | 3.0251  | 3.6556      | 3.5973      | 2.6419      | 4.5646      |             |

Табл. 4. Результаты моделирования ИСУ на основе ГА на точках 6-10 тестового пространства

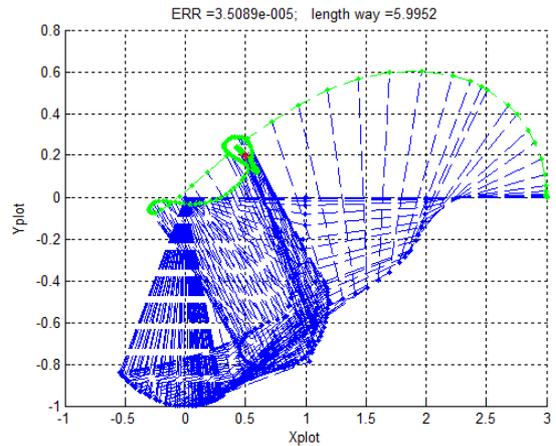
| Тест матрицы $K_{GA}$ |        | Точка 6     | Точка 7     | Точка 8     | Точка 9     | Точка 10    |
|-----------------------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Координата X          |        | 0.5000      | 1           | 1.7000      | 1           | 0.2000      |
| Координата Y          |        | 0.2000      | 1.7000      | 1           | 0.2000      | 1           |
| Параметр 1            | < 0.01 | 3.0463e-005 | 3.0394e-005 | 2.5477e-005 | 9.3946e-006 | 1.4141e-005 |
| Параметр 2            | q1     | 0.5485      | 3.3205      | 1.0348      | 0.5784      | 0.8818      |
|                       | q2     | 0.3526      | 0.7700      | 0.6190      | 0.3431      | 0.6202      |
|                       | q3     | 0.3232      | 0.4042      | 0.4062      | 0.3235      | 0.4167      |
| Параметр 3            |        | 3.6170      | 4.6035      | 2.3683      | 3.3352      | 3.9957      |

Рассмотрим динамику манипулятора с тремя степенями свободы при управлении ИСУ на ГА в сравнении с управлением САУ, рассмотренной в главе 2. Для сравнения выбран эксперимент 6.

На рис. 8 и 9 представлены динамика ОУ и изменение положений звеньев манипулятора для ИСУ на ГА и САУ на ПИД-регуляторе (соответственно, а и б).

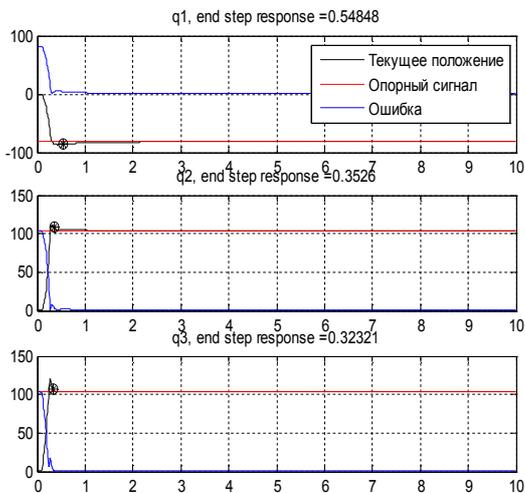


а)

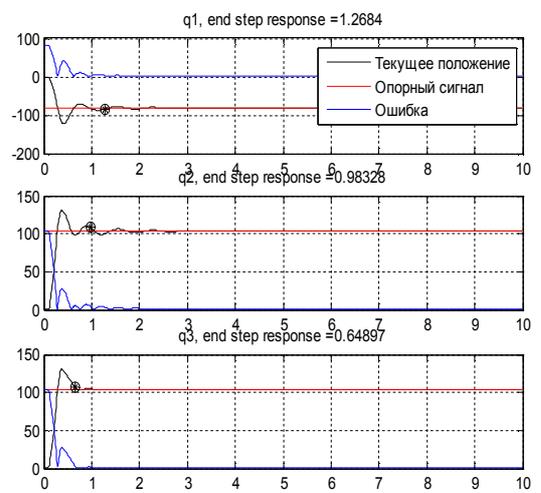


б)

Рис. 8. Траектория движения манипулятора



а)



б)

Рис. 9. Изменение положений звеньев манипулятора

На рис. 9 видно, что при использовании ИСУ на ГА траектория движения устройства захвата манипулятора уменьшается (Параметр 3).

Кроме того, в отличие от САУ на ПИД-регуляторе, где основная задача позиционирования была решена только в трех экспериментах, ИСУ на ГА обеспечивает устойчивое решение во всем тестовом пространстве (см. табл. 1-4).

Рассмотренные системы управления являются идеализированными моделями. В них не учитываются помехи управляющих сигналов, запаздывание систем измерения, ограниченность диапазона воздействующих сигналов и приводных механизмов и др.

Для приближения модели системы управления к реальной, необходимо введение ряда ограничений.

### 3.3. Приближение к реальной модели системы управления

Для приближения модели ИСУ к реальной модели в систему управления вводятся ограничения (рис. 10).

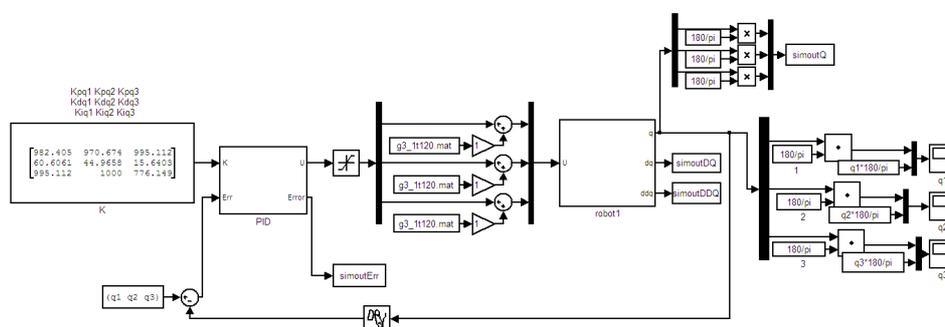


Рис. 10. ИСУ на ГА приближенная к реальной модели

В ИСУ вводятся следующие ограничения:

- ограничение и зашумление управляющего сигнала PID-регулятора,
- задержка в системе измерения.
- ограничение скорости изменения углов ( $\pm 500^\circ/\text{с}$ ),
- ограничение углов ( $\pm 180^\circ$ ).

В табл. 5-6 приведен анализ ИСУ на ГА, приближенной к реальной модели. Из результатов тестирования видно, что из десяти экспериментов задача позиционирования была решена в трех случаях, в трех экспериментах заданная точность не была достигнута, в четырех тестах были получены расходящиеся переходные процессы.

Табл. 5. Результаты моделирования ИСУ на основе ГА, приближенной к реальной, на точках 1-5 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{GA}$ | Точка 1 | Точка 2              | Точка 3 | Точка 4 | Точка 5 |         |         |
|-----------------------|---------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Координата X          | 0.5000  | 1                    | 1.7000  | 1       | 0.2000  |         |         |
| Координата Y          | 0.2000  | 1.7000               | 1       | 0.2000  | 1       |         |         |
| Параметр 1            | < 0.01  | 0.0037               | 0.0667  | 0.0132  | 0.0019  |         |         |
| Параметр 2            | q1      | 9.4502               | 10.0000 | 10.0000 | 10.0000 |         |         |
|                       | q2      | 3.0155               | 9.8146  | 8.9277  | 3.7608  |         |         |
|                       | q3      | 2.3540               | 3.9028  | 2.3477  | 3.0676  |         |         |
| Параметр 3            | 13.7430 | Расходящийся процесс |         |         | 26.7441 | 18.4326 | 18.9980 |

Табл. 6. Результаты моделирования ИСУ на основе ГА, приближенной к реальной, на точках 6-10 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{GA}$ | Точка 6 | Точка 7 | Точка 8              | Точка 9              | Точка 10             |                      |         |
|-----------------------|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| Координата X          | 0.5000  | 1       | 1.7000               | 1                    | 0.2000               |                      |         |
| Координата Y          | 0.2000  | 1.7000  | 1                    | 0.2000               | 1                    |                      |         |
| Параметр 1            | < 0.01  | 0.0419  | Расходящийся процесс | Расходящийся процесс | 0.0017               |                      |         |
| Параметр 2            | q1      | 10.0000 |                      |                      | Расходящийся процесс | Расходящийся процесс | 10.0000 |
|                       | q2      | 10.0000 |                      |                      |                      |                      | 2.3716  |
|                       | q3      | 6.9654  |                      |                      |                      |                      | 1.9071  |
| Параметр 3            |         | 41.2778 |                      |                      | 10.8224              |                      |         |

Демонстрация изменения переходных процессов при приближении модели системы управления к реальной проведена для экспериментов 1, 5 и 10 (эксперименты с решенной задачей позиционирования) – соответственно, рис. 11, 12 и 13 (а и б – соответственно, до и после введения ограничений).

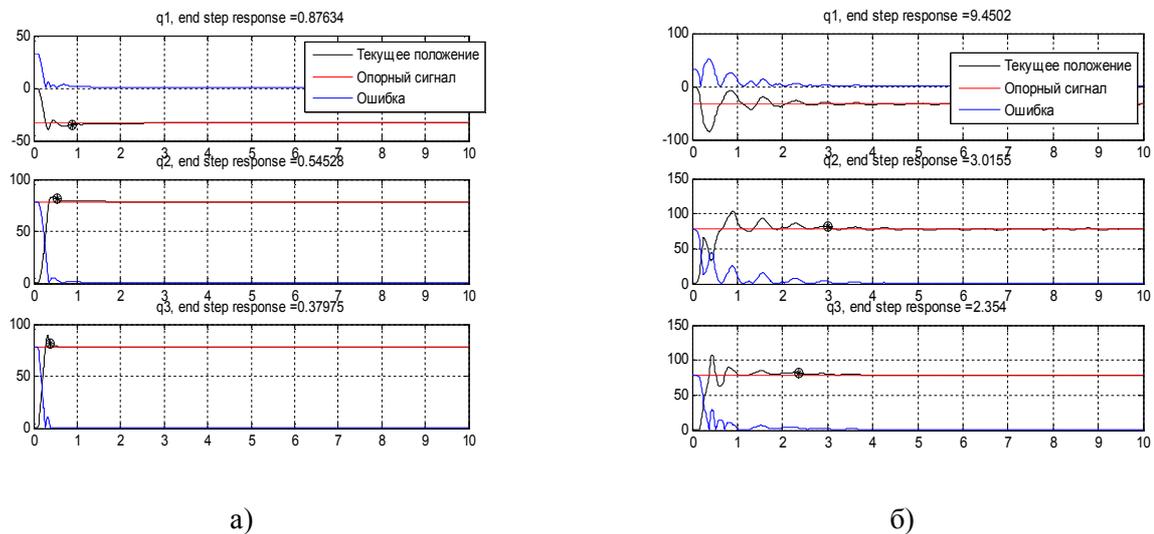


Рис. 11. Изменение положений звеньев манипулятора – эксперимент 1

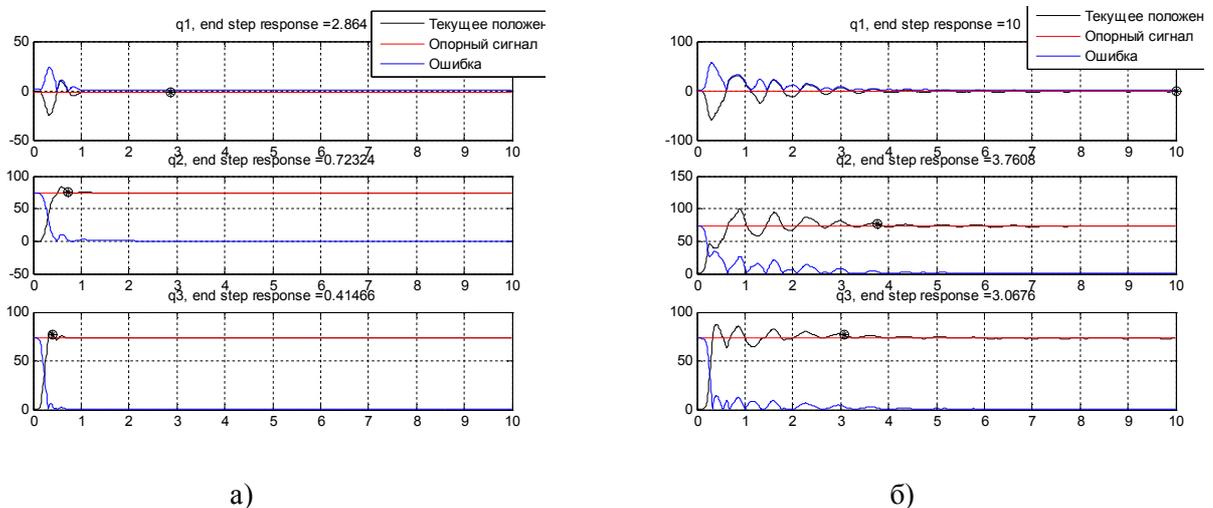


Рис. 12. Изменение положений звеньев манипулятора – эксперимент 5

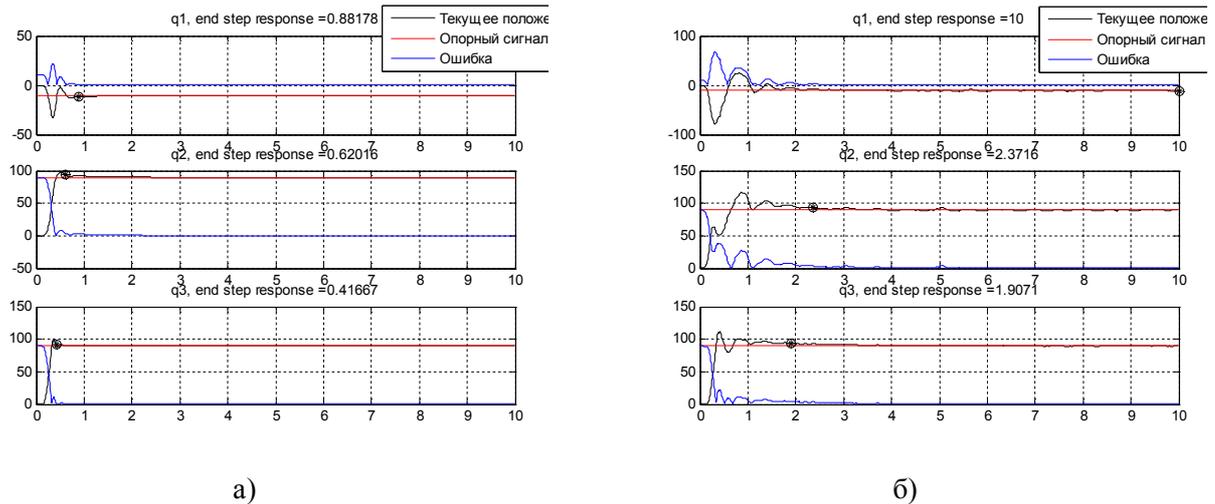


Рис 13. Изменение положений звеньев манипулятора – эксперимент 10

Переопределим матрицу коэффициентов ПИД-регулятора, с учетом введения ограничений в модель ИСУ, используя модель ГА (0.11). Полученная в результате работы ГА матрица коэффициентов ПИД-регулятора:

$$K_{GAsaturati\ on} = \begin{bmatrix} 984.36 & 256.109 & 590.42 \\ 0 & 35.1906 & 56.696 \\ 499.511 & 992.18 & 991.202 \end{bmatrix}. \quad (0.13)$$

В табл. 7-8 приведен анализ ИСУ на ГА, приближенной к реальной модели с матрицей коэффициентов  $K_{GAsaturati\ on}$  (0.13). Из результатов тестирования видно, что из десяти экспериментов задача позиционирования была решена только в двух случаях (точки 9 и 10), в шести экспериментах заданная точность не была достигнута, в двух тестах были получены расходящиеся переходные процессы (точки 3 и 6).

Таким образом, при приближении ИСУ на ГА к реальной модели система управления не справляется с задачей позиционирования устройства захвата манипулятора.

Для решения задачи позиционирования применим новую структуру ИСУ на основе ОБЗ на мягких вычислениях с динамической подстройкой коэффициентов ПИД-регулятора.

Табл. 7. Результаты моделирования ИСУ на основе ГА, приближенной к реальной, на точках 1-5 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{GAaturati\ on}$ | Точка 1 | Точка 2 | Точка 3 | Точка 4 | Точка 5 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Координата X                     | 0.5000  | 1       | 1.7000  | 1       | 0.2000  |
| Координата Y                     | 0.2000  | 1.7000  | 1       | 0.2000  | 1       |
| Параметр 1                       | < 0.01  | 0.0113  | 0.1982  | 0.1723  | 0.0108  |
| Параметр 2                       | q1      | 3.5332  | 10      | 10      | 10.0000 |
|                                  | q2      | 4.0145  | 10      | 10      | 7.5395  |
|                                  | q3      | 2.1526  | 10      | 10      | 2.8207  |
| Параметр 3                       | 10.3144 | 71.2518 |         | 38.3590 | 16.2208 |

Табл. 8. Результаты моделирования ИСУ на основе ГА, приближенной к реальной, на точках 6-10 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{GAuration}$ |        | Точка 6              | Точка 7 | Точка 8 | Точка 9 | Точка 10 |
|------------------------------|--------|----------------------|---------|---------|---------|----------|
| Координата X                 |        | 0.5000               | 1       | 1.7000  | 1       | 0.2000   |
| Координата Y                 |        | 0.2000               | 1.7000  | 1       | 0.2000  | 1        |
| Параметр 1                   | < 0.01 | Расходящийся процесс | 0.0387  | 0.3756  | 0.0094  | 0.0022   |
| Параметр 2                   | q1     |                      | 10      | 10      | 1.3018  | 8.8342   |
|                              | q2     |                      | 10      | 10      | 2.0447  | 2.8497   |
|                              | q3     |                      | 10      | 10      | 1.8212  | 2.6554   |
| Параметр 3                   |        |                      | 53.7946 | 62.6880 | 11.6133 | 12.5585  |

#### 4. Разработка модели ИСУ манипулятором с тремя степенями свободы на основе оптимизатора баз знаний на мягких вычислениях

В предыдущей главе была рассмотрена работа ИСУ на ГА. Система справлялась с поставленной задачей позиционирования с хорошей точностью (полученные ошибки более чем в 100 раз меньше заданной). Однако после приближения модели к реальной, количество экспериментов с удовлетворительной точностью в лучшем случае упало до трех из десяти. Повторная оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора с помощью ГА с учетом введенных ограничений не улучшила результатов (задача позиционирования была решена только для двух экспериментов).

В данной главе рассматривается ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях. В первом разделе производится обзор технологий, лежащих в основе инструментария ОБЗ. Во втором разделе описывается структура ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях. Третий раздел демонстрирует поведение ОУ под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР в сравнении с ИСУ на ГА, обосновывается необходимость введения разделенного управления. В четвертом разделе вводится классификация ИСУ с разделенным управлением, производится анализ сформированных структур с тремя НР. В пятом разделе рассматривается поведение манипулятора с тремя степенями свободы под управлением ИСУ параллельной структуры для трех звеньев на ОБЗ на мягких вычислениях.

##### 4.1. Технология мягких вычислений

Основой технологии мягких вычислений является нечеткая логика, в которой не используется закон исключения третьего. Это приводит к нестандартному выводу о возможности одновременного рассмотрения одной количественной переменной как нескольких (возможно, и логически противоположных) лингвистических переменных с различными значениями функции принадлежности на заданной качественной лингвистической шкале.

Введение в рамках теории нечетких систем субъективной качественной шкалы и отображение в нее в виде лингвистической аппроксимации количественной характеристики вызывает определенные логические трудности, как, например:

1. объективное определение вида функции принадлежности и ее параметров в продукционных правилах БЗ,
2. определение оптимальной структуры ННС в задачах обучения (аппроксимация обучающего сигнала с требуемой ошибкой и с минимальным количеством продукционных правил в БЗ),
3. применение ГА в задачах многокритериального управления при наличии дискретных ограничений на параметры объекта управления и др.

Перечисленные проблемы были апробированы и решены на основе ОБЗ с применением технологии мягких вычислений задач [5, 6, 8]. Интеллектуальный инструментальный позволил проектировать

робастные БЗ на основе решения одной из алгоритмически трудно решаемых задач теории искусственного интеллекта – извлечения, обработки и формирования объективных знаний без использования экспертных оценок. В данном оптимизаторе используются три ГА, которые позволяют спроектировать, как следствие, оптимальную структуру ННС (вид функций принадлежности и их параметры, количество внутренних слоев и др.), аппроксимирующей обучающий сигнал с требуемой ошибкой.

Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментарии ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ, и решать сложные задачи формирования объективных знаний.

ОБЗ является инструментарием построения БЗ робастных ИСУ на основе мягких вычислений с использованием функций пригодности ГА, таких как термодинамические и информационно-энтропийные критерии качества управления [2]. Для построения БЗ с использованием ОБЗ необходимо наличие обучающего сигнала, который может быть получен либо на этапе стохастического моделирования поведения ОУ, проведенного с использованием его математической модели, либо экспериментально, путем непосредственного измерения динамических параметров физической модели ОУ.

## 4.2. Структура интеллектуальной системы управления на оптимизаторе баз знаний на мягких вычислениях

На рис. 14 приведена структурная схема ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, где  $e_{ref}$  – воздействующий (задающий) сигнал,  $e_y$  – регулируемая величина,  $\varepsilon$  – ошибка управления,  $u$  – управляющее воздействие регулятора на ОУ,  $m(t)$  – внешнее воздействие среды (шум),  $d(t)$  – задержка в системе измерения,  $K$  – коэффициенты нечеткого ПИД-регулятора.

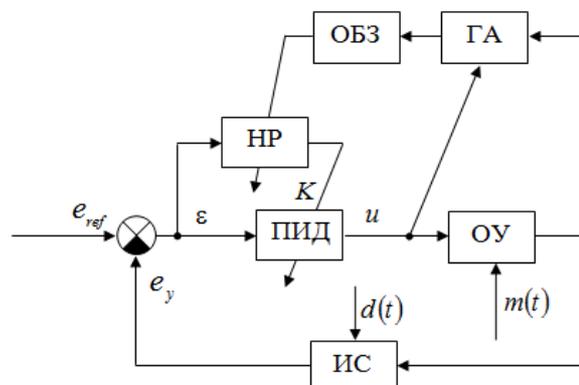


Рис. 14. Структурная схема ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

Создание БЗ происходит в несколько этапов [2].

Этап 0: Создание обучающего сигнала.

Блок ГА (рис. 14) создает обучающий сигнал, содержащий оптимальные коэффициенты  $K$  (выходные значения ГА), использование которых позволяет минимизировать значения ошибок управления  $\varepsilon$  (входные значения ГА), которые также сохраняются в обучающем сигнале.

Этап 1: Выбор модели нечеткого вывода.

Выбор типа нечеткой модели вывода (Сугено, Мамдани и т.д.), операции нечеткого «И» (произведение или минимум), число входных и выходных переменных.

Этап 2: Создание лингвистических переменных. Определение формы функций принадлежности и оптимизация.

На данном этапе определяется форма представления функции принадлежности лингвистических переменных для входных и выходных переменных.

С помощью генетического алгоритма (ГА1) 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, которые имеют вид:

$$H_{X_i|X_k}^{(j,l)} = H\left(x_j \Big|_{x_i=\mu_{X_i}^j, x_k=\mu_{X_k}^l}\right) = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[ \mu_{X_i}^j(x_i(t)) * \mu_{X_k}^l(x_k(t)) \right] \log \left[ \mu_{X_i}^j(x_i(t)) * \mu_{X_k}^l(x_k(t)) \right] \quad (0.14)$$

и

$$H_{X_i}^j = -p_{X_i}^j \log(p_{X_i}^j) = -p(x_i | x_i = \mu_{X_i}^j) \log \left[ p(x_i | x_i = \mu_{X_i}^j) \right] = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mu_{X_i}^j(x_i(t)) \log \left[ \mu_{X_i}^j(x_i(t)) \right] \quad (4.2)$$

соответственно.

Здесь \* – выбранная операция нечёткого «И»;  $X_i, i = \overline{1, m}$  – набор лингвистических переменных, соответствующих компонентам ОС;  $\mu_{X_i}^j, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, l_{X_i}}$  терм-множество, соответствующее  $i$ -й компоненте ОС  $x(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t))$  – компоненты ОС;  $N$  – число компонентов ОС.

Этап 3: Создание базы правил.

На данном этапе используется специальный алгоритм отбора наиболее робастных правил в соответствии со следующими критериями:

1) выбор правил, которые удовлетворяют следующим условиям:

$$R_{total\_fs}^l \geq TL,$$

где  $TL$  – заданный уровень активации правила, и

$$R_{total\_fs}^l = \sum_{k=1}^N R_{fs}^l(t_k), \text{ и } R_{fs}^l(t_k) = \prod \left[ \mu_{j1}^l(x_1(t_k)), \mu_{j2}^l(x_1(t_k)), \dots, \mu_{jn}^l(x_n(t_k)) \right], \quad (0.15)$$

где  $t_k$  – моменты времени,  $k = \overline{1, N}$ ;  $\mu_{jk}^l(x_k), k = \overline{1, n}$  – функции принадлежности входных переменных,  $l$  – индекс правила в БЗ; символ « $\Pi$ » обозначает операцию нечеткой конъюнкции;

2) выбор правил, которые удовлетворяют условию

$$\max_t R_{fs}^l(t) \geq TL. \quad (0.16)$$

Этап 4: Оптимизация базы правил.

С помощью генетического алгоритма (ГА2) оптимизируются правые части правил БЗ. Критерием качества на этом этапе выступает минимум ошибки аппроксимации обучающего сигнала:

$$E = \sum_{p=1}^N E^p, \quad E^p = 1/2 \left( F(x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p) - d^p \right)^2, \quad (0.17)$$

где  $F$  – выход ИСУ,  $d$  – целевое состояние ОУ.

На данном этапе находится решение, близкое к глобальному оптимуму (минимум ошибки аппроксимации обучающего сигнала).

Этап 5: Настройка базы правил.

С помощью генетического алгоритма (ГАЗ) оптимизируются левые и правые части правил БЗ, т.е. подбираются оптимальные параметры функций принадлежности входных/выходных переменных (с точки зрения заданной функции пригодности ГА). В данном процессе оптимизации используются различные функции пригодности, выбранные пользователем. В качестве таких функций может выступать как минимум ошибки аппроксимации ( $E = \sum_p E^p$ ), так и максимум совместной информационной энтропии ( $H_{X_i}^j$ ). Кроме того, может происходить настройка БЗ с помощью других оптимизационных алгоритмов, таких как алгоритм обратного распространения ошибки.

### 4.3. Моделирование динамического поведения манипулятора с тремя степенями свободы под управлением интеллектуальной системы на основе оптимизатора баз знаний на мягких вычислениях в среде Matlab/Simulink

Для демонстрации работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях была создана база знаний со следующими параметрами:

- 1) модель ГА для создания обучающего сигнала и трех ГА ОБЗ:

$$\left\langle \begin{array}{l} \text{бинарное кодирование,} \\ \left[ \min(\varepsilon_{p1}^2) + \min(\varepsilon_{p2}^2) + \min(\varepsilon_{p3}^2) + \min(\varepsilon_{i1}^2) + \min(\varepsilon_{i2}^2) + \min(\varepsilon_{i3}^2) \right] / 6, \\ [\text{rand}(0:10^3), \text{rand}(0:10^3), \dots, \text{rand}(0:10^3)], \\ 200, \Omega(0.99), \Gamma(0.99), \Delta(0.5), \text{количество итераций} > 15 \end{array} \right\rangle, \quad (0.18)$$

- 2) модель нечеткого вывода: Сугено 0,
- 3) операция нечеткого «И»: произведение,
- 4) число входных переменных: 9,
- 5) число выходных переменных: 9,
- 6) оптимизационный алгоритм: алгоритм обратного распространения ошибки.

Результаты тестирования полученной БЗ приведены в табл. 9-10.

По результатам тестирования видно, что ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях справляется с задачей позиционирования с заданной точностью во всех десяти предложенных экспериментах.

Рассмотрим динамику манипулятора с тремя степенями свободы при управлении ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в сравнении с управлением приближенной к реальной ИСУ на ГА, рассмотренной в главе 3. Для сравнения выбраны эксперименты 9 и 10, т.к. только в этих случаях ИСУ на ГА справляется с задачей позиционирования с заданной точностью (табл. 8).

Табл. 9. Результаты моделирования ИСУ на основе ОБЗ на мягких вычислениях, на точках 1-5 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{GAuration}$ |        | Точка 1 | Точка 2 | Точка 3 | Точка 4 | Точка 5 |
|------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Координата X                 |        | 0.5000  | 1       | 1.7000  | 1       | 0.2000  |
| Координата Y                 |        | 0.2000  | 1.7000  | 1       | 0.2000  | 1       |
| Параметр 1                   | < 0.01 | 0.0069  | 0.0048  | 0.0056  | 0.0053  | 0.0068  |
| Параметр 2                   | q1     | 3.8933  | 5.4782  | 5.0455  | 4.0162  | 6.0511  |
|                              | q2     | 2.8630  | 2.8780  | 2.7511  | 2.6821  | 2.9801  |
|                              | q3     | 3.5445  | 3.9712  | 2.8650  | 3.3017  | 3.0351  |
| Параметр 3                   |        | 3.6772  | 3.5262  | 5.0617  | 3.0505  | 4.4364  |

Табл. 10. Результаты моделирования ИСУ на основе ОБЗ на мягких вычислениях, на точках 6-10 тестового пространства

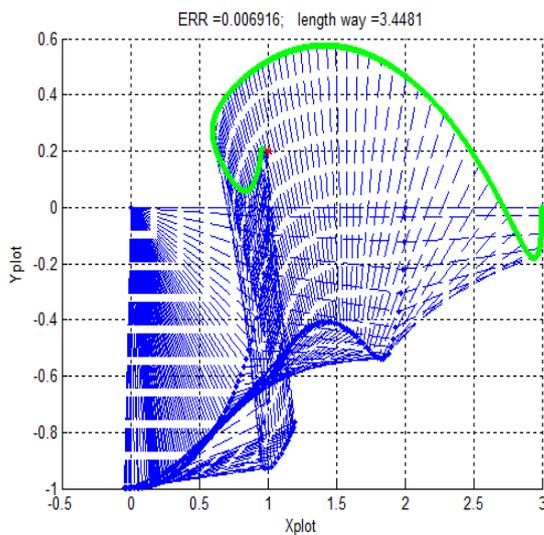
| Тест матрицы $K_{GAuration}$ |        | Точка 6 | Точка 7 | Точка 8 | Точка 9 | Точка 10 |
|------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Координата X                 |        | 0.5000  | 1       | 1.7000  | 1       | 0.2000   |
| Координата Y                 |        | 0.2000  | 1.7000  | 1       | 0.2000  | 1        |
| Параметр 1                   | < 0.01 | 0.0068  | 0.0066  | 0.0043  | 0.0069  | 0.0067   |
| Параметр 2                   | q1     | 4.3410  | 6.5947  | 4.2410  | 3.9233  | 3.0199   |
|                              | q2     | 2.7950  | 2.9987  | 2.7141  | 2.7691  | 2.9260   |
|                              | q3     | 3.0818  | 3.9197  | 3.6035  | 3.2587  | 2.6691   |
| Параметр 3                   |        | 4.4006  | 4.1477  | 2.9413  | 3.4481  | 4.6199   |

На рис. 15 и 17 представлены динамика ОУ для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ГА (соответственно, а и б). На рис. 16 и 18 представлены изменения положений звеньев манипулятора для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ГА (соответственно, а и б).

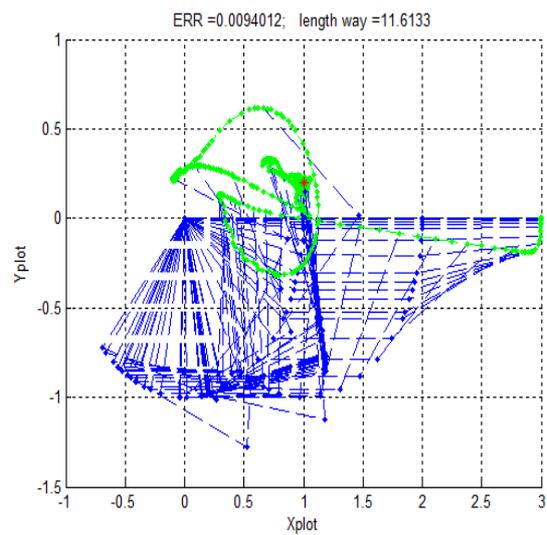
На рис. 15, б и 17, б видно, что при использовании приближенной к реальной ИСУ на ГА устройство захвата манипулятора до достижения конечной точки имеет колебательную траекторию, что приводит к значительному увеличению времени работы и затрачиваемой энергии.

Таким образом, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях обеспечивает устойчивое решение задачи позиционирования на всем тестовом пространстве (табл. 9-10), тогда как приближенная к реальной ИСУ на ГА справляется только в двадцати процентах случаев (табл. 7-8). Кроме того, предложенная ИСУ на ОБЗ траектория движения устройства захвата манипулятора имеет более сглаженный характер, чем предложенная ИСУ на ГА.

В рассмотренной ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях используется один нечеткий контроллер, содержащий по девять входов и выходов. Однако девятимерное пространство поиска достаточно велико, и, в некоторых случаях, создание баз знаний может занимать долгое время, а увеличение размерности пространства поиска (например, при добавлении дополнительных степеней свободы манипулятора) может оказаться невозможным.

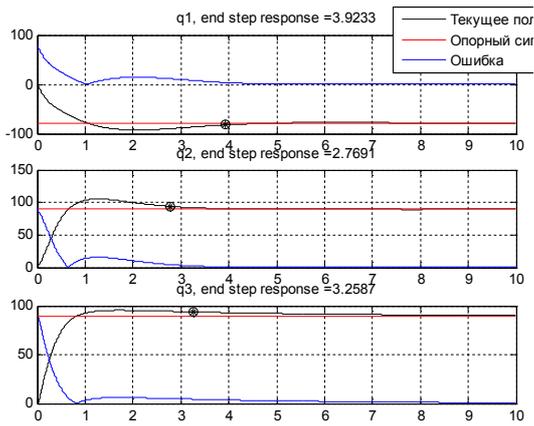


а) ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

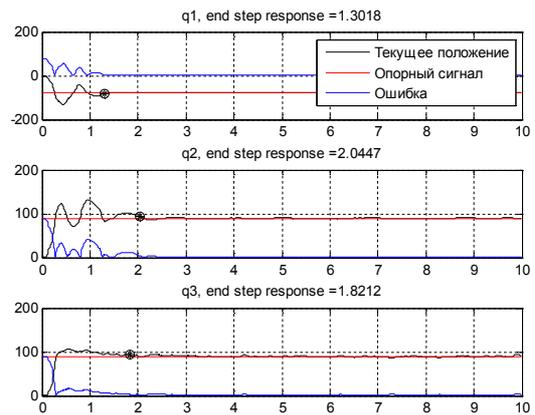


б) ИСУ на ГА

Рис. 15. Траектория движения манипулятора для эксперимента 9

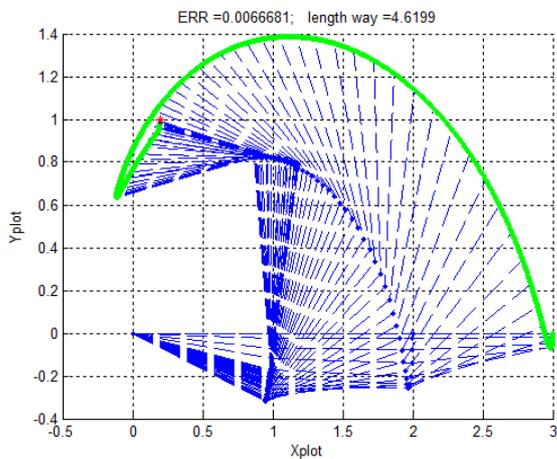


а) ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

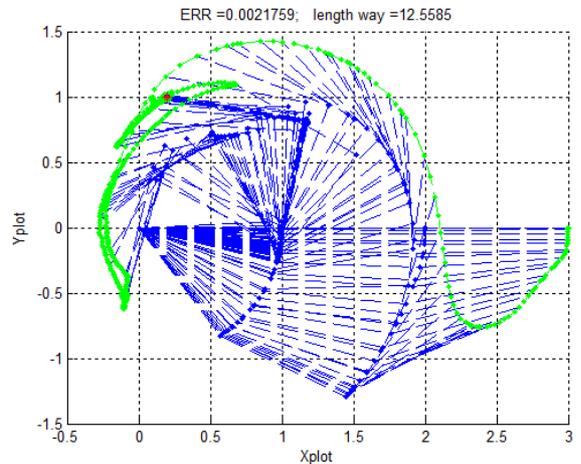


б) ИСУ на ГА

Рис. 16. Изменение положений звеньев манипулятора для эксперимента 9

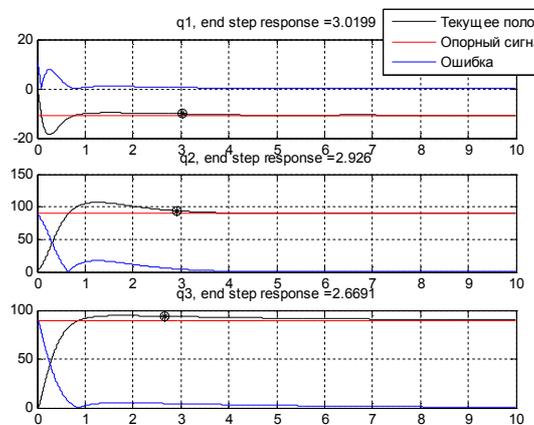


а) ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

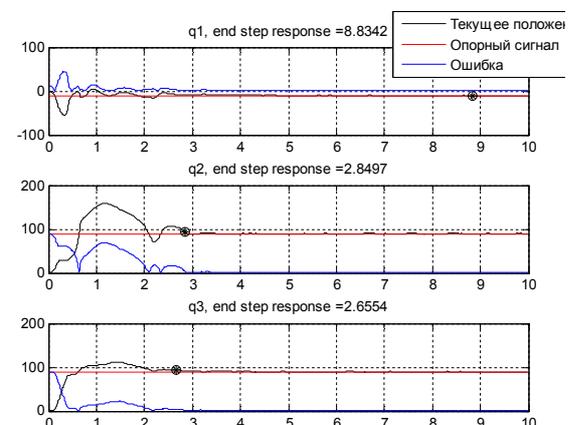


б) ИСУ на ГА

Рис. 17. Траектория движения манипулятора для эксперимента 10



а) ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях



б) ИСУ на ГА

Рис. 18. Изменение положений звеньев манипулятора для эксперимента 10

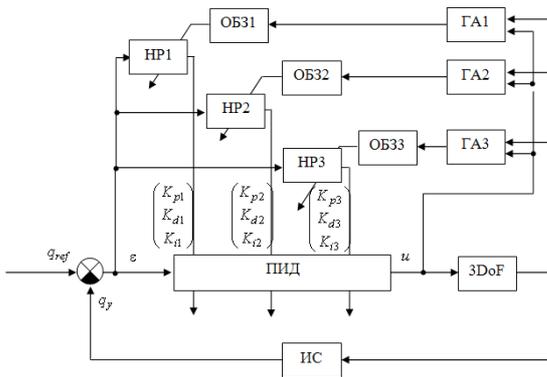
Для упрощения процесса создания БЗ необходимо уменьшения размерности пространства, что возможно путем разбиения управляющего блока на несколько частей.

В модели ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях это означает использование нескольких нечетких контроллеров.

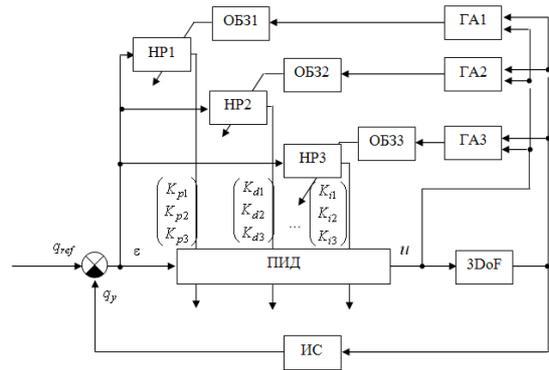
#### 4.4. Описание структур ИСУ на ОБЗ с тремя нечеткими контроллерами

Рассмотрим несколько структур ИСУ на ОБЗ с тремя нечеткими контроллерами.

В зависимости от типа управления, разделяются структуры по управлению отдельными звеньями (структуры ИСУ для трех звеньев, рис. 19, а) и структуры по управлению типом ошибки (структуры ИСУ для пропорциональных, интегральных и дифференциальных коэффициентов, рис. 19, б).



а) для трех звеньев



б) для пропорциональных, интегральных и дифференциальных коэффициентов

Рис. 19. Структуры ИСУ на ОБЗ

В зависимости от методики получения БЗ для нечетких контроллеров разделяются параллельные и каскадные структуры ИСУ на ОБЗ.

Параллельные структуры ИСУ на ОБЗ организуют независимое управление нечетких контроллеров. Получение БЗ для работы нечетких контроллеров происходит в несколько этапов:

- 1) получение параметров 1-3 (три выхода первого нечеткого контроллера): параметры 4-9 принимаются постоянными (= 1000);
- 2) получение параметров 4-6 (три выхода второго нечеткого контроллера): параметры 1-3, 7-9 принимаются постоянными;
- 3) получение параметров 7-9 (три выхода третьего нечеткого контроллера): параметры 1-6 принимаются постоянными.

Таким образом, получение БЗ для трех контроллеров происходит независимо друг от друга. Параллельные структуры просты в реализации и, что важно, необходимость изменения БЗ одного из нечетких контроллеров не потребует изменения БЗ других.

Каскадные структуры ИСУ на ОБЗ организуют последовательно-зависимое управление нечетких контроллеров. Получение БЗ для работы нечетких контроллеров происходит в несколько этапов:

- 1) получение параметров 1-3 (три выхода первого нечеткого контроллера): параметры 4-9 принимаются постоянными (= 1000);
- 2) получение параметров 4-6 (три выхода второго нечеткого контроллера): параметры 7-9 принимаются постоянными; параметры 1-3 генерируются первым нечетким контроллером с БЗ, подобранной на предыдущем этапе;

3) получение параметров 7-9 (три выхода третьего нечеткого контроллера): параметры 1-6 принимаются и генерируются первым и вторым нечеткими контроллерами с БЗ, подобранными на предыдущих этапах.

В каскадных структурах каждая последующая генерируемая БЗ учитывает ранее полученные БЗ. Однако необходимость изменения БЗ одного из нечетких контроллеров потребует изменения БЗ предыдущих. Кроме того, порядок определения параметров играет немаловажную роль.

Таким образом, учитывая тип управления и методику получения БЗ, сформированы 8 структур ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (табл. 11).

Табл. 11. Структуры ИСУ

| Методика получения БЗ  | Тип управления, порядок получения БЗ   | Условное обозначение   | Значения параметров в соответствии с этапами получения БЗ |                          |                          |
|------------------------|--|------------------------|---|--------------------------|--------------------------|
|                        |  |                        | Параметр 1-3  | Параметр 4-6             | Параметр 7-9             |
| Параллельная структура | ИСУ для трех звеньев   | $3FC$                  | $K_{P1}, K_{D1}, K_{I1}$                                  | $K_{P2}, K_{D2}, K_{I2}$ | $K_{P3}, K_{D3}, K_{I3}$ |
|                        | ИСУ для пропорциональных, интегральных и дифференциальных коэффициентов            | $3FC\_P\_I\_D$         | $K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}$                                  | $K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}$ | $K_{D1}, K_{D2}, K_{D3}$ |
| Каскадная структура    | для трех звеньев: прямая последовательная схема                                    | $3FC\_cascad\_1\_2\_3$ | $K_{P1}, K_{D1}, K_{I1}$                                  | $K_{P2}, K_{D2}, K_{I2}$ | $K_{P3}, K_{D3}, K_{I3}$ |
|                        | для трех звеньев: прямая крайевая схема  | $3FC\_cascad\_1\_3\_2$ | $K_{P1}, K_{D1}, K_{I1}$                                  | $K_{P3}, K_{D3}, K_{I3}$ | $K_{P2}, K_{D2}, K_{I2}$ |
|                        | для трех звеньев: обратная крайевая схема  | $3FC\_cascad\_3\_1\_2$ | $K_{P3}, K_{D3}, K_{I3}$                                  | $K_{P1}, K_{D1}, K_{I1}$ | $K_{P2}, K_{D2}, K_{I2}$ |
|                        | для трех звеньев: обратная последовательная схема                                  | $3FC\_cascad\_3\_2\_1$ | $K_{P3}, K_{D3}, K_{I3}$                                  | $K_{P2}, K_{D2}, K_{I2}$ | $K_{P1}, K_{D1}, K_{I1}$ |
|                        | для пропорциональных, интегральных и дифференциальных коэффициентов: $I-P-D$ схема | $3FC\_cascad\_I\_P\_D$ | $K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}$                                  | $K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}$ | $K_{D1}, K_{D2}, K_{D3}$ |
|                        | для пропорциональных, интегральных и дифференциальных коэффициентов: $P-I-D$ схема | $3FC\_cascad\_P\_I\_D$ | $K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}$                                  | $K_{I1}, K_{I2}, K_{I3}$ | $K_{D1}, K_{D2}, K_{D3}$ |

По результатам исследования качества управления рассмотренных структур ИСУ сделан вывод, что наилучшие решения получаются при использовании структур  $3FC$  и  $3FC\_cascad\_I\_P\_D$ .

Для дальнейшего исследования выберем параллельную структуру ИСУ для трех звеньев на ОБЗ как обеспечивающее устойчивое решение во всем тестовом пространстве и при этом простую для реализации и оптимизации.

#### **4.5. Моделирование динамического поведения манипулятора с тремя степенями свободы под управлением интеллектуальной системы параллельной структуры для трех звеньев на основе оптимизатора баз знаний на мягких вычислениях в среде Matlab/Simulink**

ИСУ параллельной структуры для трех звеньев на ОБЗ на мягких вычислениях, построенная в среде *Matlab/Simulink* приведена на рис. 20.

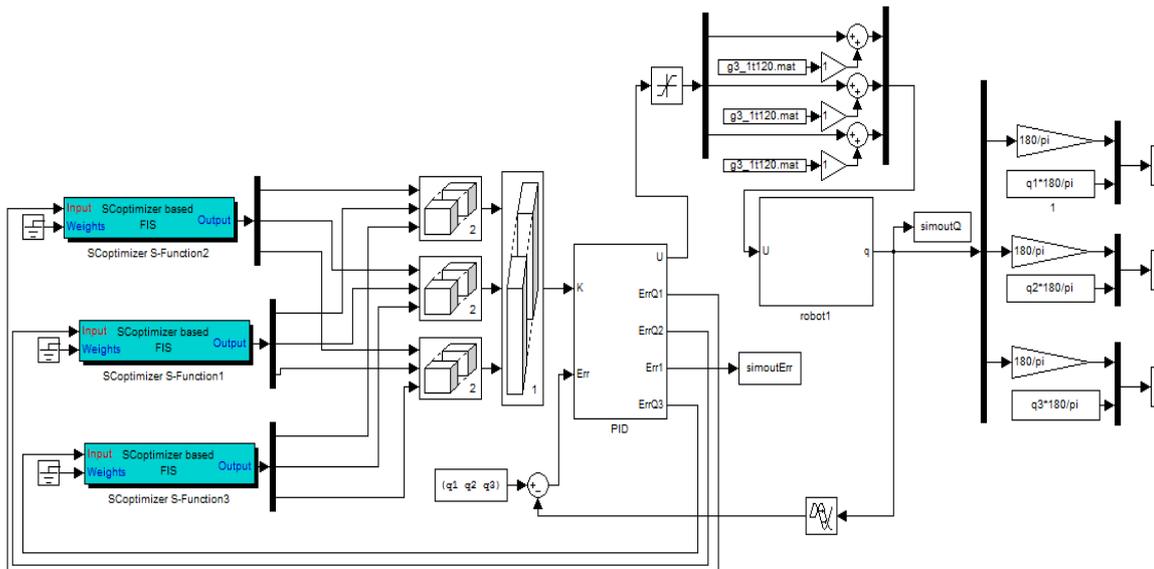


Рис. 20. ИСУ параллельной структуры для трех звеньев на ОБЗ на мягких вычислениях

Результаты тестирования разработанной ИСУ приведены в табл. 12-13.

Из табл. 12-13 видно, что в девяти случаях из десяти, задача позиционирования была решена.

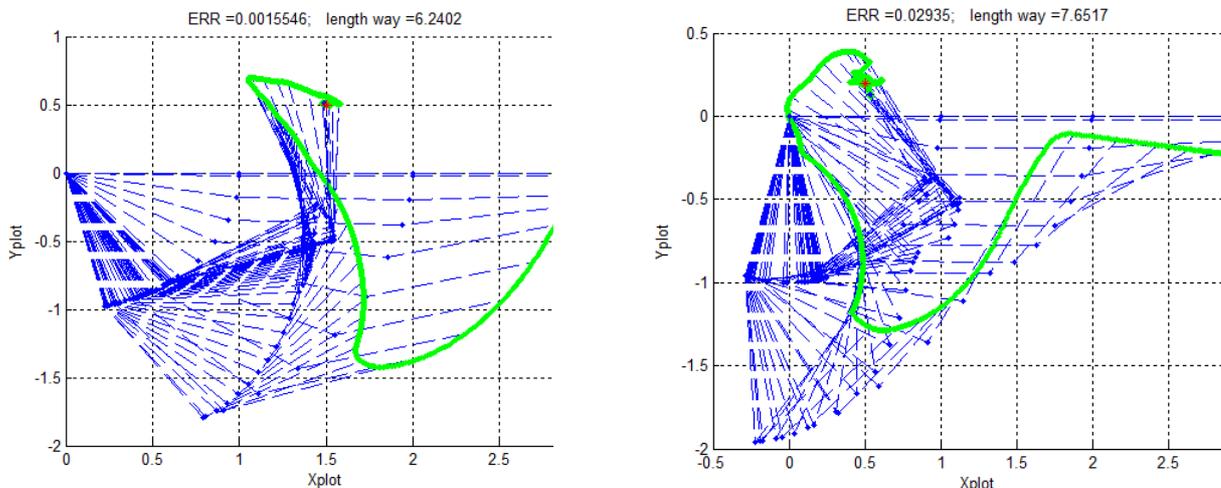
Табл. 12. Результаты моделирования ИСУ параллельной структуры для трех звеньев на ОБЗ на мягких вычислениях, на точках 1-5 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{GAaturation}$ |        | Точка 1 | Точка 2 | Точка 3 | Точка 4 | Точка 5 |
|--------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Координата X                   |        | 0.5000  | 1       | 1.7000  | 1       | 0.2000  |
| Координата Y                   |        | 0.2000  | 1.7000  | 1       | 0.2000  | 1       |
| Параметр 1                     | < 0.01 | 0.0031  | 0.0044  | 0.0086  | 0.0016  | 0.0028  |
| Параметр 2                     | q1     | 3.1899  | 2.8885  | 6.6177  | 2.5190  | 10.0000 |
|                                | q2     | 2.4164  | 2.4116  | 3.4472  | 2.5280  | 2.6157  |
|                                | q3     | 1.7627  | 5.0755  | 5.8655  | 2.1095  | 2.1960  |
| Параметр 3                     |        | 5.9054  | 4.4345  | 7.1946  | 6.2402  | 4.4638  |

Табл. 13. Результаты моделирования ИСУ параллельной структуры для трех звеньев на ОБЗ на мягких вычислениях, на точках 6-10 тестового пространства

| Тест матрицы $K_{GAaturation}$ |        | Точка 6 | Точка 7 | Точка 8 | Точка 9 | Точка 10 |
|--------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Координата X                   |        | 0.5000  | 1       | 1.7000  | 1       | 0.2000   |
| Координата Y                   |        | 0.2000  | 1.7000  | 1       | 0.2000  | 1        |
| Параметр 1                     | < 0.01 | 0.0294  | 0.0022  | 0.0032  | 0.0029  | 0.0063   |
| Параметр 2                     | q1     | 7.9555  | 10.0000 | 2.4955  | 3.7582  | 9.2705   |
|                                | q2     | 2.9584  | 2.4650  | 9.1341  | 2.6673  | 2.3164   |
|                                | q3     | 3.1153  | 2.3822  | 2.3488  | 3.5924  | 4.5269   |
| Параметр 3                     |        | 7.6517  | 4.3003  | 5.6835  | 6.7745  | 6.1735   |

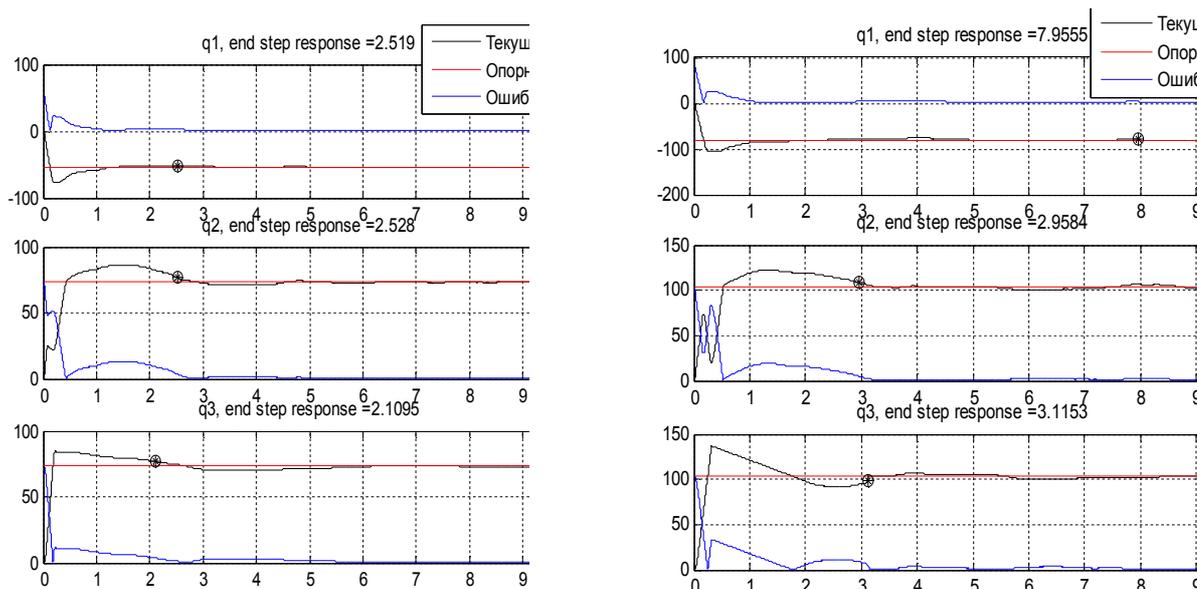
На рис. 21 представлена динамика ОУ для ИСУ параллельной структуры для трех звеньев на ОБЗ на мягких вычислениях для экспериментов с лучшим результатом (т. 4) и неудовлетворительным результатом (т. 6), см., соответственно, а и б. На рис. 22 представлены изменения положений звеньев манипулятора для экспериментов 4 и 6 (соответственно, а и б).



а) точка 4

б) точка 6

Рис. 21. Траектория движения манипулятора



а) точка 4

б) точка 6

Рис. 22. Изменение положений звеньев манипулятора

Таким образом, после снижения пространства поиска за счет разделения НР в ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, задача позиционирования была решена в девяти экспериментах из десяти.

Тем не менее, организация разделенного пространства поиска необходима для дальнейшего наращивания числа степеней свободы ОУ.

Следовательно, для обеспечения устойчивого управления манипулятором с тремя степенями свободы необходимо введение дополнительных механизмов, обеспечивающих взаимосвязь НР, функционирующих в интеллектуальной системе управления на ОБЗ на мягких вычислениях.

*Примечание.* Проблема взаимосвязи НР в параллельной структуре ИСУ для трех звеньев может быть решена при помощи технологии квантовых вычислений. В частности, реализация процесса самоорганизации робастных БЗ при таком подходе осуществляется за счет обобщения стратегий нечеткого логического вывода в виде КНВ. Синергетический принцип самоорганизации в ОБЗ на квантовых вычислениях выражается вариациями в выборе типа квантовой корреляции и соответствующих компонент для используемого типа корреляции из нормированных сигналов управления. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование КНВ, а также методы его использования для уменьшения рассогласования работы отдельных НР в составе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

## **Заключение**

В данной работе путем последовательного увеличения интеллектуальности системы управления достигнуто устойчивое управление таким ОУ, как манипуляционный робот.

Выделено и сконструировано три поколения систем управления:

1. традиционная САУ на ПИД-регуляторе;
2. ИСУ на ГА;
3. ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Каждый этап сопровождается описанием условий, при которых реализованная структура управления способна решать поставленные задачи управления, а также условий потери устойчивости управления. В результате исследований установлено:

1. традиционная САУ на ПИД-регуляторе не обеспечивает гарантированного управления даже в условиях отсутствия внешних и внутренних помех;
2. ИСУ на ГА способна функционировать в идеализированных условиях, однако теряет устойчивость при приближении условий функционирования к реальным;
3. ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях обеспечивает устойчивое управление в условиях возможных помех и ограничений.

Помимо разработки системы управления с уровнем интеллектуальности, достаточным для устойчивого управления (ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях), проведены исследования с целью уменьшения вычислительной мощности при разработке БЗ НР в ИСУ, в результате которых:

1. сделан вывод о необходимости разделения управления (использовании нескольких НР в одной ИСУ);
2. проведены исследования возможных вариантов разделенных структур, и сделан выбор структуры с разделенным управлением, оптимальной с точки зрения качества управления и простоты реализации.

Сформирован тезис о необходимости дальнейшего увеличения интеллектуальности системы управления, направленной на формирование знаний о взаимосвязи НР, функционирующих в интеллектуальной системе управления на ОБЗ на мягких вычислениях.

## **Список литературы**

1. Ramos M. C., Koivo Jr., Koivo J. Fuzzy logic-based optimization for redundant manipulators // Transactions on fuzzy systems. – 2002. – №4. – Pp. 498-509.
2. Литвинцева Л.В., Тятюшкина О.Ю., Григорьев П.Н., Ульянов С.В. Оптимизатор баз знаний на основе мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №2. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/16>. – 0421000111\0012.
3. 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: электрон. науч. журнал. – 2011. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/21>. – 0421100111\0021.

4. Ульянов С.В. Робастные интеллектуальные системы управления: системный и структурный анализ // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2008. – Т.3. – №2. – С. 15-31.
5. Ульянов С.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А., Миногин А.А., Григорьев П.Н. Информационная технология проектирования робастных баз знаний нечетких регуляторов. Ч.2: Структурный анализ ИСУ и оптимизатора баз знаний // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/17>. – 0421000111\0028.
6. Ульянов С.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А., Тятюшкина О.Ю., Резникова Н.В. Информационная технология проектирования робастных баз знаний нечетких регуляторов. Ч.1: Применение мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/17>. – 0421000111\0027.
7. Ульянов С.В., Добрынин В.Н., Нефёдов Н.Ю., Петров С.П., Полунин А.С., Решетников А.Г. Решетников А.Г. Генетические и квантовые алгоритмы. Ч.1: Инновационные модели в обучении // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/17>. – 0421000111\0030.
8. Ульянов С.В., Мишин А.А., Миногин А.А., Нефедов Н.Ю., Петров С.П., Полунин А.С., Решетников А.Г. Информационная технология проектирования робастных баз знаний нечетких регуляторов. Ч.3: Квантовый нечеткий вывод и квантовая информация // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/17>. – 0421000111\0029.