

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИЗБЫТОЧНЫМ РОБОТОМ МАНИПУЛЯТОРОМ С СЕМЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ. Ч.1: ТЕХНОЛОГИИ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Николаева Алена Валериановна¹, Ульянов Сергей Викторович²

¹ 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.

² 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.

Рассматривается проблема проектирования интеллектуальных систем управления с применением технологий мягких вычислений на примере робота манипулятора с семью степенями свободы. Проектирование робастных баз знаний производится с использованием специального интеллектуального инструментария – Оптимизатора Баз Знаний на мягких вычислениях. Эффективность спроектированных интеллектуальных систем управления с применением технологий мягких вычислений рассматривается в сравнении с системой управления с постоянными параметрами регулирующего звена. Для оценки работы систем управления введена система критериев качества, учитывающая методы оценки переходных процессов теории автоматического управления, адаптированная для рассматриваемого объекта управления – робота манипулятора с семью степенями свободы. Оценка работы систем управления производится по результатам моделирования в среде MatLab/Simulink.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, нечеткий регулятор, база знаний, технологии мягких вычислений.

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM DESIGN REDUNDANT MANIPULATOR WITH A SEVEN DEGREES OF FREEDOM. PT.1: SOFT COMPUTING TECHNOLOGY

Nikolaeva Alyona¹, Ulyanov Sergey²

¹ 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.

² 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 problem of control systems design with soft computing on example of 7 degrees of freedom manipulator is described. General methodology of robust knowledge base design using special intelligent toolkit (Knowledgebase Optimizator on soft computing technology) is developed. The efficiency of intelligent control systems by using soft computing technology is described in comparison with control system using constant coefficient gains of regulator. Set of performance criteria taking into account automatic control theory methods of transition estimations and tailored to concerned control object (7 degrees of freedom robot manipulator) is entered for estimate of control systems work. Estimate of control system work is performed by results of MatLab/Simulink simulation.

Keywords: intelligent control system, fuzzy controller, knowledge base, soft computing technology.

Введение

Исследуемые робототехнические системы – манипуляторы с избыточным числом степеней свободы. Избыточные манипуляторы имеют большее число степеней свободы, чем это необходимо для выполнения задачи, т.е. большее, чем размерность рабочего пространства.

Избыточность степеней свободы позволяет структуре манипулятора адаптироваться в условиях недостаточной информации о внешней (возможно изменяющейся) среде, в условиях изменения параметров самого манипулятора (например, связанных со старением или выходом из строя отдельных узлов). Кроме того, избыточные степени свободы позволяют задать поведение робота манипулятора, нацеленное на решение поставленной задачи с минимальным расходом полезного ресурса.

В настоящее время различные фирмы производят промышленных роботов (Таблица 1) для манипулирования, сварки, покраски, упаковки, шлифовки, полировки и т.д. с большим спектром применения и по точности, и по характеру выполняемых операций. Основными массовыми потребителями в области промышленной робототехники являются автомобильная и электронная промышленность.

Таблица 1. Модели роботов манипуляторов различных производителей

Производитель	Модели	Число степеней свободы
RobotWorx	Motoman Robots, Fanuc Robots (ArcMate 100i), Kuka Robots (KR 3)	6
Robotics research	K-1207i, K-707i, K-807i, K-1207i, K-1607iHP, K-1807iHP	7
Kraft Telerobotics	Predator (рис. 1), Grips, Raptor, Viper	6
Hydro-Lek Ltd	HLK-40500 R 7	7
Engineering Services	MRR-Scara	4
Engineering Services	MRR-Articulate	6
Engineering Services	MRR-Gantry	3, 4, 5, 6
Elumotion ltd	Elumotion Elu2-Arm (рис. 2)	7
ECA	ARM 5E	5
ECA	ARM 7H	7
Barrett Technology	WAM Arm	4,7

Задачи управления для избыточных роботов манипуляторов (позиционирования устройства захвата, построения траектории, решение обратной задачи динамики и др.), с увеличением сложности объектов управления, повышением требований к работоспособности в критических ситуациях и в условиях неблагоприятной внешней среды, все чаще решаются с применением технологий интеллектуальных вычислений: генетических алгоритмов [1, 2], нейронных и нечетких нейронных сетей [3, 4], с использованием аппарата нечеткой логики [5,6].

В данной работе рассматривается применение генетического алгоритма и технологий мягких вычислений [7] для построения робастной интеллектуальной системы управления для решения задачи точного позиционирования избыточного робота манипулятора с семью степенями свободы. Примеры промышленного применения роботов с 7-ю степенями свободы приведены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Робот-манипулятор Predator (Kraft Telerobotics) на борту подводного телеуправляемого аппарата Hercules

1. Плечевое соединение – удлинение
2. Плечевой привод – отведение
3. Плечевой привод – вращение
4. Локтевое соединение – удлинение
5. Привод запястья – вращение
6. Привод запястья – отведение
7. Соединение запястья – удлинение

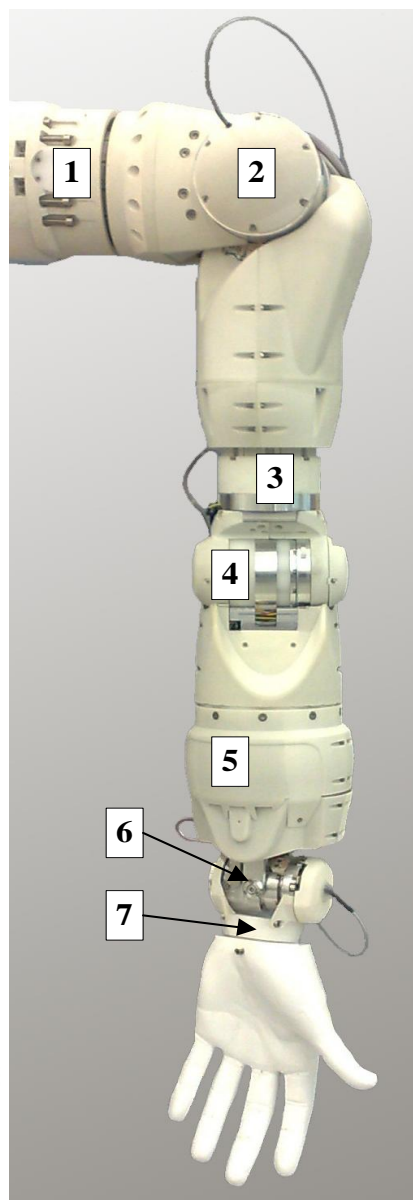
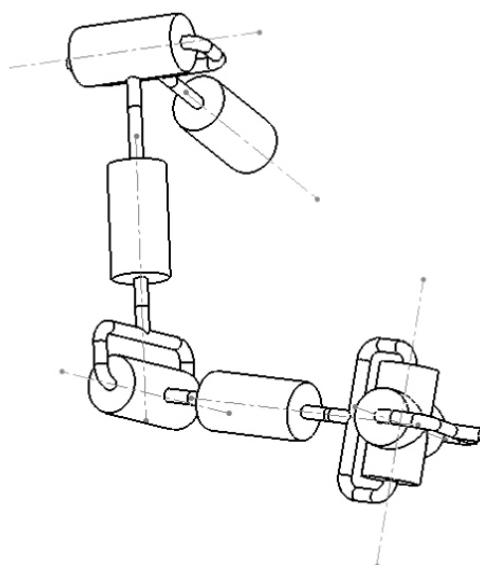


Рис. 2. Робот-манипулятор Elu2-Arm (Elumotion ltd) и его схематичное отображение

1. Описание объекта управления

1.1. Математическая модель

Для построения математической модели манипулятора с семью степенями свободы произвольной структуры разработан алгоритм на основе уравнения динамики вида [8]:

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

Рассмотрим последовательность определения основных матриц $D(q), C(q, \dot{q}), G(q)$ уравнения динамики для манипулятора с семью степенями свободы.

1. Определение направления вращения звеньев.

Для манипулятора с семью степенями свободы и семью звеньями выбираем оси вращения каждого звена. Так как одно звено обладает одной степенью свободы, то возможно вращение только вокруг одной из осей: продольной X – угол α_X , поперечной Y – угол α_Y и вертикальной Z – угол α_Z . Необходимо задать три вектора $\alpha_{Xrotation}, \alpha_{Yrotation}, \alpha_{Zrotation}$ размерностью 1×7 , i -ым элементом которых является одно из значений: 1) «0» – если вращение в данном направлении невозможно, 2) «1» если возможно вращение в соответствующем направлении:

$$\begin{cases} \alpha_{Xrotation} = [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ \alpha_{Yrotation} = [1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1] \\ \alpha_{Zrotation} = [0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0] \end{cases}$$

в соответствии с которыми записываются обобщенные вектор углов и вектор производных углов:

$$q = [q_{Z1} \quad \alpha_{Y2} \quad \alpha_{Z3} \quad \alpha_{Y4} \quad \alpha_{Z5} \quad \alpha_{Y6} \quad \alpha_{Y7}]$$

$$\dot{q} = [\dot{q}_{Z1} \quad \dot{\alpha}_{Y2} \quad \dot{\alpha}_{Z3} \quad \dot{\alpha}_{Y4} \quad \dot{\alpha}_{Z5} \quad \dot{\alpha}_{Y6} \quad \dot{\alpha}_{Y7}]$$

2. Формирование матриц гомогенных преобразований и матриц опорных координат.

Матрицы гомогенных преобразований $T_i, i = \overline{1,7}$ определяются как:

$$\begin{cases} T_1 = M |_{\alpha_{XYZrotation}} \\ T_2 = T_1 \times M |_{\alpha_{XYZrotation}} \\ \dots \\ T_i = T_{i-1} \times M |_{\alpha_{XYZrotation}} \end{cases}$$

где M – матрица преобразований в Эйлеровском представлении:

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_Y) \cos(\alpha_Z) & \sin(\alpha_Y) & -\cos(\alpha_Y) \sin(\alpha_Z) \\ \sin(\alpha_X) \sin(\alpha_Z) - \cos(\alpha_X) \cos(\alpha_Z) \sin(\alpha_Y) & \cos(\alpha_Y) \cos(\alpha_X) & \cos(\alpha_Z) \sin(\alpha_X) + \cos(\alpha_X) \sin(\alpha_Y) \sin(\alpha_Z) \\ \cos(\alpha_X) \sin(\alpha_Z) + \cos(\alpha_Z) \sin(\alpha_Y) \sin(\alpha_X) & -\cos(\alpha_Y) \sin(\alpha_X) & \cos(\alpha_X) \cos(\alpha_Z) - \sin(\alpha_Y) \sin(\alpha_X) \sin(\alpha_Z) \end{bmatrix}$$

Матрицы опорных координат:

$$\begin{cases} r_1 = T_1 L(1) \\ r_2 = r_1 + T_2 L(2) \\ \dots \\ r_i = r_{i-1} + T_i L(i) \end{cases}$$

где $L = [l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5 \quad l_6 \quad l_7]$ – вектор длин звеньев.

3. Определение матриц псевдоинверсий.

Элементы матрицы псевдоинверсий I_i определяются следующим образом:

$$I_i = \begin{bmatrix} (I_{xx} + I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & (I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & (I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})/2 \end{bmatrix},$$

где $I_{xx} = \int (y^2 + z^2) dm$, $I_{yy} = \int (x^2 + z^2) dm$, $I_{zz} = \int (x^2 + y^2) dm$, $I_{xy} = \int xy dm$, $I_{xz} = \int xz dm$, $I_{yz} = \int yz dm$, $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi \cos \theta$, $z = r \sin \varphi \sin \theta$, $m_i = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4 \ m_5 \ m_6 \ m_7]^T$ – вектор масс звеньев.

4. Определение матрицы инертностей.

Элементы матрицы $D(q)$ определяются следующим образом:

$$d_{jk}(q) = \sum_{i=\max(j,k)}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_i}{\partial q_j} I_i \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right].$$

5. Определение вектора кориолисовой / центробежной силы.

Вектор кориолисовой / центробежной силы $C(q, \dot{q})$ определяется как:

$$C(q, \dot{q}) = \dot{D}q - \frac{\partial K}{\partial q},$$

где K – общая кинетическая энергия:

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q}.$$

6. Определение вектора гравитационных сил.

Для определения вектора гравитационных сил $G(q)$ необходимо определить общую потенциальную энергию P :

$$P = - \sum_{i=1}^n m_i g^T T_i^i r_i,$$

с учетом которой определяется вектор гравитационных (потенциальных) сил $G(q)$:

$$G(q) = \frac{\partial P}{\partial q}.$$

1.2. MatLab/Simulink модель манипулятора с семью степенями свободы

В соответствии с математической моделью построена виртуальная *MatLab/Simulink* модель рассматриваемого объекта управления (ОУ) – манипулятора с семью степенями свободы.

На рис. 3 приведена модель ОУ, на котором выделены матрица инертностей $D(q)$, вектор центробежной силы $C(q, \dot{q})$ и вектор гравитации $G(q)$.

Указанные матрица и векторы, являются функциями текущих угловых положений звеньев (и их производных для вектора центробежной силы), а также длин и масс звеньев, т.е. $D = f(q, \dot{q}, m)$, $C = f(q, \dot{q}, m)$ и $G = f(q, m)$.

Например, состав блока вектора центробежной силы (рис. 3) приведен на рис. 4.

Блок вычислений нижнего (третьего) уровня («блок вычислений» на рис. 4) содержит порядка 2000-3000 операций сложения, вычитания, умножения, деления и возведения в степень и такого же порядка число тригонометрических операций.

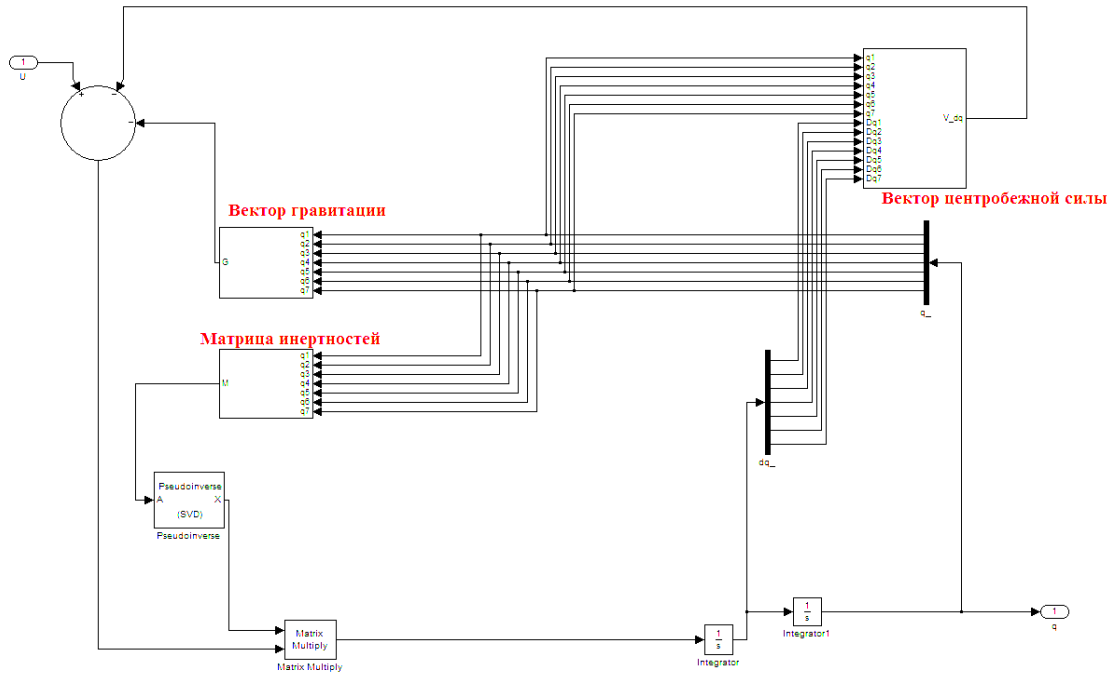


Рис. 3. Модель ОУ

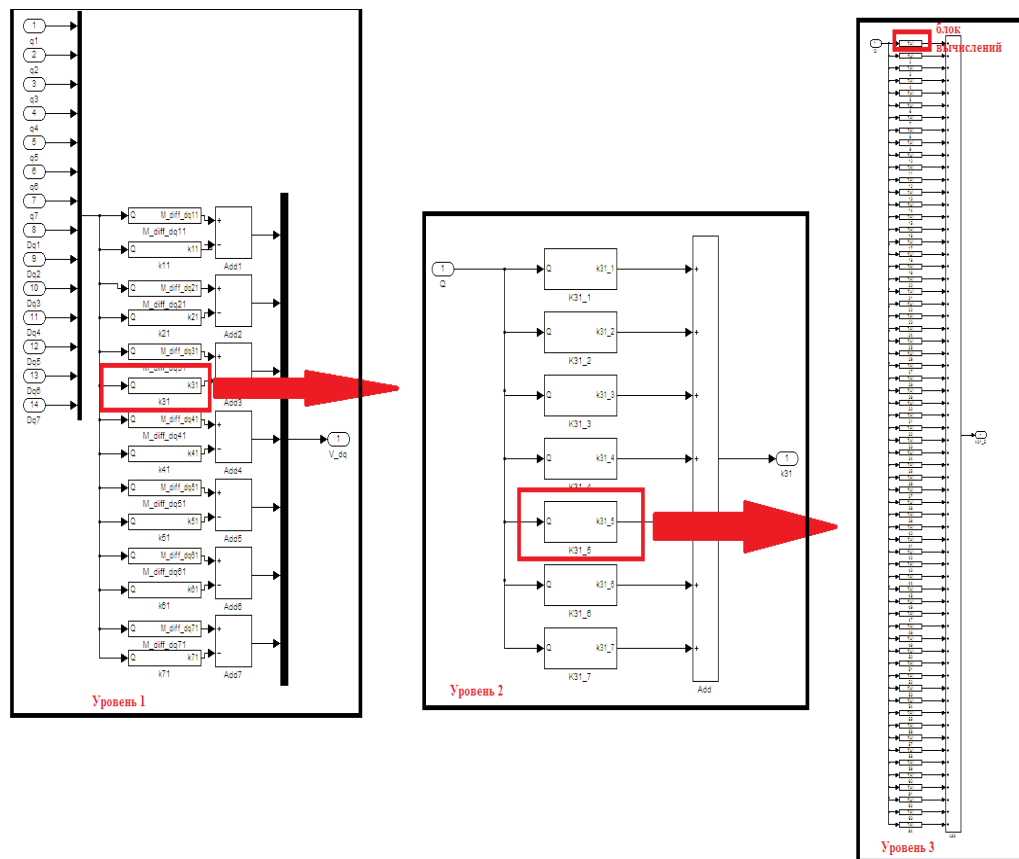


Рис. 4. Вектор центробежной силы

Ввиду вычислительной сложности модели, возникла необходимость ее упрощения:

1) были исключены из блоков вычислений переменные, неизменные на протяжении времени моделирования (длины и массы звеньев — векторы $L = [l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5 \ l_6 \ l_7]$ и $m_i = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4 \ m_5 \ m_6 \ m_7]$);

2) путем объединения однотипных блоков и использования стандартных функций *MatLab* библиотеки символьных вычислений проведено дальнейшее упрощение модели.

Однако даже после проведения упрощения время одной итерации составляло порядка 80 мин. В этой связи было принято решение об ассоциации модели с предполагаемым реальным ОУ и проведении соответствующей формализации модели объекта управления.

1.3. Формализованная модель объекта управления

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 [Ошибка! Залка не определена., 9].

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

В предположении, что звенья робота манипулятора могут вращаться в диапазоне (-70; +70) градусов и конфигурации степеней свободы соответствуют приведенной в Таблице 2, построена модель манипулятора с семью степенями свободы.

Таблица 2. Конфигурация звеньев манипулятора

Звено	Ось вращения
Звено 1	Вертикальная (α_{Z1})
Звено 2	Поперечная (α_{Y2})
Звено 3	Вертикальная (α_{Z3})
Звено 4	Поперечная (α_{Y4})
Звено 5	Вертикальная (α_{Z5})
Звено 6	Поперечная (α_{Y6})
Звено 7	Поперечная (α_{Y7})

Координаты соединений звеньев манипулятора определяются как:

$$\begin{cases} X_1 = l_1 \cos \varphi_1 \\ Y_1 = 0 \\ Z_1 = -l_1 \sin \varphi_1 \end{cases} ; \begin{cases} X_2 = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \\ Y_2 = l_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ Z_2 = -l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_1 \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} X_3 = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 - l_3 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 - \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \\ Y_3 = l_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ Z_3 = -l_3 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 + \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 - l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_1 \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} X_4 = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 - l_3 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 - \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 - \\ - l_4 \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 - \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 \\ Y_4 = l_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - l_4 \sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 - \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 - \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ Z_4 = -l_3 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 + \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 - l_4 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 + \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 - l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_1 \end{cases} ;$$

$$\begin{aligned}
 X_7 = & + l_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 - \\
 & - l_3 \left[\sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] - \\
 & - l_4 \left[\cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 - \\
 & - l_5 \left[\cos \varphi_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 + \\
 & + \sin \varphi_5 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 - \\
 & + l_6 \left[\sin \varphi_6 \sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \\
 & + \cos \varphi_5 \left\{ \cos \varphi_4 \left[\sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \right] - \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right\} + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 + \\
 & - \cos \varphi_6 \left\{ \cos \varphi_5 \left[\cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \right] + \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 \right\} + \\
 & + l_7 \left(\left[\sin \varphi_6 \sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \right) + \\
 & \cos \varphi_7 \left\{ - \cos \varphi_6 \left\{ \cos \varphi_5 \left\{ \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right\} + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 \right\} + \right. \\
 & \left. + \sin \varphi_5 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 \right\} + \\
 & + \sin \varphi_7 \left\{ \cos \varphi_6 \left[\sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \right\} + \\
 & + \sin \varphi_6 \left\{ \cos \varphi_5 \left\{ \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right\} + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 \right\} + \\
 & \left. + \sin \varphi_5 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 \right\} \right) ; \\
 Y_7 = & l_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - l_4 \left[\sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \\
 & - l_5 \left[\sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \\
 & - l_6 \left[\cos \varphi_6 \sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \\
 & + \sin \varphi_6 \left\{ \cos \varphi_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right\} \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 - \\
 & - l_7 \left(\left\{ \cos \varphi_6 \sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right\} \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \right) - \\
 & \cos \varphi_7 \left\{ + \sin \varphi_6 \left\{ \cos \varphi_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right\} \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 \right\} - \\
 & - \sin \varphi_7 \left\{ - \cos \varphi_6 \left[\sin \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_4 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \right\} - \\
 & - \cos \varphi_6 \left\{ \cos \varphi_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right\} \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 - \\
 & - \sin \varphi_5 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 - \\
 Z_7 = & - l_1 \sin \varphi_1 - l_3 \left[\cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 \right] - l_4 \left[\cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 \right] - \\
 & + l_5 \left[\sin \varphi_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 + \\
 & - \cos \varphi_5 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 - \\
 & + l_6 \left[\sin \varphi_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 + \\
 & - \cos \varphi_5 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 - \\
 & + l_7 \left[\sin \varphi_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_1 \sin \varphi_3 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_3 \right] \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_4 + \\
 & - \cos \varphi_5 \cos \varphi_3 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_3 -
 \end{aligned}$$

Создание модели реального ОУ позволило ускорить идентификацию модели ОУ, 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 семью степенями свободы в данной работе была проведена серия экспериментов для *MatLab/Simulink*-моделей.

Рассмотрим порядок и этапы проведения экспериментов.

2. Порядок проведения испытаний

Проведение серии экспериментов необходимо для выявления преимуществ/недостатков различных типов систем управления в применении к манипулятору с семью степенями свободы как в штатных, так и непредвиденных (нештатных) ситуациях управления.

Для проверки робастности моделей систем управления проводится серия экспериментов, состоящая из двух этапов:

- 1) работа в штатных ситуациях управления;
- 2) работа в непредвиденных (нештатных) ситуациях управления.

В качестве штатных ситуаций управления выступают тринадцать экспериментов в соответствии с группой точек рабочего пространства, определенных как тестовых (рис. 5). За начальное положение манипулятора принимается конфигурация: ($q_1 = 0$ град; $q_2 = 0$ град; $q_3 = 0$ град; $q_4 = 0$ град; $q_5 = 0$ град; $q_6 = 0$ град; $q_7 = 0$ град).

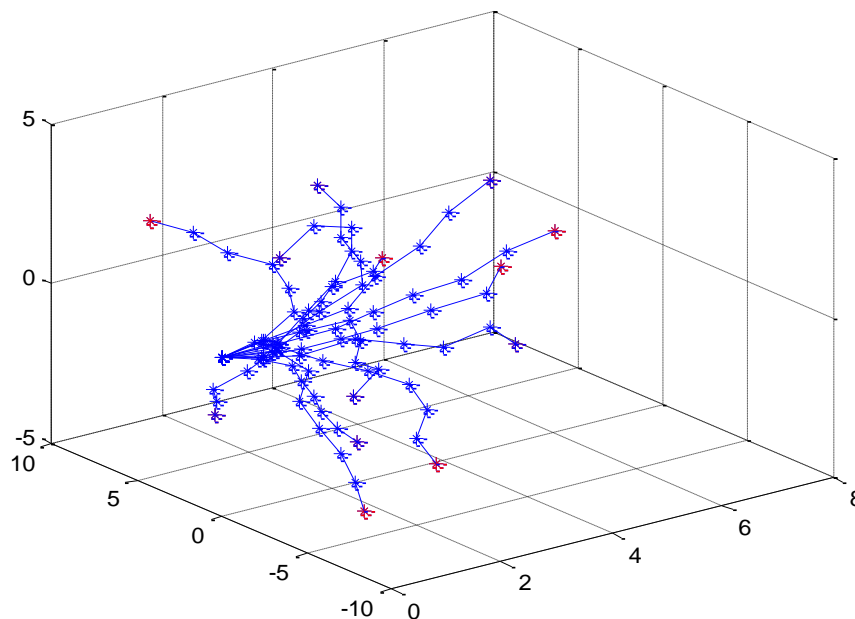


Рис. 5. Тестовое рабочее пространство

Нештатные ситуации разделяются на внешние и внутренние.

Внешние непредвиденные ситуации:

1) принудительное изменение положений звеньев (рис. 6):

- первого звена до значения – 30 градусов на 25-ой итерации и до значения 30 градусов на 75-ой итерации;
- второго звена до значения – 30 градусов на 50-ой итерации и до значения 30 градусов на 100-ой итерации;
- третьего звена до значения – 30 градусов на 50-ой итерации и до значения 30 градусов на 100-ой итерации;

- четвертого звена до значения – 30 градусов на 50-ой итерации и до значения 30 градусов на 100-ой итерации;
- пятого звена до значения – 30 градусов на 50-ой итерации и до значения 30 градусов на 100-ой итерации;
- шестого звена до значения – 30 градусов на 50-ой итерации и до значения 30 градусов на 100-ой итерации;
- седьмого звена до значения – 30 градусов на 50-ой итерации и до значения 30 градусов на 100-ой итерации;

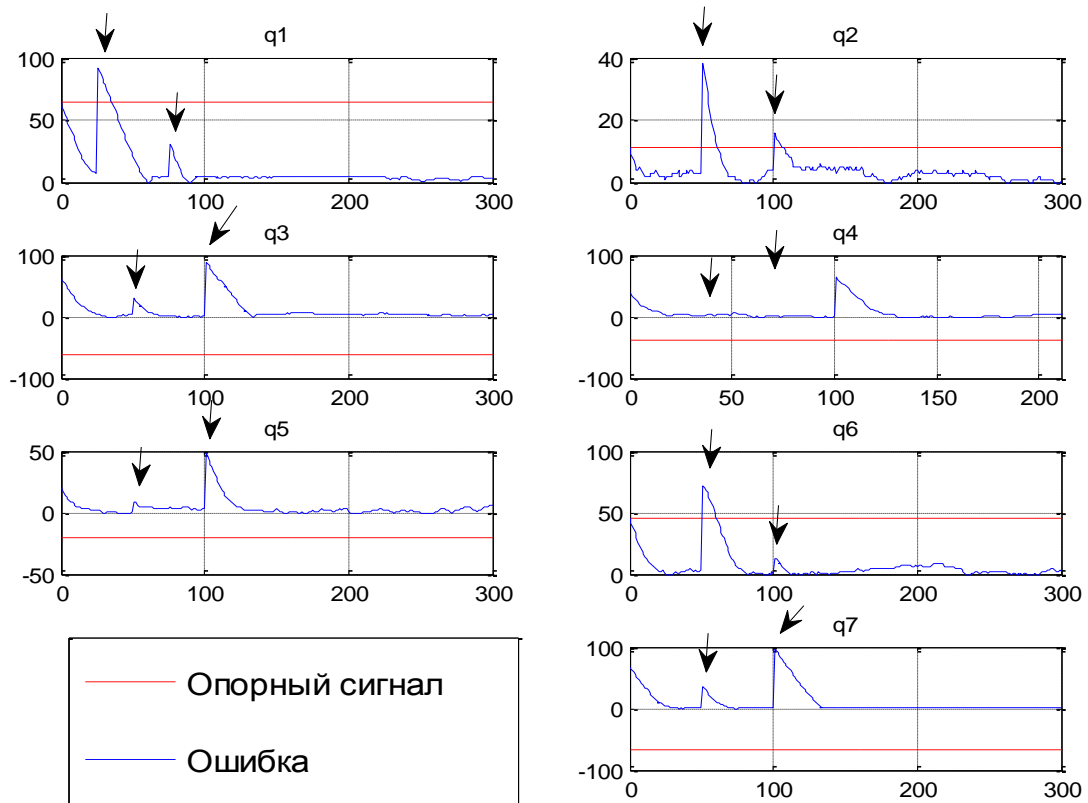


Рис. 6. Принудительное изменение положений звеньев

2) изменены начальные условия – $q_1 = -30$ град; $q_2 = -30$ град; $q_3 = -30$ град; $q_4 = -30$ град; $q_5 = -30$ град; $q_6 = -30$ град; $q_7 = -30$ град;

3) осуществляется одновременно и принудительное изменение положений звеньев и изменение начальных условий.

Каждая из трех внешних непредвиденных ситуаций тестируется на тринадцати точках тестового пространства; таким образом, проводится 39 экспериментов для внешних непредвиденных ситуаций управления.

Внутренние непредвиденные ситуации:

- 1) уменьшение ограничений управляющих воздействий;
- 2) увеличение ограничений управляющих воздействий;
- 3) внесение шумов в каналы управления (рис. 7);
- 4) внесение погрешностей в систему измерения ($\pm 1,5$ град).

Каждая из четырех внутренних непредвиденных ситуаций тестируется на тринадцати точках тестового пространства; таким образом, проводится 52 эксперимента для внутренних непредвиденных ситуаций управления.

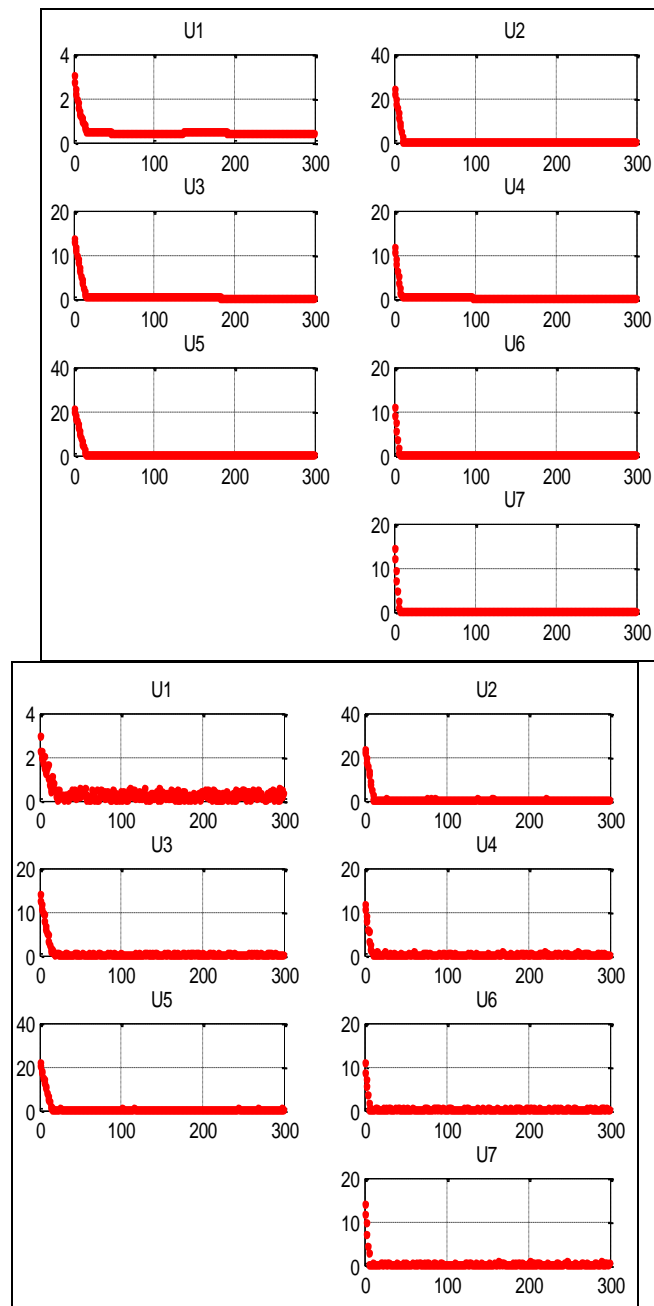


Рис. 7. Управляющие воздействия: исходные (слева); после внесения шумов (справа)

3. Определение критериев качества

Для оценки и сравнения результатов испытаний введена система критериев качества.

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

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

$$\begin{cases} PTS = 1, & \text{if } |q_{1ref} - q_1| + |q_{2ref} - q_2| + \dots + |q_{7ref} - q_7| \leq 2 \text{ deg} \\ PTS = 0, & \text{else} \end{cases}$$

где $q_{1ref}, q_{2ref}, \dots, q_{7ref}$ – желаемые положения звеньев, q_1, q_2, \dots, q_7 – текущие положения звеньев.

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

где N – число экспериментов.

2. Решение задачи позиционирования во внешних непредвиденных ситуациях управления PTS_{ACCS1} (*Position Task Solution in the above considered control situations*).

3. Решение задачи позиционирования во внутренних непредвиденных ситуациях управления PTS_{ACCS2} .

4. Быстродействие I_T .

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

$$I_T = I \left(|q_{1ref} - q_1| < 1 \text{ deg} \right) \cap \left(|q_{2ref} - q_2| < 1 \text{ deg} \right) \cap \dots \cap \left(|q_{7ref} - q_7| < 1 \text{ deg} \right);$$

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

5. Относительное значение перерегулирования σ .

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

$$\sigma = \max \left[\max \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \max \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \dots, \max \left| \frac{q_{7ref} - q_7}{q_{7ref}} \right| \right];$$

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

6. Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершении заданного числа итераций ϵ :

$$\left\{ \begin{array}{l} e = \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \text{ if } |q_{1ref} - q_1| > |q_{2ref} - q_2| \cap |q_{1ref} - q_1| > |q_{3ref} - q_3| \cap \dots \cap |q_{1ref} - q_1| > |q_{7ref} - q_7| \\ e = \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \text{ if } |q_{2ref} - q_2| > |q_{1ref} - q_1| \cap |q_{2ref} - q_2| > |q_{3ref} - q_3| \cap \dots \cap |q_{2ref} - q_2| > |q_{7ref} - q_7| \\ \dots \\ e = \left| \frac{q_{7ref} - q_7}{q_{7ref}} \right|, \text{ if } |q_{7ref} - q_7| > |q_{1ref} - q_1| \cap |q_{7ref} - q_7| > |q_{2ref} - q_2| \cap \dots \cap |q_{7ref} - q_7| > |q_{6ref} - q_6| \end{array} \right.;$$

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

7. Время одной итерации t .

Реальное время выполнения одной итерации i выбранного типа системы управления:

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

8. Сложность реализации управления P .

Оценка изменения коэффициентов управления:

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

9. Общая оценка управления FCB (*Full Control Behavior*)

$$FCB \equiv w_1 \cdot P_{PTS_{KCS}} \oplus w_2 \cdot P_{PTS_{ACCS1}} \oplus w_3 \cdot P_{PTS_{ACCS2}} \oplus w_4 \cdot P_{I_T} \oplus w_5 \cdot P_{\gamma} \oplus w_6 \cdot P_{\epsilon} \oplus w_7 \cdot P_{t} \oplus w_8 \cdot P,$$

где w_i – весовые коэффициенты, значение которого определено в Таблице 3.

Таблица 3. Значения весовых коэффициентов

Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления	PTS_{KCS}	w_1	0,1
Решение задачи позиционирования во внешних непредвиденных ситуациях управления	PTS_{ACCS1}	w_2	0,2
Решение задачи позиционирования во внутренних непредвиденных ситуациях управления	PTS_{ACCS2}	w_3	0,2
Быстродействие	I_T	w_4	0,2
Относительное значение перерегулирования	γ	w_5	0,05
Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершении заданного числа итераций	ϵ	w_6	0,1
Время одной итерации	t	w_7	0,1
Сложность реализации управления	P	w_8	0,05

4. Системы управления с постоянными параметрами регулирующего звена

Традиционная система управления представляет собой совокупность одного или нескольких ОУ и управляющей системы. В общем случае, система управления состоит из звена регулирования, ОУ, а также ИС в цепи обратной связи. Для обеспечения заданных динамических показателей в системах управления находят применение различные типы регуляторов.

Наиболее широко распространен пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. В [10] рассматривается применение системы управления на основе ПИД-регулятора в применении к роботу манипулятору с тремя степенями свободы.

Задача управления в общем случае сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,7}$, при которых обеспечивается желаемый характер движения манипулятора с семью степенями свободы.

Рассматриваются два типа систем управления с постоянными коэффициентами.

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

В то же время для определения параметров управления возможно применение генетического алгоритма (ГА), для чего 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.

Сравнение работы систем управления манипулятором с семью степенями свободы на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА в соответствии с введенной системой критериев качества приведены в Таблице 4, а также на рис. 8.

Таблица 4. Сравнение работы систем управления с постоянными коэффициентами

Критерий качества	Качество управления	Система управления на основе ПИД-регулятора	Система управления с использованием ГА
1	Решение в штатных ситуациях управления	0,000	0,615
2	Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	0,000	0,256
3	Решение в непредвиденных ситуациях: изменения параметров ОУ	0,058	0,308
4	Быстродействие	0,000	0,008
5	Относительное значение перерегулирования	0,892	0,956
6	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,379	0,657
7	Время одной итерации	0,998	0,998
8	Сложность реализации управления	1,000	1,000
9	Общее управление	0,244	0,439

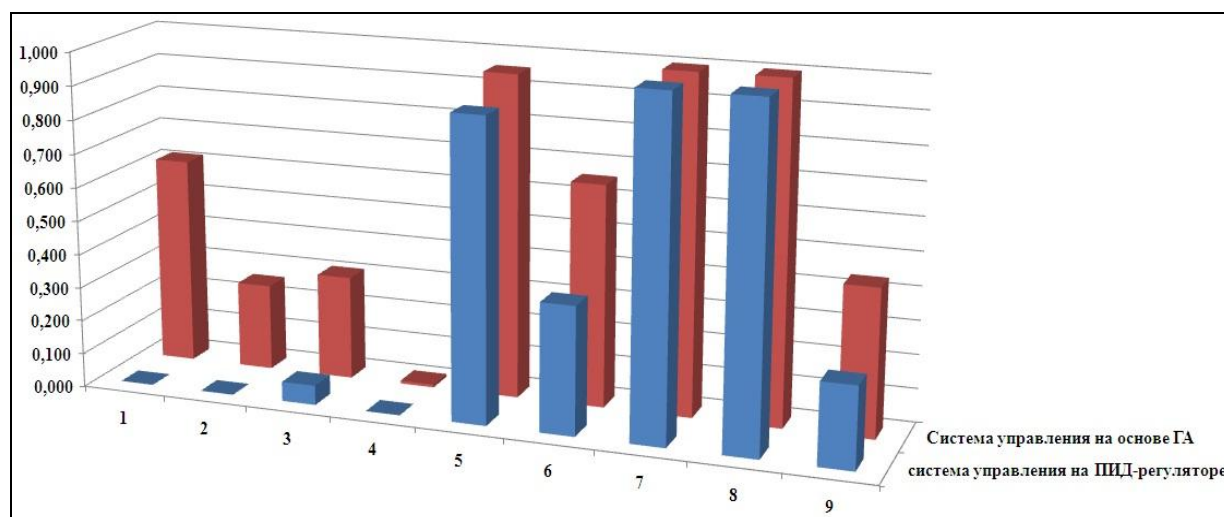


Рис. 8. Сравнение результатов работы систем управления на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА при тестировании MatLab / Simulink моделей

Из результатов сравнения двух типов систем управления (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА) видно, что:

- при использовании системы управления на ПИД-регуляторе задача позиционирования не решена ни в одном эксперименте в штатных ситуациях и внешних непредвиденных ситуациях управления, незначительные положительные результаты (3 эксперимента из 52) получены для внутренних непредвиденных ситуаций управления;

- некоторое улучшение достигается при использовании системы управления на основе ГА: решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления достигается в большинстве экспериментов, однако в непредвиденных ситуациях управления (как внешних, так и внутренних) – решение достигнуто менее, чем в трети экспериментов;
- система управления на основе ПИД-регулятора, и с использованием ГА имеет низкое быстродействие;
- при использовании системы управления на ГА значительно улучшаются показатели относительных значений перерегулирования и ошибок позиционирования по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе;
- при использовании системы управления на ГА общая оценка управления по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе улучшается в 1,8 раз.

На рис. 9 продемонстрирована работа манипулятора при использовании систем управления на ПИД-регуляторе и с использованием ГА в условиях второй внешней непредвиденной ситуации управления (изменено начальное положение и в разные моменты времени звенья принудительно перемещаются). В выбранном для демонстрации эксперименте система управления на ГА решает задачу управления, в отличие от системы управления на ПИД-регуляторе.

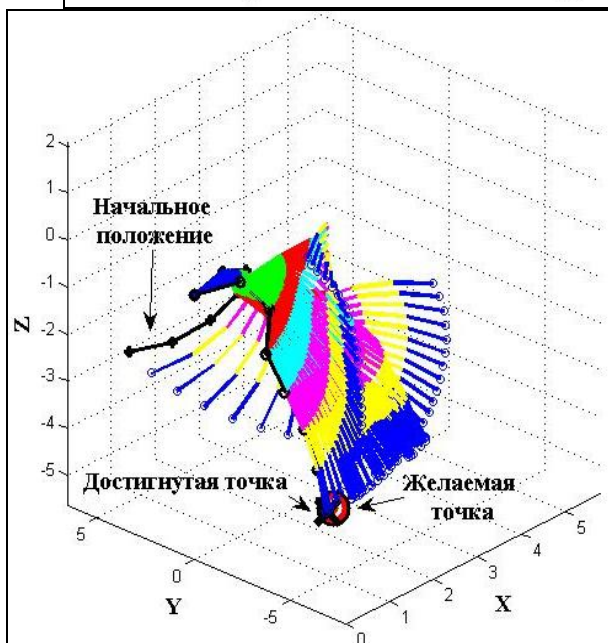
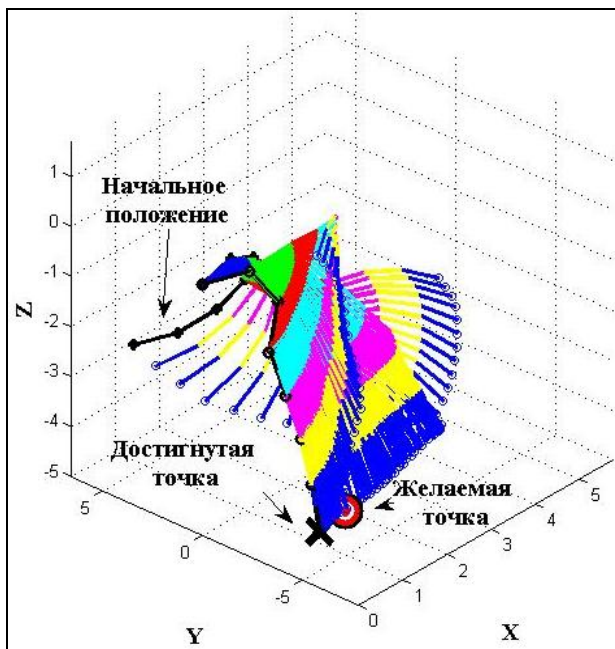


Рис. 9. Движение робота манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации: под управлением ПИД-регулятора (слева); системы управления с использованием ГА (справа)

Несмотря на то, что система управления на ГА значительно улучшает оценки критериев качества по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе, в целом обеспечиваемое системой управления на ГА качество управления довольно низкое.

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

Поэтому в качестве следующей ступени развития систем управления рассматриваем структуру с динамической адаптацией коэффициентов ПИД-регулятора, реализованной на основе технологий мягких вычислений.

5. Применение технологий мягких вычислений

Основным элементом рассматриваемых интеллектуальных систем управления (ИСУ) является нечеткий регулятор (НР), управляющий коэффициентами усиления 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 [12].

Последовательность создания БЗ для ИСУ на ОБЗ на основе мягких вычислений манипулятором с тремя степенями свободы рассматривается в [13]. Кроме того, в [Ошибка! Закладка не определена.] была приведена зависимость максимального числа нечетких правил от количества функций принадлежности для входных переменных и зависимость максимального числа нечетких правил от числа степеней свободы манипулятора. Было показано, что каждая степень свободы увеличивает максимальное число нечетких правил более чем на полтора порядка, что приводит к сложности создания БЗ, повышению требований к вычислительным ресурсам процессора, на котором создаются БЗ и объему памяти системы, в которой размещается БЗ.

В связи со сложностью рассматриваемого объекта управления – робота манипулятора с семью степенями свободы – реализация единой БЗ невозможно, поэтому изначально организуем разделенное управление звеньями (один НР управляет одним звеном).

Тестирование полученных БЗ1 – БЗ7 соответственно НР1 – НР7 проводится в составе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Результаты испытаний ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в соответствии с введенной системой критериев качества в сравнении с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА), приведены в Таблице 5 и на рис. 10.

Таблица 5. Сравнение результатов работы систем управления с постоянными коэффициентами и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

Критерий качества	Качество управления	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях	Система управления с использованием ГА	Система управления на основе ПИД-регулятора
1	Решение в штатных ситуациях управления	0,923	0,615	0,000
2	Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	0,744	0,256	0,000
3	Решение в непредвиденных	0,923	0,308	0,058

	ситуациях: изменения параметров ОУ			
4	Быстродействие	0,092	0,008	0,000
5	Относительное значение перерегулирования	0,969	0,956	0,892
6	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,911	0,657	0,379
7	Время одной итерации	0,973	0,998	0,998
8	Сложность реализации управления	0,946	1,000	1,000
9	Общее управление	0,728	0,439	0,244

Из результатов сравнения систем управления (ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, системы управления на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА) видно, что при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях:

- повысился процент решения задачи позиционирования в штатных ситуациях (решение положительное в 12 из 13 экспериментах) по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА);
- значительно повысился процент решения задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами: для внешних непредвиденных ситуаций в 2,9 раз и в 3 раза для внутренних непредвиденных ситуаций (в сравнении с системой управления на основе ГА);
- значительно увеличилось быстродействие: более чем в 10 раз по сравнению с системой управления на основе ГА; однако по-прежнему, быстродействие достаточно низкое;
- улучшились показатели относительного значения перерегулирования и относительной ошибки позиционирования звеньев по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами, но несколько ухудшились оценки времени одной итерации и сложности реализации управления;
- общая оценка управления улучшена в 1,7 раз по сравнению с системой управления с использованием ГА и в 3 раза по сравнению с системой управления на основе ПИД-регулятора.

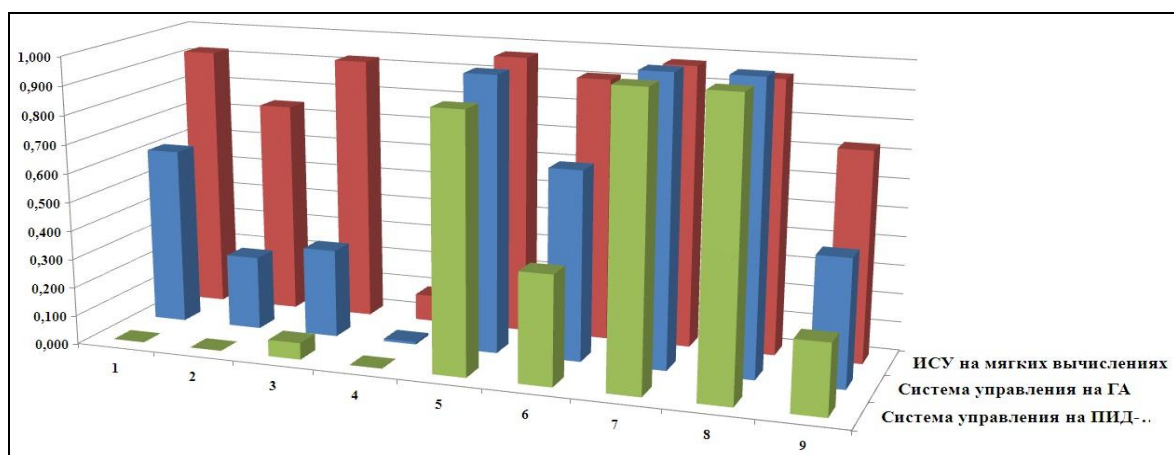


Рис. 10. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и систем управления с постоянными коэффициентами при тестировании MatLab/Simulink моделей

На рис. 11 продемонстрирована работа манипулятора при использовании системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в условиях первой внешней непредвиденной ситуации управления (в разные моменты времени звенья принудительно перемещаются).

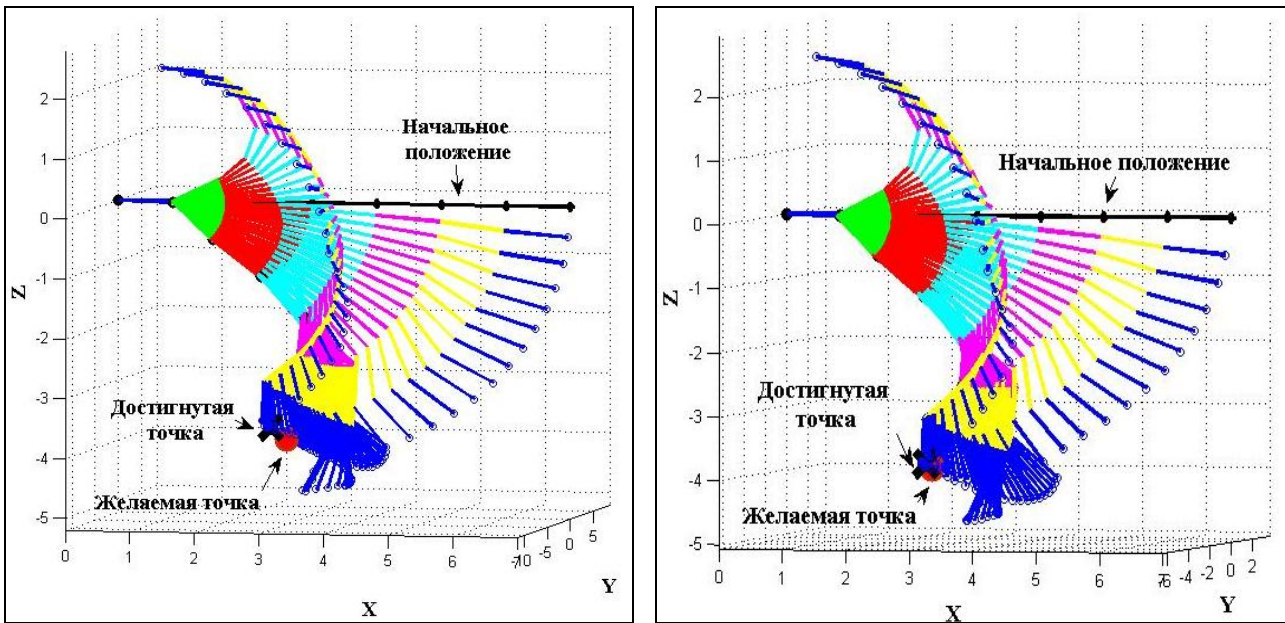


Рис. 11. Движение робота манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации: результат работы системы управления на основе ГА (слева); ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (справа)

На рис. 12 продемонстрирована работа манипулятора при использовании системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в условиях четвертой внутренней непредвиденной ситуации управления (внесение погрешностей в систему измерения).

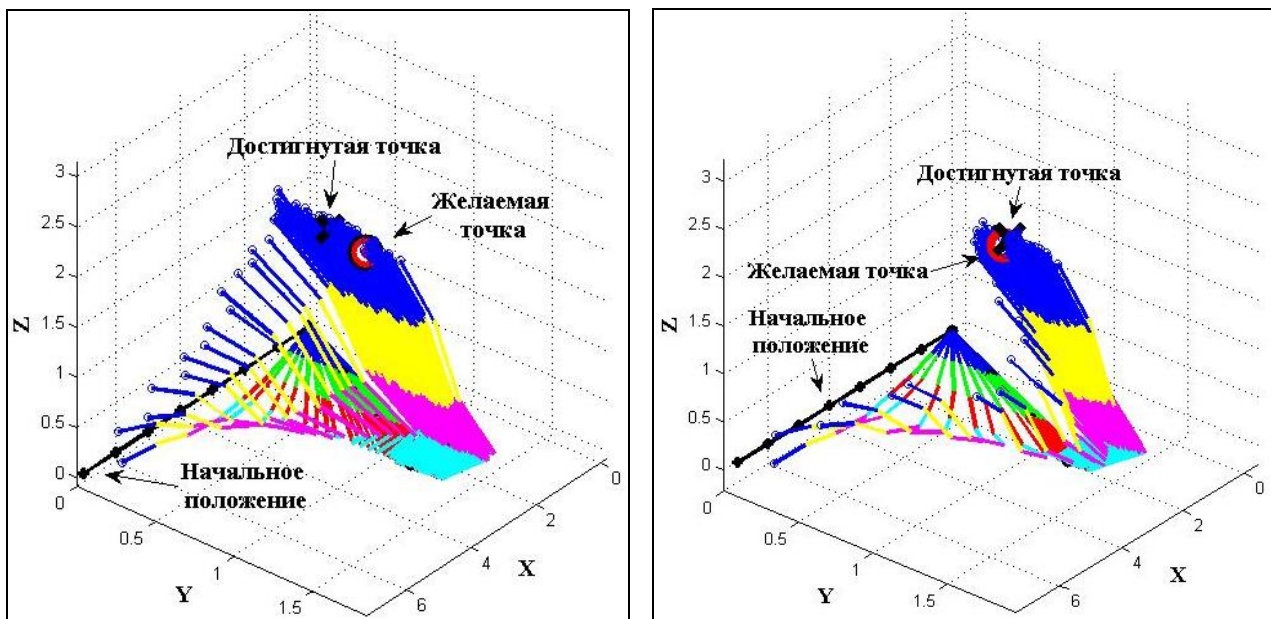


Рис. 12. Движение робота манипулятора в условиях внутренней непредвиденной ситуации: результат работы системы управления на основе ГА (слева); ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (справа)

На рис. 13 для рассматриваемой ситуации управления приведено сравнение фазовых портретов при использовании системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

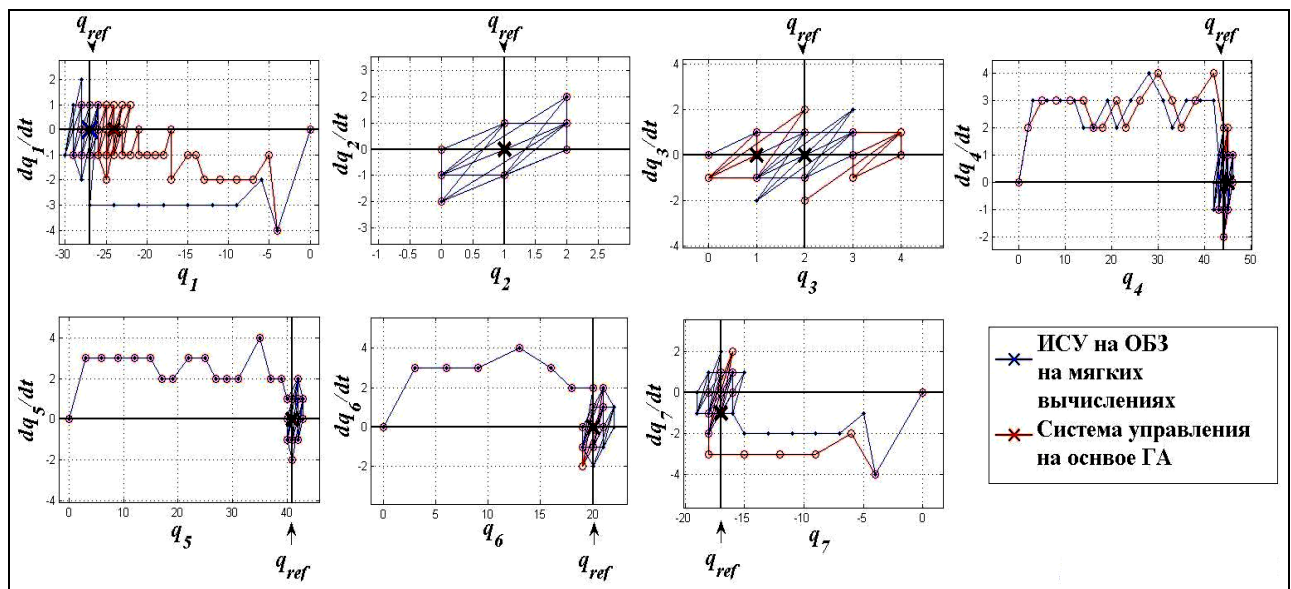


Рис. 13. Изменение положений звеньев робота манипулятора в условиях внутренней непредвиденной ситуации: сравнение работы системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

ИСУ роботом манипулятором с семью степенями свободы на ОБЗ на мягких вычислениях значительно улучшает качество управления по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА), однако показатель быстродействия остается на достаточно низком уровне.

Ввиду того, что ОУ сложен, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях была организована с разделением управления: каждому звену манипулятора соответствует один независимый НР. Однако декомпозиция управления ведет к рассогласованию работы и некоторому снижению качества управления.

Организовать координационное управление без значительного увеличения сложности системы возможно путем введения дополнительных обобщающих звеньев, реализация которых возможна с использованием технологий квантовых вычислений.

Заключение

В результате сравнения работы рассмотренных типов систем управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА) и ИСУ на основе мягких вычислений, можно сделать следующие выводы:

1. В штатных ситуациях управления задача точного позиционирования:
 - не решена системой управления на основе ПИД-регулятора;
 - решена в 8 из 13 экспериментах системой управления на основе ГА;
 - решена в 12 из 13 экспериментах ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.
2. Во внешних непредвиденных ситуациях управления задача точного позиционирования:
 - не решена системой управления на основе ПИД-регулятора;
 - решена в 10 из 39 экспериментах системой управления на основе ГА;
 - решена в 29 из 39 экспериментах ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.
3. Во внутренних непредвиденных ситуациях управления задача точного позиционирования:
 - решена в 3 из 52 экспериментах системой управления на основе ПИД-регулятора;
 - решена в 16 из 52 экспериментах системой управления на основе ГА;
 - решена в 48 из 52 экспериментах ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

4. Наилучшие показатели относительного значения перерегулирования и относительной ошибки позиционирования звеньев достигаются при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.
5. Быстродействие при работе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях более чем в 10 раз выше по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА); однако в целом, быстродействие достаточно низкое.
6. Общая оценка управления для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в 1,7 раз выше по сравнению с системой управления с использованием ГА и в 3 раза по сравнению с системой управления на основе ПИД-регулятора.

Список литературы

1. Lavoie M.-H., Boudreau R. Obstacle Avoidance for Redundant Manipulators Using a Genetic Algorithm // Southeastcon'91 Conference, Williamsburg. – 1991. – 7-10 Apr.
2. Secara C., Vladareanu L. Iterative genetic algorithm based strategy for obstacles avoidance of a redundant manipulator // Wseas Transaction on Mathematics. – 2010. – Vol. 9. – № 3.
3. Yu W., Rosen J. Neural PID Control of Robot Manipulators With Application to an Upper Limb Exoskeleton // Cybernetics, IEEE Transactions. – 2013. – Vol. 43. – № 2.
4. Jasour A.M., Farrokhi M. Path Tracking and Obstacle Avoidance for Redundant Robotic Arms Using Fuzzy NMPC // American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront. – St. Louis, MO, USA. – 2009. – June 10-12.
5. Meza J.L., Santibáñez V., Soto R., Llama M.A. Fuzzy Self-Tuning PID Semiglobal Regulator for Robot Manipulators // Industrial Electronics, IEEE Transactions. – 2012. – Vol. 59. № 6.
6. Salas F. G., Santibanez V., Llama M.A. Variable Gains PD Tracking Control of Robot Manipulators: Stability Analysis and Simulations // World Automation Congress (WAC). – 2012. – 24-28 June.
7. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. – М.: PronetLabs, 2011.
8. Lewis F.L., Munro N. Robot Manipulator Control. – N.Y., 2004.
9. Черноусько Ф. Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы: Динамика, управление, оптимизация. – Наука, 1989.
10. Ульянов С.В. Оптимизатор БЗ на мягких вычислениях (Интеллектуальные регуляторы и робототехника): учебно-методическое пособие / С.В. Ульянов, Л.В. Литвинцева, О.Ю. Тятюшкина, А.В. Николаева, А.Г. Решетников, Т.А. Керимов. – Дубна: Междунар. Ун-т природы, о-ва и человека «Дубна», 2013. – С. 157.
11. Михайлов В.С. Теория управления. – К.: Выш. школа, 1988.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011619257. Оптимизатор робастных баз знаний для проектирования интеллектуальных систем управления на мягких вычислениях: заявка №2011617532 от 11.10.2011 РФ / С. В. Ульянов, Л. В. Литвинцева, А. А. Мишин, С. В. Сорокин (РФ) – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 1.12.2011 г. (РФ).
13. Николаева А. В., Ульянов С. В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом манипулятором. Ч. 2: Декомпозиция управления и физический эксперимент на основе технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2013. – № 1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/27>.