

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ С СЕМЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ: РОБАСТНОСТЬ В НЕПРЕДВИДЕННЫХ СИТУАЦИЯХ УПРАВЛЕНИЯ

Николаева Алена Валериановна¹, Ульянов Сергей Викторович²

¹Аспирант;

ГБОУ ВО «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.

²Доктор физико-математических наук, профессор;

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

В статье рассматриваются проблемы проектирования интеллектуальных систем управления с применением технологий мягких и квантовых вычислений на примере сложного объекта управления – робота манипулятора с семью степенями свободы. Приводится общая методология проектирования робастных нечетких баз знаний с использованием специального интеллектуального инструментария – Оптимизатора Баз Знаний на мягких вычислениях. Предложена стратегия самоорганизации баз знаний нечетких однотипных регуляторов с применением технологий квантовых вычислений. Эффективность спроектированных интеллектуальных систем управления с применением технологий мягких и квантовых вычислений рассматривается в сравнении с системами управления с постоянными параметрами регулирующего звена. Для оценки работы систем управления вводится система критериев качества, адаптированная для рассматриваемого объекта управления — робота манипулятора с семью степенями свободы в зависимости от требуемых точностных характеристик работы. Особое внимание уделено поведению робота манипулятора под управлением предлагаемых интеллектуальных систем управления в критических непредвиденных ситуациях, связанных с возмущениями во внутренних узлах сложного объекта управления.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, нечеткий регулятор, квантовый нечеткий вывод, технологии мягких и квантовых вычислений, непредвиденная ситуация.

CONTROL SYSTEM OF A 7 DEGREES OF FREEDOM ROBOT-MANIPULATOR: ROBUST IN UNEXPECTED CONTROL SITUATIONS

Nikolaeva Alyona¹, Ulyanov Sergey²

¹PhD student;

International university of the nature, society and man «Dubna»,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: nikolaevaav@lenta.ru.

²Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

International university of the nature, society and man «Dubna»,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

The problems of designing control systems with soft and quantum computing on example of complex control object (7 degrees of freedom manipulator) are described. General methodology of robust fuzzy knowledge base design using special intelligent toolkit (Knowledgebase Optimizator on soft computing technology) is investigated. The self-organization knowledge base strategy of one type of fuzzy controllers using

quantum soft computing technologies is considered. The efficiency of constructed intelligent control systems by use soft and quantum computing technologies is described in comparison with control system using constant settings of regulator. Set of performance criteria tailored to concerned control object (7 degrees of freedom robot manipulator) is entered for estimate of control systems work against accuracy behavior. The robot manipulator behavior under proposed intelligent control systems in unexpected control situations connected with internal noise in complex control object is considered with special attention.

Keywords: intelligent control system, fuzzy controller, quantum fuzzy inference, soft and quantum computing technologies, unexpected situation.

Введение

В данной работе в качестве объекта управления (ОУ) выступают 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 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.

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

В данной работе рассматривается применение технологий мягких и квантовых вычислений [7] для построения робастной интеллектуальной системы управления для решения задачи позиционирования избыточного робота-манипулятора с семью степенями свободы.

1. Построение системы управления манипулятором с семью степенями свободы с постоянными параметрами регулятора

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 измерительной системы (ИС) в цепи обратной связи. Для обеспечения заданных динамических показателей в системах управления находят применение различные типы регуляторов. Наиболее широко распространены пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы. Интегральная составляющая регулятора позволяет устранить в системе статическую ошибку, а дифференциальная составляющая – улучшить динамические показатели, форсируя переходный процесс.

В общем случае необходимо найти коэффициенты ПИД-регулятора K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii} , $i = \overline{1,7}$, при которых обеспечивается желаемый характер движения звеньев робота манипулятора.

Для определения коэффициентов K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii} , $i = \overline{1,7}$ аналитическими методами, необходимы первоначальные знания о системе управления и характере поведения ОУ [8, 9], т.е. корректное определение коэффициентов ПИД-регулятора возможно с привлечением эксперта.

Включение в систему управления элементов интеллектуальных вычислений может позволить описать требования к системе управления в терминах качественных критериев.

Так, определение параметров управления возможно с использованием ГА, для чего необходимо лишь корректно определить функцию пригодности (*fitness*-функцию) ГА, например следующим образом: $fitness = (PTS = 1) \cap (I_T \rightarrow 0)$, где PTS (*Position Task Solution*) – решение задачи позиционирования манипулятором с тремя степенями свободы, а I_T – быстродействие системы управления.

Исходя из заданной функции пригодности, выбор коэффициентов $K_{\Pi i}, K_{\Delta i}, K_{\Pi i}, i = \overline{1,7}$ определяется исходя из обеспечения гарантированного решения задачи позиционирования с максимальным быстродействием.

Интеллектуальная надстройка в виде звена ГА без разрушения нижнего исполнительного уровня позволяет оперироваться качественными критериями системы.

Структурная схема системы управления на ГА приведена на рис. 1, где Q_{ref} – воздействующий (задающий) сигнал, Q' – измеренная регулируемая величина, $s(t)$ – ограничение управляющего воздействия, $K = [K_{\Pi 1} K_{\Delta 1} K_{\Pi 1}; \dots; K_{\Pi 7} K_{\Delta 7} K_{\Pi 7}]$ – матрица коэффициентов ПИД-регулятора, $d(t)$ – задержка в ИС, $m(t)$ – внешнее воздействие среды.

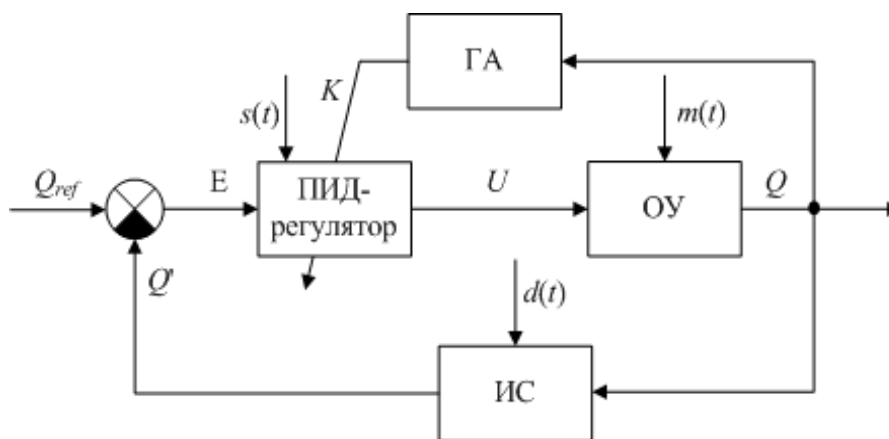


Рис. 1. Структурная схема системы управления на ГА

Выбор коэффициентов ПИД-регулятора в системе управления на основе ГА осуществляется один раз для одного или ряда случаев (штатные ситуации управления) и в процессе работы остаются неизменными. В результате, система управления на основе ГА справляется с задачей точного позиционирования манипулятора в штатных ситуациях. Однако система управления на основе ГА не обеспечивает гарантированного управления в непредвиденных ситуациях управления, что будет продемонстрировано ниже.

Применение системы управления на основе ГА ограничено требованием наличия описания постоянных условий внешней среды и известных структур управляющего звена и ОУ.

Расширение применимости системы управления возможно с помощью увеличения интеллектуальности системы управления – использования динамической настройки коэффициентов ПИД-регулятора, что возможно с включением элементов технологии мягких вычислений.

2. Проектирование интеллектуальной системы управления с применением технологий мягких вычислений

Основным элементов интеллектуальной системы управления (ИСУ) с применением технологий мягких вычислений [7] 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.

Разработка БЗ рассмотрена ранее на примере робота манипулятора с тремя степенями свободы [10]. Было показано, что в зависимости от сложности системы и ОУ, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях может содержать один или несколько НР и с увеличением сложности ОУ, увеличивается время создания БЗ, повышаются требования к вычислительным ресурсам процессора, на котором создается БЗ и объему памяти системы, в которой размещается БЗ.

При возникновении ситуаций, когда сложность реализации единой БЗ высока, создаются несколько БЗ, которые размещаются в разных НР. Разделение управления несколько снижает качество системы, однако создание нескольких НР нередко является единственным способом организации интеллектуального управления сложным ОУ, таким как робот манипулятор с семью степенями свободы.

В связи со сложностью рассматриваемого объекта управления реализация единой БЗ невозможна, поэтому изначально организуем разделенное управление звеньями (один НР управляет одним звеном, как показано на рис. 2).

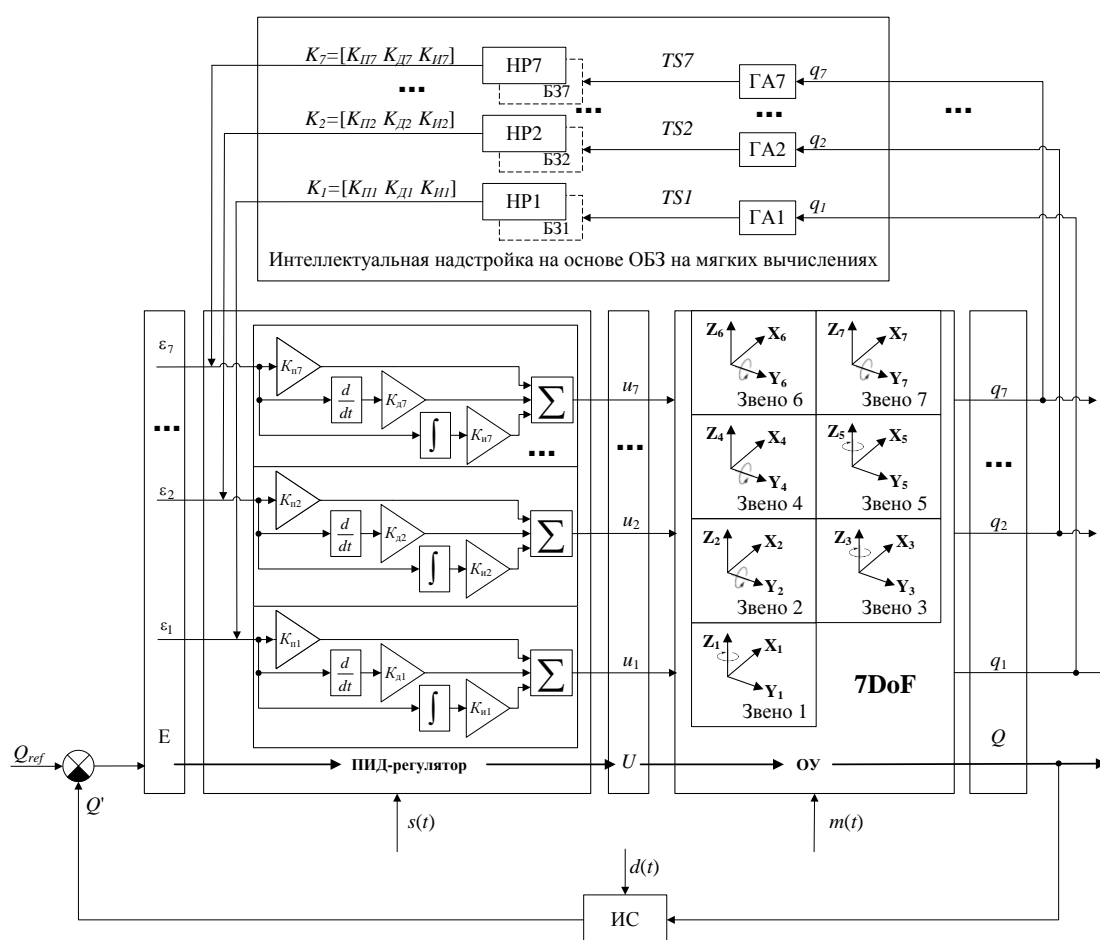


Рис. 2. ИСУ роботом манипулятором с семью степенями свободы на ОБЗ на мягких вычислениях

На рис. 2 используются следующие обозначения: $E = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_7]$ – ошибка управления, $U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_7]$ – управляющее воздействие, $TS_i, i = \overline{1,7}$ – обучающий сигнал соответствующего нечеткого регулятора (НР), $Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_7]$ – регулируемая величина [11].

Для исследования качества рассмотренных систем управления, в среде *MatLab/Simulink* было моделирование систем управления манипулятором с семью степенями свободы.

3. Порядок проведения и оценки экспериментов

В предположении, что звенья робота манипулятора могут вращаться в диапазоне $(-70 + 70)$ градусов и конфигурации степеней свободы соответствуют приведенной в таблице 1, построена формализованная модель манипулятора с семью степенями свободы.

Таблица 1. 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})

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. Серия экспериментов состоит из двух этапов: работа в штатных и работа в непредвиденных (нештатных) ситуациях управления.

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

Нештатные ситуации разделяются на внешние и внутренние.

Внешние непредвиденные ситуации:

1) принудительное изменение положений звеньев: первого звена до значения -30 градусов на 25-ой итерации и до значения 30 градусов на 75-ой итерации; второго-седьмого звеньев до значения -30 градусов на 50-ой итерации и до значения 30 градусов на 100-ой итерации.

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;

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.

Для оценки и сравнения результатов испытаний рассмотренных типов систем управления – систем управления с постоянными коэффициентами и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях – введена система критериев качества, учитывающая методы оценки переходных процессов теории автоматического управления [9]. Данные методы были адаптированы для конкретного ОУ (робота манипулятора с семью степенями свободы) в следующем виде:

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

Задача позиционирования считается решенной, если по 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 $2\Delta < 1 \text{ deg}$:

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

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

4. Относительное значение перерегулирования σ .

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

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

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

5. Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершении заданного числа итераций ϵ .

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon &= \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \text{ if } (|q_{1ref} - q_1| > |q_{2ref} - q_2|) \cap (|q_{1ref} - q_1| > |q_{3ref} - q_3|) \cap \dots \cap (|q_{1ref} - q_1| > |q_{7ref} - q_7|) \\ \varepsilon &= \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \text{ if } (|q_{2ref} - q_2| > |q_{1ref} - q_1|) \cap (|q_{2ref} - q_2| > |q_{3ref} - q_3|) \cap \dots \cap (|q_{2ref} - q_2| > |q_{7ref} - q_7|), \\ &\dots \\ \varepsilon &= \left| \frac{q_{7ref} - q_7}{q_{7ref}} \right|, \text{ if } (|q_{7ref} - q_7| > |q_{1ref} - q_1|) \cap (|q_{7ref} - q_7| > |q_{2ref} - q_2|) \cap \dots \cap (|q_{7ref} - q_7| > |q_{6ref} - q_6|) \end{aligned} \right.$$

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

6. Время одной итерации t .

Реальное время выполнения одной итерации I выбранного типа системы управления:

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

7. Сложность реализации управления P .

Оценка изменения коэффициентов управления:

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

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

$$FCB \equiv w_1 \cdot P[PTS_{KCS}] + w_2 \cdot P[PTS_{ACCS1}] + w_3 \cdot P[PTS_{ACCS2}] + \\ + w_4 \cdot P[I_T] + w_5 \cdot P[\sigma] + w_6 \cdot P[\varepsilon] + w_7 \cdot P[t] + w_8 \cdot P,$$

где $w = [0.1 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.05]$ – весовые коэффициенты.

4. Качество систем управления с постоянными коэффициентами ПИД-регулятора

Как уже было сказано, задача управления сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора, при которых обеспечивается желаемый характер движения манипулятора.

Рассматриваются два типа систем автоматического управления (САУ) с постоянными коэффициентами: система управления на ПИД-регуляторе и с использованием ГА.

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 2.

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

1) 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;

2) 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;

3) и система управления на основе ПИД-регулятора, и с использованием ГА имеют низкое быстродействие;

4) при использовании системы управления на ГА значительно улучшаются показатели относительных значений перерегулирования и ошибок позиционирования по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе;

5) при использовании системы управления на ГА общая оценка управления по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе улучшается в 1,8 раз.

Таблица 2. Сравнение работы систем управления с постоянными коэффициентами

Критерии качества	Качество управления	САУ на основе ПИД-регулятора	САУ 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

На рис. 3 продемонстрирована работа манипулятора при использовании систем управления на ПИД-регуляторе и с использованием ГА в условиях третьей 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.

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.

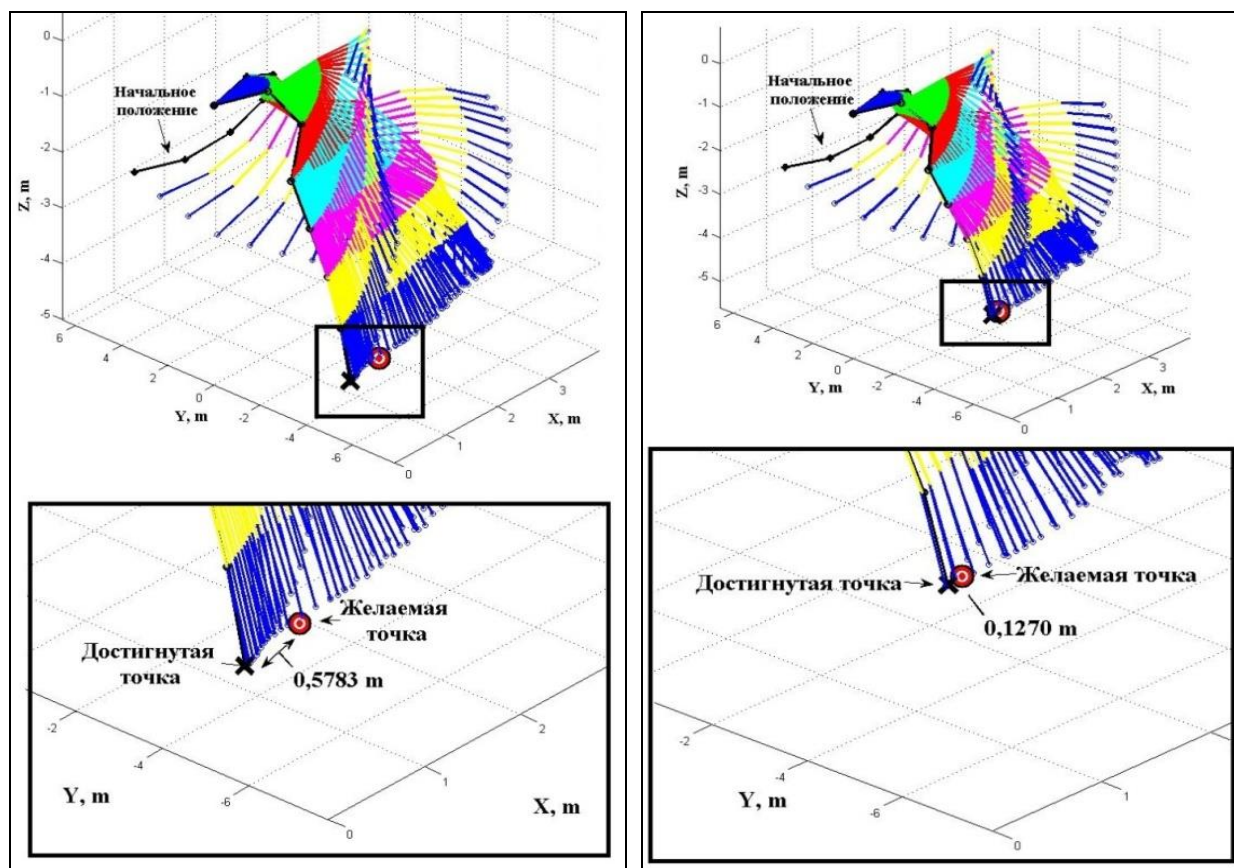


Рис. 3. Движение робота манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации: под управлением ПИД-регулятора (слева); системы управления с использованием ГА (справа)

5. Качество систем управления с применением технологий мягких вычислений

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 3.

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.

Таблица 3. Сравнение результатов работы систем управления с постоянными коэффициентами и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

Качество управления	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях	САУ с использованием ГА	САУ на основе ПИД-регулятора
Решение в штатных ситуациях управления	0,923	0,615	0,000
Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	0,744	0,256	0,000
Решение в непредвиденных ситуациях: изменения параметров ОУ	0,923	0,308	0,058
Быстродействие	0,092	0,008	0,000
Относительное значение перерегулирования	0,969	0,956	0,892
Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,911	0,657	0,379
Время одной итерации	0,973	0,998	0,998
Сложность реализации управления	0,946	1,000	1,000
Общее управление	0,728	0,439	0,244

На рис. 4 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).

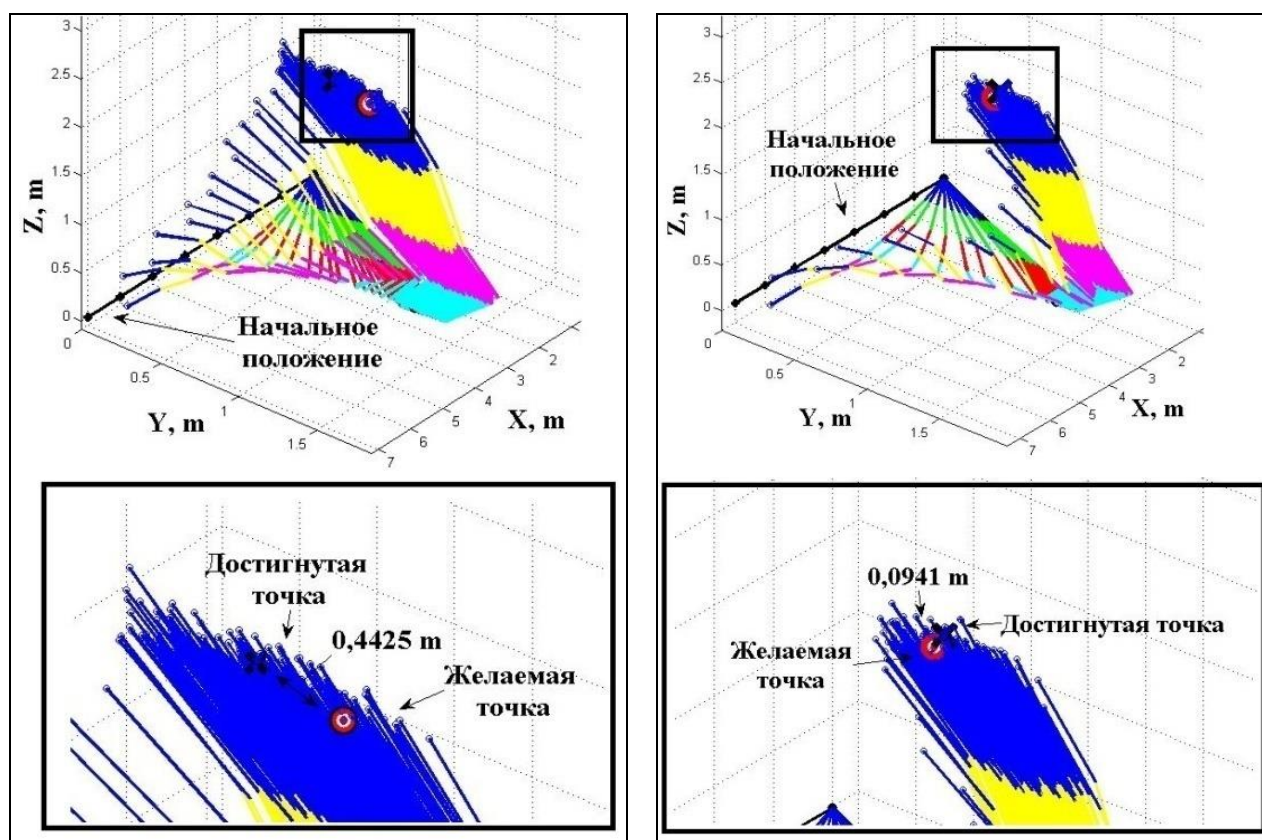


Рис. 4. Движение робота манипулятора в условиях внутренней непредвиденной ситуации: результат работы системы управления на основе ГА (слева); ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (справа)

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.

6. Организация координационного управления с применением технологий квантовых вычислений

В [12] описан новый вид квантового поискового алгоритма на обобщенном пространстве БЗ НР, спроектированных на основе технологий мягких вычислений, — квантовый нечеткий вывод (КНВ) для проектирования обобщенного робастного сигнала управления. Модель КНВ реализует самоорганизацию БЗ, основывается на физических законах теории квантовых вычислений [13, 14] и использовании четырех операторов: суперпозиции, квантовой корреляции, интерференции и измерения. Первые три являются унитарными, обратимыми квантовыми операторами, а четвертый (оператор измерения) — классическим (необратимым).

В [15] была показана эффективность применения алгоритма КНВ для организации координационного управления роботом манипулятором с тремя степенями свободы. Алгоритм КНВ выполняет следующую последовательность шагов:

1. Нормализация.
2. Кодирование: построение всех нормализованных состояний и вычисление амплитуд вероятностей $|0\rangle$ и $|1\rangle$ из соответствующих гистограмм.
3. Выбор типа квантовой корреляции для построения выходных сигналов управления. В рамках данной работы рассматриваются три типа смешанных корреляций: пространственная, пространственно-временная и временная [12], а помимо этого — корреляции различного числа НР. Зависимость выходных сигналов определяется корреляцией наборов входных коэффициентов, где каждый набор является запутанным состоянием.
4. Построение суперпозиции запутанных состояний [16].
5. Измерение интеллектуального квантового состояния (выбор состояния с максимальной амплитудой вероятности).
6. Декодирование.
7. Денормализация.

Схема подключения блока КНВ в интеллектуальную систему управления представлена на рис. 5. На рис. 5: $m_v(t)$, $m_{nc}(t)$ — шумы соответственно в каналах управления и измерительной системы, $f_{ov}(t)$ — внешние воздействия на ОУ.

Создание КНВ производится с помощью интеллектуального инструментария Оптимизатор Баз Знаний на основе квантовых вычислений.

Рассмотрим метод включения алгоритма КНВ в ИСУ роботом манипулятором на основе ОБЗ на мягких вычислениях.

В выбранной конфигурации структуры ИСУ реализовано семь НР, каждый из которых управляет независимо от других одним из семи звеньев. В качестве штатной ситуации управления для i -го НР выступает типовая ситуация управления, в условиях которой получен обучающий сигнал TS_i .

Непредвиденные ситуации управления разделяются на внешние и внутренние. К внешним непредвиденным ситуациям относятся возмущающие воздействия, как например принудительное изменение положения ОУ в начале или в процессе работы, изменение опорных сигналов и др. К внутренним ситуациям управления относятся изменения параметров компонентов системы управления (ограничения, шумы и задержки сигналов).

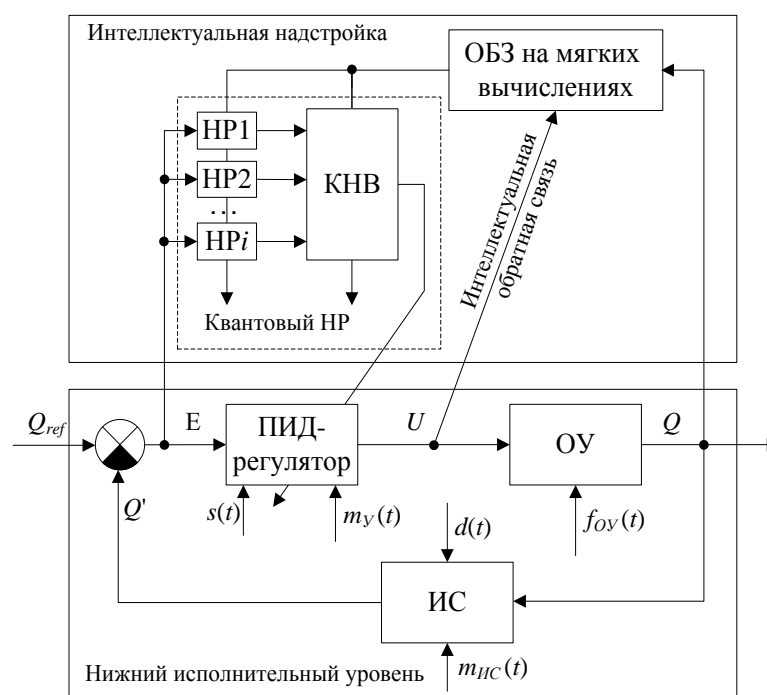


Рис. 5. Структура ИСУ на основе мягких и квантовых вычислений

Рассмотрим работу в условиях внешних непредвиденных ситуаций.

Спроектированная ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, представленная на рис. 2, может содержать информацию о семи ситуациях управления (штатных или непредвиденных) для каждого из звеньев.

Рассмотрим пример, когда в спроектированной ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением НР1 содержит информацию о штатной ситуации 1 (БЗ1) для звена 1, НР2 – о штатной ситуации 1 для звена 2 (БЗ2) и т.д. Блок КНВ, включенный в модель ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, реализует самоорганизацию БЗ НР. В этом случае имеется возможность не только объединять информацию о штатной ситуации 1 для всех звеньев, но и извлекать дополнительную информацию (методами квантовых вычислений и квантовой теории информации) из реакции спроектированных БЗ для реализации робастного управления в штатных и непредвиденных ситуациях управления (которые не включены в существующие спроектированные БЗ). При этом сами БЗ, реакции которых используются для проектирования робастного управления, в нештатных ситуациях могут быть не робастными.

Далее ИСУ с использованием КНВ будем называть ИСУ на основе ОБЗ на квантовых вычислениях.

7. Качество интеллектуальной системы управления с квантовым нечетким выводом

Для исследования качества систем управлений, были разработаны модели систем управления роботом манипулятором с семью степенями свободы в среде *MatLab/Simulink*.

Исходная ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях содержит семь НР, каждый из которых может коррелировать с одним или несколькими НР системы.

В данной статье рассматриваются шесть комбинаций:

1. корреляция двух соседних нечетких БЗ: для управления i -ым звеном манипулятора используется информация HP_i и HP_{i+1} (как показано на рис. 6);
2. корреляция трех соседних нечетких БЗ: для управления i -ым звеном манипулятора используется информация HP_i , HP_{i+1} и HP_{i+2} ;
3. корреляция четырех соседних нечетких БЗ: для управления i -ым звеном манипулятора используется информация HP_i , HP_{i+1} , HP_{i+2} , и HP_{i+3} ;
4. корреляция пяти соседних нечетких БЗ: для управления i -ым звеном манипулятора используется информация HP_i , HP_{i+1} , HP_{i+2} , HP_{i+3} , и HP_{i+4} ;
5. корреляция шести соседних нечетких БЗ: для управления i -ым звеном манипулятора используется информация HP_i , HP_{i+1} , HP_{i+2} , HP_{i+3} , HP_{i+4} и HP_{i+5} ;
6. корреляция всех семи нечетких БЗ.



Рис. 6. Применение корреляции двух соседних HP

Для каждой из шести комбинаций рассматриваются пространственная, пространственно-временная и временная корреляции.

В таблице 4 приведено сравнение работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях для пространственной (S), пространственно-временной ($S-T$) и временной (T) корреляций соответственно для шести комбинаций коррелируемых HP (два соседних HP, три соседних HP и т.д.) и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Сравним работу ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях при использовании отмеченных корреляций с работой ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (таблица 4):

- при использовании любого варианта корреляции, ИСУ на квантовых вычислениях обеспечивает решение задачи позиционирования в штатных ситуациях в отличие от ИСУ на мягких вычислениях;
- при решении задачи позиционирования в условиях внешних непредвиденных ситуаций лучшие результаты получены при использовании ИСУ на квантовых вычислениях с пространствен-

ной корреляцией двух соседних НР, пространственно-временной корреляцией трех соседних НР и пространственной корреляции всех семи НР;

- при решении задачи позиционирования в условиях внутренних непредвиденных ситуаций улучшения при использовании ИСУ на квантовых вычислениях по сравнению с ИСУ на мягких вычислениях не получено;
- при использовании ИСУ на квантовых вычислениях по сравнению с ИСУ на мягких вычислениях, критерий Быстродействие улучшен в 5 раз;
- оценки по критериям Перерегулирование, Устойчивость, Время одной итерации и Сложность реализации управления практически не изменились;
- оценка общего управления по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях улучшается при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием любого типа корреляции, однако наилучший результат достигается при использовании пространственной корреляции всех семи.

Таблица 4. Сравнение работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с работой ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

			1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Корреляция	Штатные ситуации решение	Внешние непредвиденные ситуации	Внутренние непредвиденные ситуации	Быстродействие	Перерегулирование	Устойчивость	Время одной итерации	Сложность реализации управления	Общее управление
ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях	Использование корреляции двух соседних НР	S	1,000	0,821	0,846	0,477	0,973	0,962	0,961	0,957	0,816
		S-T	1,000	0,821	0,846	0,464	0,973	0,961	0,943	0,948	0,812
		T	1,000	0,744	0,827	0,453	0,971	0,954	0,943	0,945	0,787
	Использование корреляции трех соседних НР: пространственно-временная	S	1,000	0,872	0,827	0,426	0,966	0,944	0,961	0,972	0,814
		S-T	1,000	0,821	0,885	0,461	0,968	0,947	0,962	0,953	0,818
		T	1,000	0,795	0,865	0,415	0,968	0,944	0,961	0,952	0,799
	Использование корреляции четырех соседних НР: пространственная	S	1,000	0,795	0,885	0,472	0,974	0,962	0,961	0,973	0,8163
		S-T	1,000	0,795	0,885	0,459	0,974	0,962	0,961	0,958	0,813
		T	1,000	0,795	0,904	0,457	0,973	0,961	0,961	0,957	0,8156
	Использование корреляции пяти соседних НР: пространственная	S	1,000	0,769	0,923	0,476	0,974	0,962	0,961	0,977	0,817
		S-T	1,000	0,769	0,885	0,463	0,974	0,962	0,961	0,961	0,808
		T	1,000	0,744	0,885	0,463	0,974	0,962	0,960	0,960	0,801
	Использование корреляции шести соседних НР: пространственная	S	1,000	0,795	0,923	0,465	0,974	0,962	0,961	0,982	0,821
		S-T	1,000	0,789	0,885	0,459	0,973	0,962	0,960	0,962	0,812
		T	1,000	0,795	0,885	0,465	0,973	0,961	0,961	0,960	0,814
	Использование корреляции семи НР: пространственная	S	1,000	0,821	0,923	0,459	0,971	0,960	0,960	0,986	0,826
		S-T	1,000	0,821	0,904	0,465	0,972	0,960	0,959	0,961	0,823
		T	1,000	0,795	0,904	0,465	0,972	0,961	0,958	0,959	0,817
	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях		0,923	0,744	0,923	0,092	0,969	0,911	0,973	0,946	0,721

На рис. 7 продемонстрирована работа манипулятора при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях в условиях второй внешней непредвиденной ситуации управления (изменено начальное положение), а на рис. 8 приведено сравнение фазовых портретов для рассмотренной ситуации управления.

Как видно из рис. 7 и 8, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях в условиях, рассмотренных штатной и внешней непредвиденной ситуации управления решает задачу точного позиционирования робота манипулятора с семью степенями свободы в отличие от ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

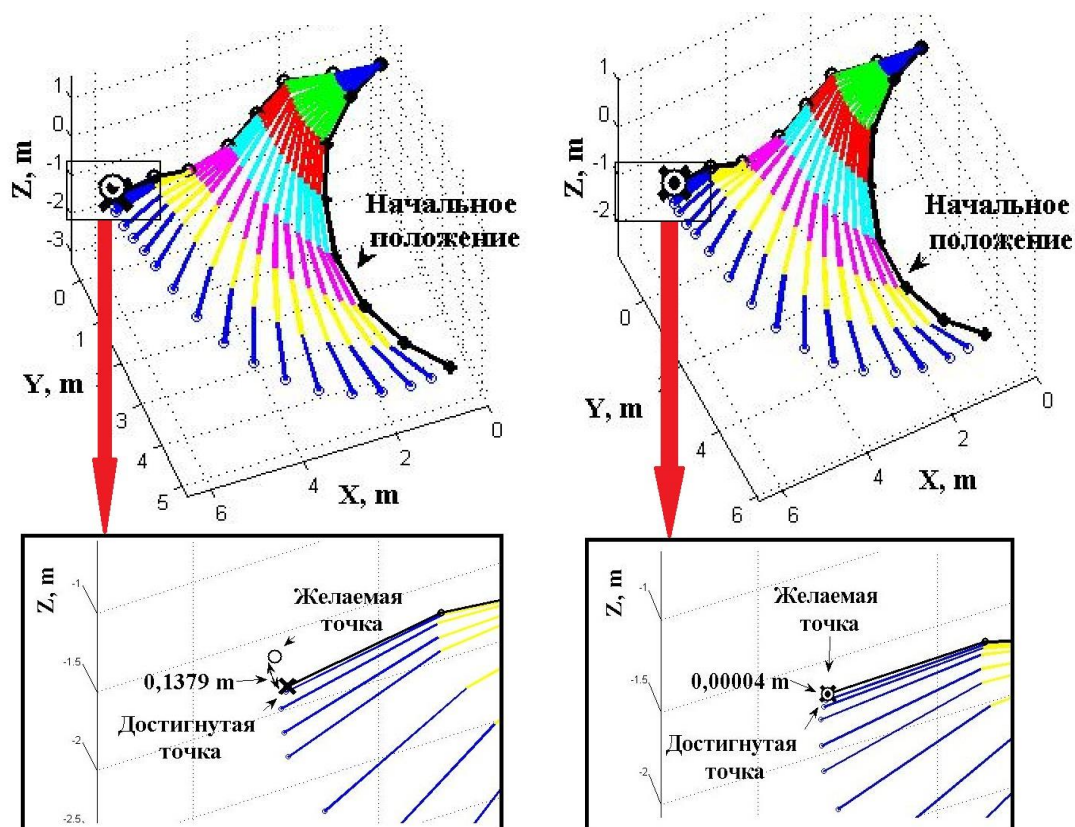


Рис. 7. Движение манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации: под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (слева); ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях (справа)

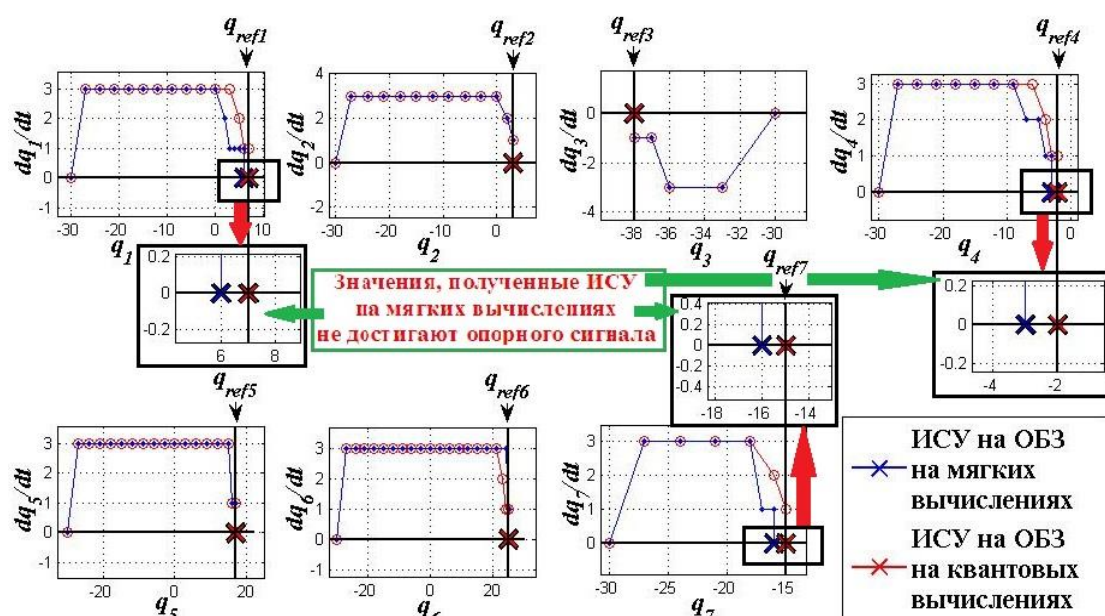


Рис. 8. Изменение положений звеньев манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации управления: сравнение работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях

Как было сказано, при решении задачи позиционирования в условиях внутренних непредвиденных ситуаций улучшения при использовании ИСУ на квантовых вычислениях по сравнению с ИСУ на мягких вычислениях не получено.

Рассмотрим более подробно внутренние непредвиденные ситуации с внесением шумов в каналы управления и систему измерения. Усилим внутренние возмущения и сравним поведение ИСУ на мягких и на квантовых вычислениях.

8. Качество интеллектуальной системы управления с квантовым нечетким выводом в условиях сильных внутренних возмущающих воздействий

Ранее были рассмотрены следующие внутренние непредвиденные ситуации с внесением возмущающих воздействий:

- 1) внесение шумов в каналы управления (амплитуда шума = 1);
- 2) внесение погрешностей в систему измерения (1,5 градуса).

Рассмотрим поведение систем управления в условиях сильных возмущающих воздействий.

Ранее решение задачи позиционирования определялось максимально точным позиционированием отдельных звеньев манипулятора.

Однако в условиях сильных возмущающих воздействий точного позиционирования каждого звена добиться практически невозможно. По этой причине критерий качества Быстродействие можно исключить из рассмотрения (время всегда будет равно числу допустимых итераций).

Поставим более общую задачу: максимально точного позиционирования функционального устройства манипулятора. Для этого введем новый критерий качества: метрическая ошибка позиционирования функционального устройства *EEP* (*End Effector Positioning*):

$$EEP = \sqrt{(X_{ref} - X)^2 + (Y_{ref} - Y)^2 + (Z_{ref} - Z)^2},$$

где $\{X, Y, Z\}$ – координаты достигнутой точки, $\{X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref}\}$ – координаты желаемой точки.

$$EEP_{выполнение} \equiv \frac{\left(\sum_{i=1}^N \frac{EEP_i}{EEP_{max}} \right)}{N},$$

где N – число экспериментов, EEP_{max} – максимальная метрическая ошибка из оцениваемой серии экспериментов.

В соответствии с введенными обновлениями система критериев качества для оценки работы систем управления в условиях сильных внутренних возмущающих воздействий примет вид:

1. Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства *EEP*.
2. Относительное значение перерегулирования σ .
3. Относительная ошибка позиционирования звеньев ε .
4. Время одной итерации t .
5. Сложность реализации управления P
6. Общая оценка управления *FCB* (*Full Control Behavior*)

$$FCB \equiv w_1 \cdot P[EEP] + w_2 \cdot P[\sigma] + w_3 \cdot P[\varepsilon] + w_4 \cdot P[t] + w_5 \cdot P,$$

где $w = [0.4 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.2]$ – вектор весовых коэффициентов.

Рассмотрим непредвиденную ситуацию с внесением сильного возмущающего воздействия в каналы управления.

Ранее уже была рассмотрена внутренняя непредвиденная ситуация с внесением в каналы управления случайных шумов с амплитудой = 1. Увеличим амплитуду вносимых случайных шумов до 10.

Проводим следующую серию экспериментов: для 13 точек рабочего пространства манипулятора генерируется 30 случайных шумов. Сгенерированные шумы вносятся в канал управления ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях.

На рис. 9 приведено сравнение метрических ошибок позиционирования функционального устройства манипулятора ИСУ на ОБЗ на мягких и на квантовых вычислениях для 380 экспериментов.

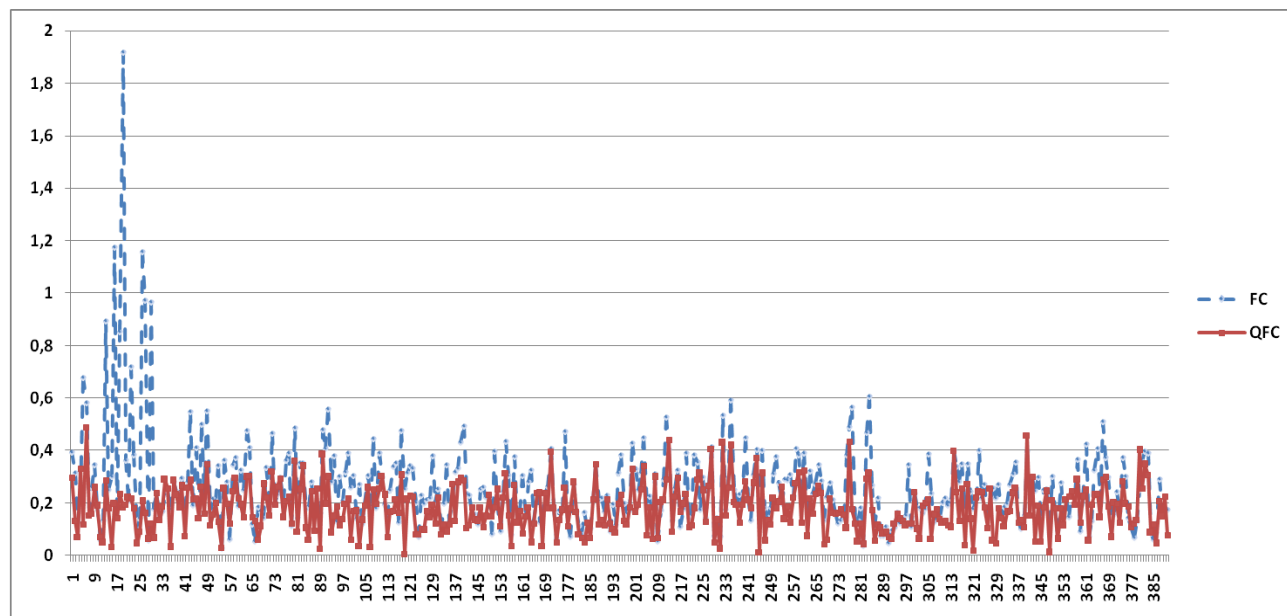


Рис. 9. Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства [м]: FC – результат работы ИСУ на мягких вычислениях, QFC – ИСУ на квантовых вычислениях

По результатам 390 экспериментов видно, что метрическая ошибка, получаемая при использовании квантовых вычислений, как правило, меньше, чем при использовании только мягких вычислений. Сравним работу ИСУ на ОБЗ на мягких и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях в соответствии с введенной системой критериев качества (таблица 5).

Таблица 5. Сравнение работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях и на мягких вычислениях

	Критерий качества	FC: ИСУ на мягких вычислениях	QFC: ИСУ на квантовых вычислениях
1	Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства	0,864	0,906
2	Относительное значение перерегулирования	0,717	0,742
3	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,457	0,544
4	Время одной итерации	0,978	0,923
5	Сложность реализации управления	0,817	0,942
6	Общее управление	0,822	0,864

Из таблицы 5 видно, что ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по всем критериям (за исключением времени одной итерации) превосходит ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

В целом, ошибка позиционирования функционального устройства при использовании только мягких вычислений не превышает 0,3 метров при длине одного звена 1 м.

Сгенерируем шумы, при которых метрическая ошибка позиционирования функционального устройства при работе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях составит более 0,5 метров и при тех же

шумах оценим поведение ИСУ на квантовых вычислениях. Для этого увеличим амплитуду шумов, вносимых в каналы управления до 100.

Для 13 точек рабочего пространства манипулятора генерируется 5 случайных шумов. Сгенерированные шумы вносятся в каналы управления ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях.

На рис. 10 приведено сравнение метрических ошибок позиционирования функционального устройства манипулятора ИСУ на ОБЗ на мягких и на квантовых вычислениях для 65 экспериментов.

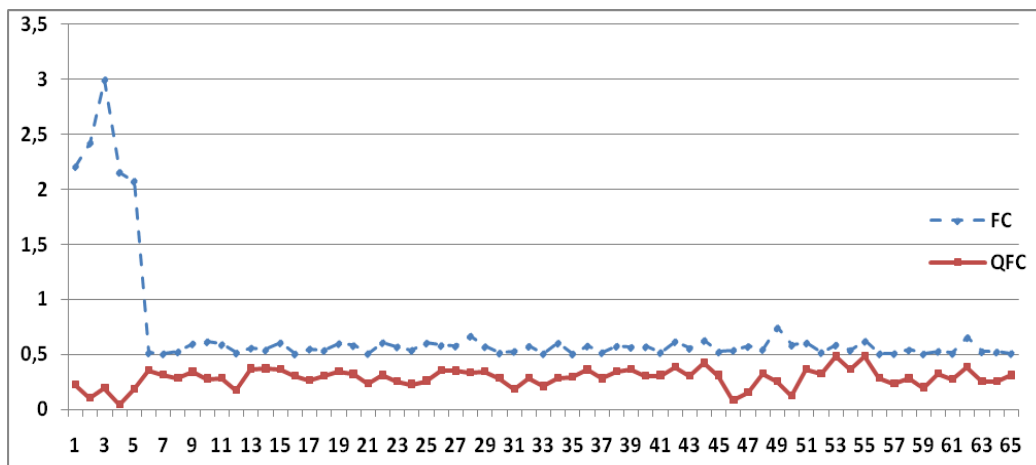


Рис. 10. Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства [м]: FC – результат работы ИСУ на мягких вычислениях, QFC – ИСУ на квантовых вычислениях

По результатам 65 экспериментов видно, что метрическая ошибка, получаемая при использовании квантовых вычислений, значительно меньше, чем при использовании только мягких вычислений. Сравним работу ИСУ на ОБЗ на мягких и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях в соответствии с введенной системой критериев качества (таблица 6).

Таблица 6. Сравнение работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях и на мягких вычислениях

	Критерий качества	FC: ИСУ на мягких вычислениях	QFC: ИСУ на квантовых вычислениях
1	Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства	0,767	0,904
2	Относительное значение перерегулирования	0,683	0,745
3	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,414	0,494
4	Время одной итерации	0,976	0,926
5	Сложность реализации управления	0,817	0,941
6	Общее управление	0,775	0,859

Из таблицы 6 видно, что ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по всем критериям (за исключением времени одной итерации) превосходит ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

В рассмотренных непредвиденных ситуациях с внесением сильных шумов в каналы управления, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях показала преимущество перед ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Рассмотрим непредвиденную ситуацию с внесением сильного возмущающего воздействия в систему измерения.

Ранее уже была рассмотрена внутренняя непредвиденная ситуация с внесением в систему измерения случайных шумов с амплитудой = 1,5. Увеличим амплитуду вносимых случайных шумов до 5 градусов.

Проводим следующую серию экспериментов: для 13 точек рабочего пространства манипулятора генерируется 30 случайных шумов. Сгенерированные шумы вносятся в систему измерения ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях.

На рис. 11 приведено сравнение метрических ошибок позиционирования функционального устройства манипулятора ИСУ на ОБЗ на мягких и на квантовых вычислениях для 380 экспериментов.

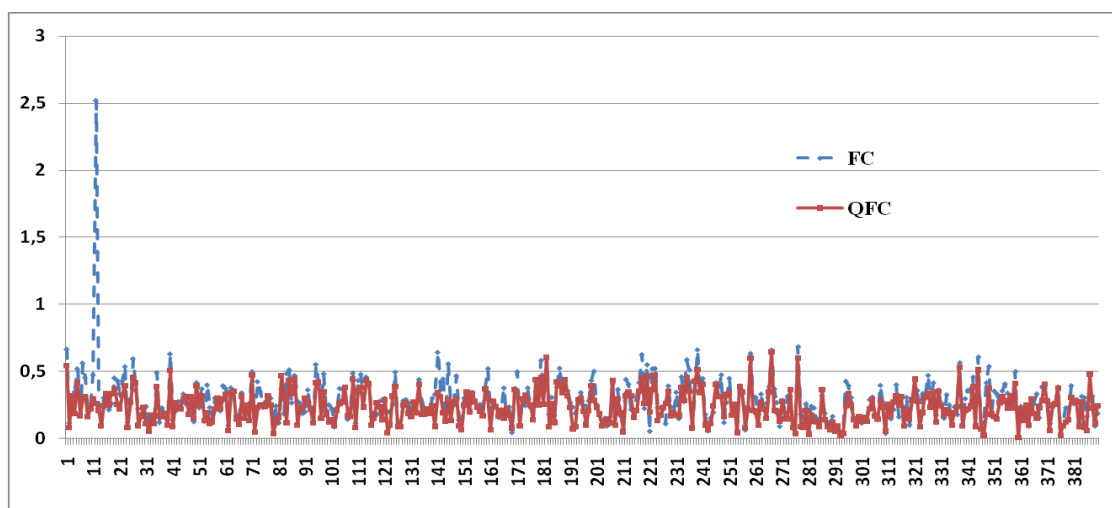


Рис. 11. Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства [м]: FC – результат работы ИСУ на мягких вычислениях, QFC – ИСУ на квантовых вычислениях

По результатам 380 экспериментов видно, что метрическая ошибка, получаемая при использовании квантовых вычислений, как правило, меньше, чем при использовании только мягких вычислений. Сравним работу ИСУ на ОБЗ на мягких и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях в соответствии с введенной системой критериев качества (таблица 7).

Таблица 7. Сравнение работы ИСУ на ОБЗ на квантовых и на мягких вычислениях

	Критерий качества	FC: ИСУ на мягких вычислениях	QFC: ИСУ на квантовых вычислениях
1	Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства	0,888	0,907
2	Относительное значение перерегулирования	0,642	0,656
3	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,359	0,395
4	Время одной итерации	0,974	0,941
5	Сложность реализации управления	0,807	0,956
6	Общее управление	0,811	0,847

Из таблицы 7 видно, что ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по всем критериям (за исключением времени одной итерации) превосходит ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Применение ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях позволяет несколько улучшить работу по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, однако улучшение незначительное. В целом, ошибка позиционирования функционального устройства при использовании только мягких вычислений не превышает 0,3 метров при длине одного звена 1 м.

Сгенерируем шумы, при которых метрическая ошибка позиционирования функционального устройства при работе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях составит более 1,5-2 метров и при тех же

шумах оценим поведение ИСУ на квантовых вычислениях. Для этого увеличим амплитуду шумов, вносимых в систему измерения до 10 градусов.

Для 13 точек рабочего пространства манипулятора генерируется 5 случайных шумов. Сгенерированные шумы вносятся в систему измерения ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях.

На рис. 12 приведено сравнение метрических ошибок позиционирования функционального устройства манипулятора ИСУ на ОБЗ на мягких и на квантовых вычислениях для 65 экспериментов.

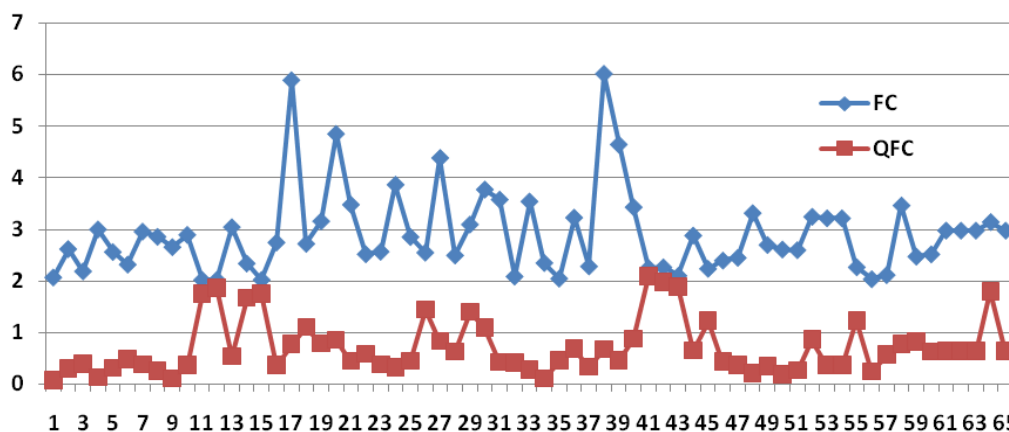


Рис. 12. Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства [м]: FC – результат работы ИСУ на мягких вычислениях, QFC – ИСУ на квантовых вычислениях

По результатам 65 экспериментов видно, что метрическая ошибка, получаемая при использовании квантовых вычислений, значительно меньше, чем при использовании только мягких вычислений. Сравним работу ИСУ на ОБЗ на мягких и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях в соответствии с введенной системой критериев качества (таблица 8).

Таблица 8. Качество работы ИСУ на ОБЗ на мягких и на квантовых вычислениях в условиях сильных шумов в системе измерения

	Критерий качества	FC: ИСУ на мягких вычислениях	QFC: ИСУ на квантовых вычислениях
1	Метрическая ошибка позиционирования функционального устройства	0,517	0,882
2	Относительное значение перерегулирования	0,330	0,504
3	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,062	0,258
4	Время одной итерации	0,977	0,933
5	Сложность реализации управления	0,780	0,968
6	Общее управление	0,597	0,809

Из таблицы 8 видно, что ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по всем критериям (за исключением времени одной итерации) превосходит ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Рассмотрим пример влияния шума в системе измерения на работу ИСУ на мягких и на квантовых вычислениях. На рис. 13 приведено сравнение измеренных сигналов при работе ИСУ на мягких (слева) и на квантовых (справа) вычислениях. На рис. 14 приведено положение манипулятора при работе ИСУ на мягких (слева) и на квантовых вычислениях (справа).

В рассмотренных непредвиденных ситуациях с внесением сильных шумов в систему измерения, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях показала преимущество перед ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

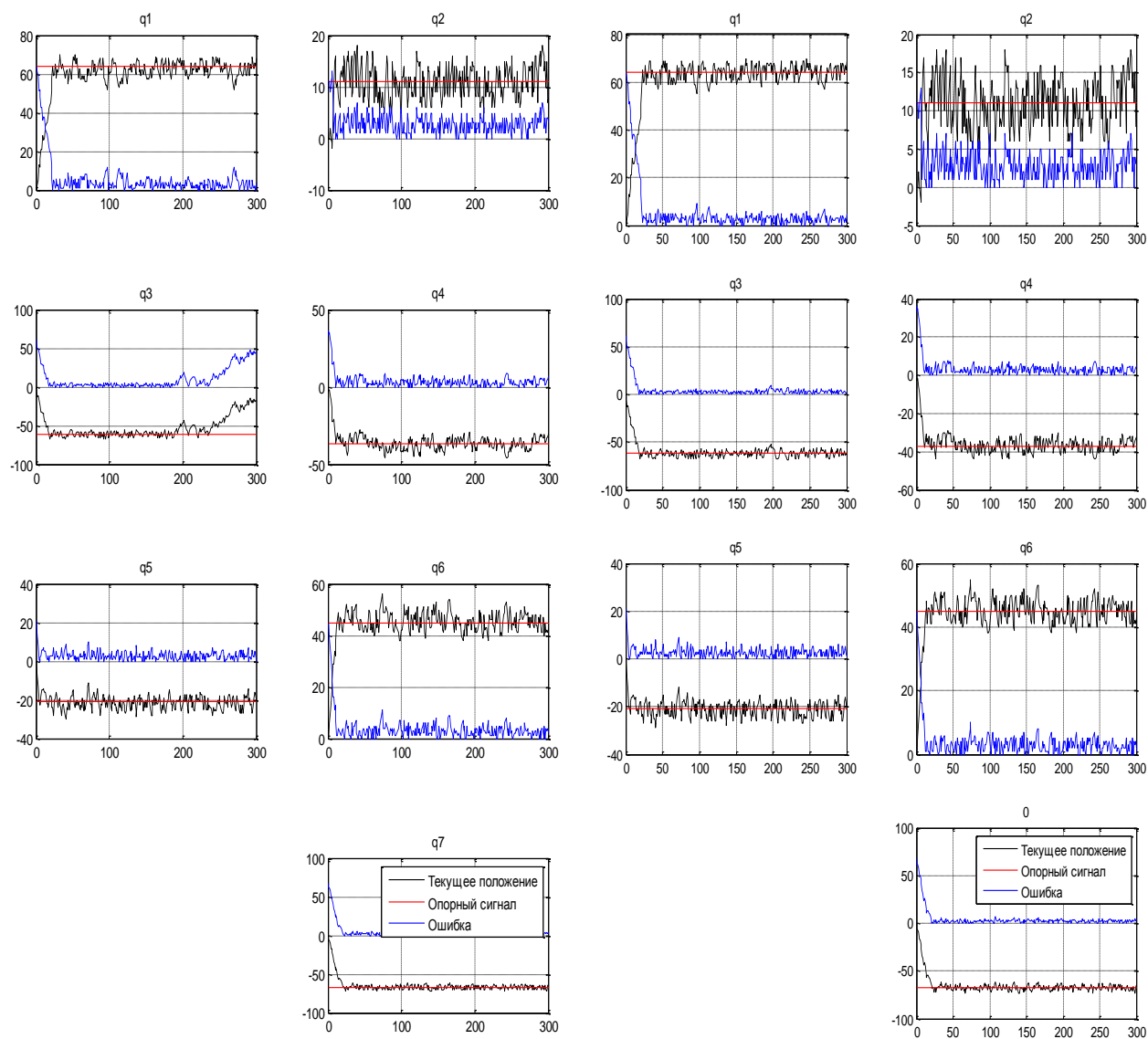


Рис. 13. Измеренные сигналы при работе ИСУ на мягких (слева) и на квантовых (справа) вычислениях

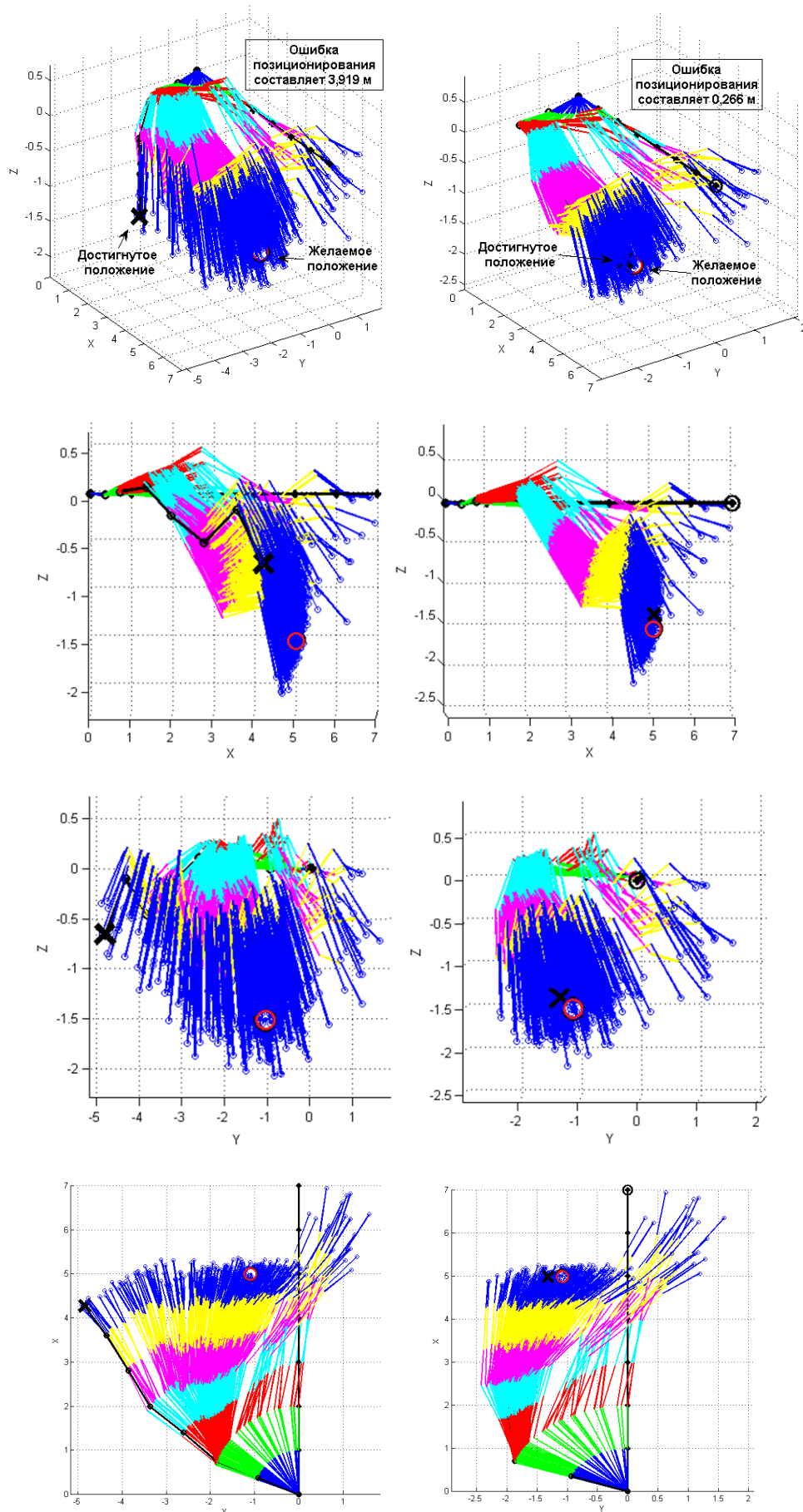


Рис. 14. Положение манипулятора в пространстве при работе ИСУ на мягких (слева) и на квантовых вычислениях (справа)

Заключение

На примере сложного ОУ – робота манипулятора с семью степенями свободы – были рассмотрены принципы проектирования систем управления:

- классических – на основе ПИД-регулятора;
- с применением ГА;
- с применением технологий мягких вычислений;
- с применением технологий квантовых вычислений.

На уровне моделирования (с использованием пакета *MatLab/Simulink*), было продемонстрировано, что:

- система управления с постоянными коэффициентами на основе ПИД-регулятора при управлении сложным ОУ не способна решить задачу точного позиционирования даже в штатных ситуациях управления;
- система управления с постоянными коэффициентами с использованием ГА решает задачу точного позиционирования в штатных ситуациях управления, однако плохо справляется в условиях непредвиденных ситуаций управления;
- ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в большинстве случаев справляется с решением задачи позиционирования как в штатных, так и непредвиденных ситуациях управления, в отличие от систем управления с постоянными коэффициентами, при этом улучшая оценки по основным показателям критериев качества;
- включение обобщающего звена КНВ в ИСУ на основе ОБЗ на мягких вычислениях позволило:
 - обеспечить полное решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления при применении ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях в отличие от ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях;
 - улучшить показатель решения задачи точного позиционирования в условиях внешних непредвиденных ситуаций управления;
 - значительно улучшить показатель точности позиционирования функционального устройства в условиях сильных внутренних возмущений;
 - значительно (в 5 раз) улучшить показатель быстродействия;
 - уменьшить относительную ошибку позиционирования звеньев.

Список литературы

1. Khoogar A. R. [et al.] Obstacle Avoidance for Redundant Manipulators Using a Genetic Algorithm // Southeastcon '91 Conference, Williamsburg, VA, 7–10 Apr., 1991. – Vol. 1. – Pp. 317-320.
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. – Pp. 211-221.
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. – Pp. 673-684.
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, 10–12 June, 2009. – Pp. 1353-1358.
5. Meza J. L. [et al.] Fuzzy Self-Tuning PID Semiglobal Regulator for Robot Manipulators // Industrial Electronics, IEEE Transactions. – 2012. – Vol. 59. – № 6. – Pp. 2709-2717.
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), Puerto Vallarta, Mexico, 24–28 June, 2012. – Pp. 1-6.

7. Ульянов С.В. [и др.] Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. – М.: ВНИИгеосистем, 2011. – С. 408.
8. Panda R. C. Introduction to PID Controllers – Theory, Tuning and Application to Frontier Areas. — Rijeka, Croatia : InTech, 2012. – P. 258.
9. Михайлов В. С. Теория управления. – К.: Выща школа, 1988. – С. 312.
10. Николаева А. В., Ульянов С. В. Интеллектуальное управление роботом-манипулятором на основе мягких вычислений // Программные продукты и системы. – 2013. – № 4. – С. 150-155.
11. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – С. 616.
12. Литвинцева Л. В. [и др.] Квантовый нечеткий вывод для создания баз знаний в робастных интеллектуальных регуляторах // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 6. – С. 71-126.
13. Nielsen M. A., Chuang I. L. Quantum computation and quantum information. – UK, Cambridge: University Press, 2000. – P. 700.
14. Marinescu D. C., Marinescu G. M. Approaching quantum computing. – New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. – P. 400.
15. Николаева А. В., Ульянов С. В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом манипулятором с семью степенями свободы. Ч.2: Технологии квантовых вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2013. – № 4. – [Электронный ресурс]. URL: <http://sanse.ru/download/194>.
16. Jozsa R., Linden N. On the role of entanglement in quantum computational speed-up // Proceeding of the Royal Society. – 2003. – Vol. 459. – № 2036. – Pp. 2011-2032.