

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ МАНИПУЛЯТОРОМ С СЕМЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ. Ч.2: ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Николаева Алена Валериановна¹, Ульянов Сергей Викторович²

¹Аспирант;

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.

²Доктор 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: uyanovsv@mail.ru.

В статье рассматриваются проблемы проектирования интеллектуальных систем управления с применением технологий мягких и квантовых вычислений на примере робота манипулятора с семью степенями свободы. Предложена стратегия реализации самоорганизации баз знаний нечетких однотипных регуляторов с применением технологий квантовых вычислений. Путем введения обобщающего звена в систему управления на основе мягких вычислений, организуется координационное управление роботом манипулятором с семью степенями свободы. Рассматривается общая методология проектирования обобщающего звена, основанная на физических законах теории квантовых вычислений и схема встраиваемой в систему управления интеллектуальной надстройки с рядом однотипных независимых нечетких регуляторов. Демонстрируется эффективность предложенной методологии конструирования интеллектуальных систем управления для работы как в штатных, так и непредвиденных ситуациях управления по сравнению со структурами систем управления на основе мягких вычислений.

Ключевые слова: квантовые вычисления, корреляция, база знаний, нечеткий регулятор, квантовый нечеткий вывод.

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM DESIGN OF A ROBOTIC MANIPULATOR. PT. 2: MODELLING AND PHYSICAL EXPERIMENT BASED ON QUANTUM COMPUTING TECHNOLOGY

Nikolaeva Alyona¹, Ulyanov Sergey²

¹PhD 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.

²Doctor 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: uyanovsv@mail.ru.

The problem of intelligent control system's design with soft and quantum computing for 7 degrees of freedom manipulator is described. The self-organization knowledge base strategy of one type of fuzzy controllers using quantum soft computing technologies is considered. Coordination control of 7 degrees of freedom robot manipulator is organized by generalized unit in control system loop based on soft computing. Unified methodology of generalized unit design based on physical laws of quantum computing and connec-

tion circuit of control system with intelligent buildup on one type fuzzy controllers sequence are considered. Efficiency of proposed intelligent control systems constructing method by work in typical and unpredicted control situations is demonstrated in a comparison with control systems structures based on soft computing.

Keywords: quantum computing, quantum-classical correlation, knowledge base, fuzzy controller, quantum fuzzy inference.

Введение

В первой части статьи¹ были рассмотрены системы управления с постоянными и динамически изменяющимися коэффициентами (на основе технологий мягких вычислений) роботом манипулятором с семью степенями свободы.

Было продемонстрировано, что при использовании системы управления на основе пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, в штатных ситуациях, и во внешних непредвиденных ситуациях управления, задача позиционирования не может быть решена; незначительные положительные результаты были получены только для внутренних непредвиденных ситуаций управления.

Некоторое улучшение достигалось при использовании системы управления на основе генетического алгоритма (ГА): решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления достигалось в большинстве экспериментов, однако в непредвиденных ситуациях управления (как во внешних, так и во внутренних) – решение было достигнуто менее, чем в трети экспериментов.

Системы управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА) просты для проектирования, однако постоянные параметры управления лишают систему управления возможности перестроения и адаптации.

Применение технологий мягких вычислений для проектирования интеллектуальной системы управления (ИСУ) с регулируемым коэффициентом ПИД-регулятора (без разрушения нижнего исполнительного уровня) с использованием специального инструментария Оптимизатор Баз Знаний (ОБЗ) на мягких вычислениях позволило значительно повысить процент решения задач управления как в штатных, так и в непредвиденных ситуациях управления. Общая оценка управления при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях увеличилась в 1,7 раз по сравнению с системой управления на основе ГА и в 3 раза по сравнению с системой управления на основе ПИД-регулятора.

При работе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях быстродействие увеличилось более чем в 10 раз по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА), но в целом, осталось достаточно низким.

Ввиду того, что рассматриваемый объект управления (ОУ) – робот манипулятор с семью степенями свободы — сложен как в математическом, так и в техническом смысле описания его модели, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях была организована с разделением управления. Однако декомпозиция управления ведет к рассогласованию работы и некоторому снижению качества управления.

В настоящей статье рассматривается метод организации координационного управления без значительного увеличения сложности системы, предполагающий введение дополнительного обобщающего звена управления с применением технологий квантовых вычислений.

¹ Николаева Н.В., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления избыточным роботом манипулятором с семью степенями свободы Ч.1: Технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2013. – № 4. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/30>.

1. Технологии квантовых вычислений в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления

В квантовой логике интеллектуальных вычислений и квантовой теории информации, вследствие невыполнения классического закона дистрибутивности, появляются такие необычные явления, как, например, запутанные состояния, телепортация, сверхплотное кодирование.

Технологии квантовых вычислений для создания самоорганизующихся баз знаний (БЗ) интеллектуальных регуляторов, рассмотрены в [1, 2]. В [1] описан новый вид квантового поискового алгоритма на обобщенном пространстве БЗ нечетких регуляторов (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 [3,4] и использовании четырех операторов: суперпозиции, квантовой корреляции, интерференции и измерения. Первые три являются унитарными, обратимыми квантовыми операторами, а четвертый (оператор измерения) — классическим (необратимым).

На рис. 1 представлен алгоритм КНВ.

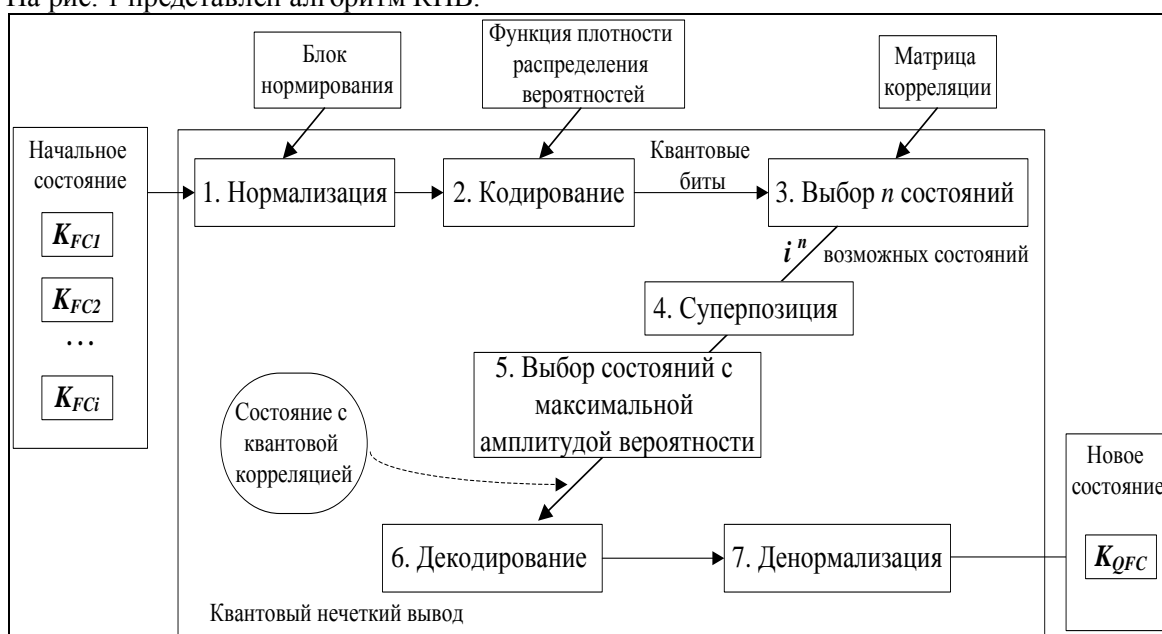


Рис. 1. Алгоритм КНВ

На рис. 1: K_{FCi} — выходной сигнал i -го НР, K_{QFC} — выходной сигнал блока КНВ.

Алгоритм КНВ [4] выполняет следующую последовательность шагов:

1. *Нормализация.* Приведение входных сигналов к нормализованным состояниям.
2. *Кодирование.* На этапе кодирования строятся все нормализованные состояния $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ и $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ для текущих входных переменных. Далее происходит 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 [5], 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.

5. *Измерение интеллектуального квантового состояния.* Выбор состояния с максимальной амплитудой вероятности.
6. *Декодирование.* Вычисление выходного значения соответствующего сигнала.
7. *Денормализация.* Вычисление денормализованного выходного значения.
8. Схема подключения блока КНВ в интеллектуальную систему управления (ИСУ) представлена на рис. 2.

На рис. 2: Q_{ref} – опорный сигнал, Q' – измеренная регулируемая величина, E – ошибка управления, $s(t)$ – ограничение управляющего воздействия, $m_y(t), m_{ИС}(t)$ – шумы соответственно в каналах управления и измерительной системы (ИС), U – управляющее воздействие, $d(t)$ – задержка в ИС, $f_{OY}(t)$ – внешние воздействия на ОУ, Q – регулируемая величина.

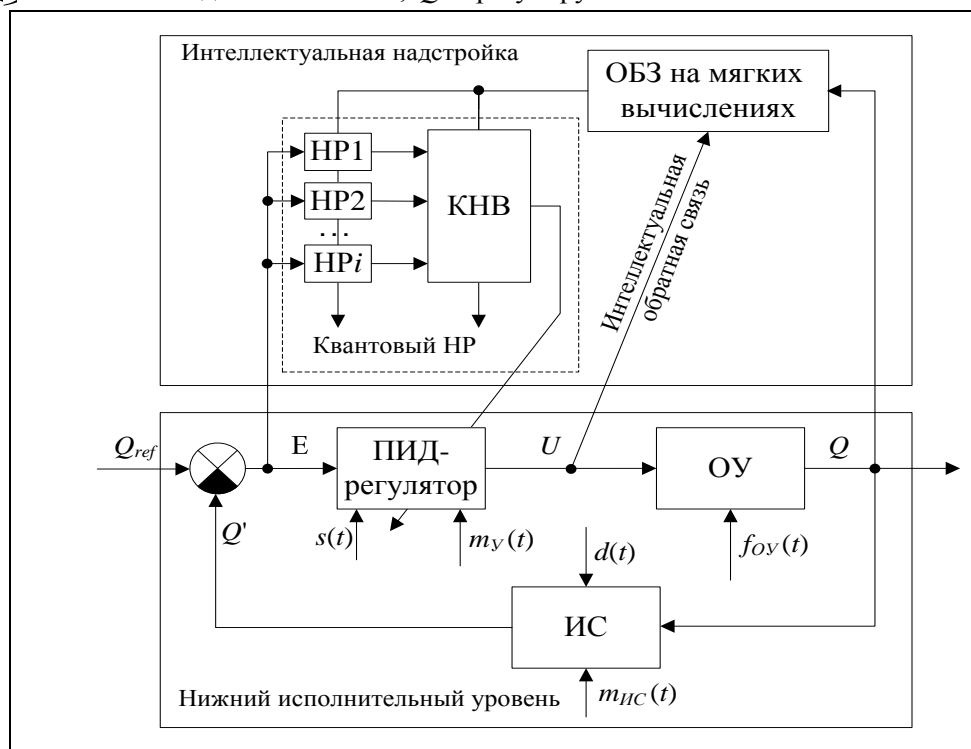


Рис. 2. Структура ИСУ на основе мягких и квантовых вычислений

Создание КНВ производится с помощью интеллектуального инструментария ОБЗ на основе квантовых вычислений [4, 6].

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

2. Организация координационного управления

В выбранной конфигурации структуры ИСУ реализовано семь НР, каждый из которых управляет независимо от других одним из семи звеньев.

На рис. 3 приведена структурная схема ИСУ манипулятором с семью степенями свободы на основе ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением.

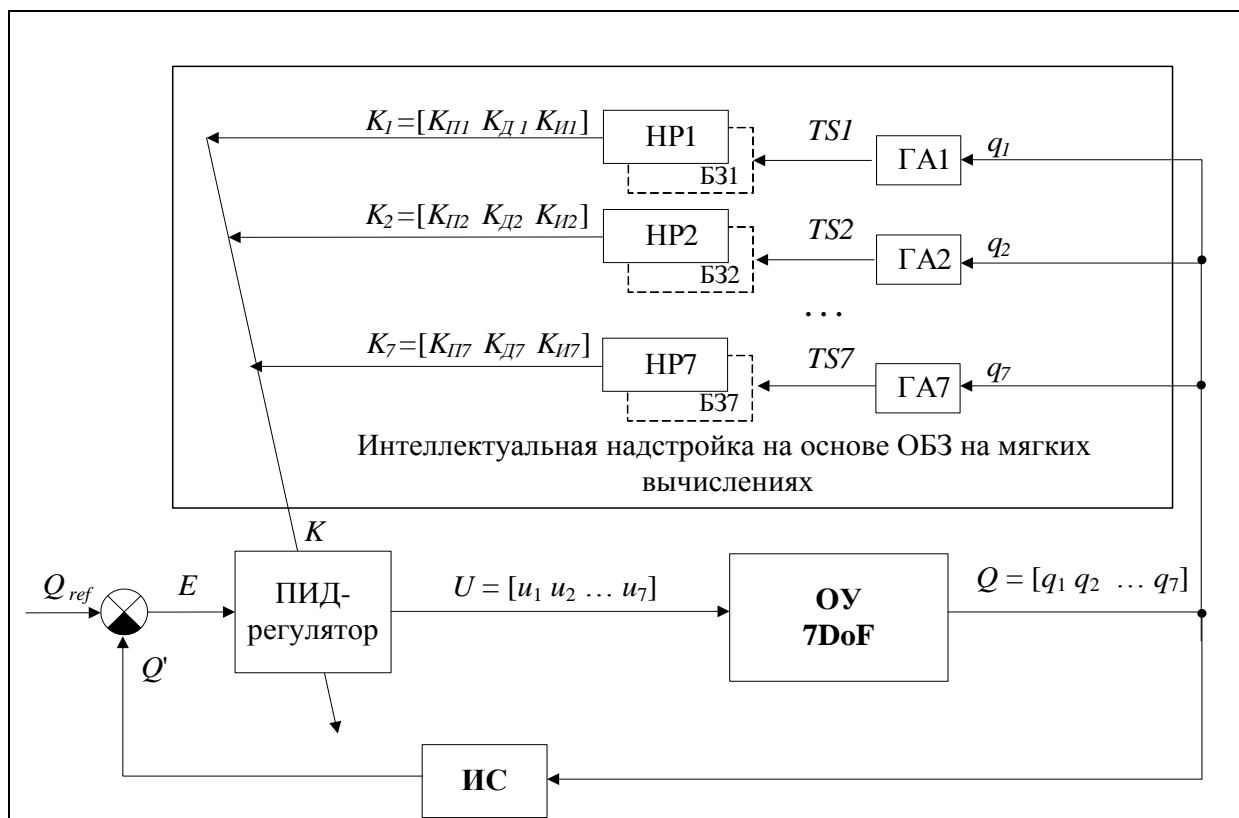


Рис. 3. ИСУ с разделенным управлением на ОБЗ на мягких вычислениях для управления манипулятором с семью степенями свободы

На рис. 3: K – матрица пропорциональных, дифференциальных и интегральных коэффициентов ПИД-регулятора $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,7}$, где i – номер соответствующего звена робота манипулятора, TS_i – обучающий сигнал, GA_i – генетический алгоритм, формирующий обучающий сигнал для формирования i -ой БЗ.

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).

Рассмотрим работу в условиях внешних непредвиденных ситуаций.

Спроектированная ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, представленная на рис. 3, 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 (Б31) для звена 1, НР2 – о штатной ситуации 1 для звена 2 (Б32) 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 нестандартных ситуациях могут быть не робастными.

Схема подключения блока КНВ в интеллектуальную надстройку системы управления представлена на рис. 4, на котором выделены блоки, спроектированные с использованием технологий мягких и квантовых вычислений.

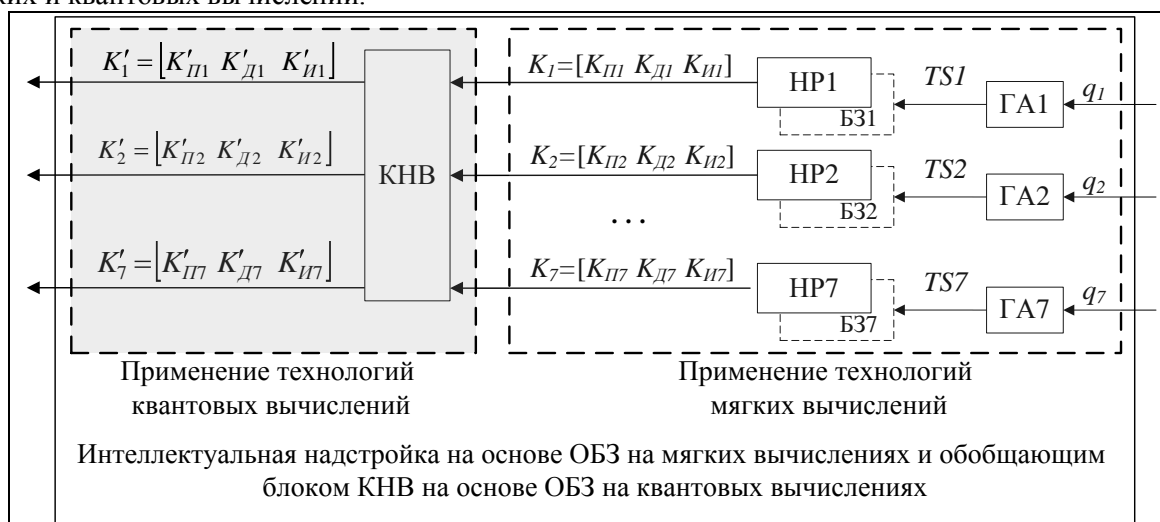


Рис. 4. Интеллектуальная надстройка структуры ИСУ на основе ОБЗ на квантовых и мягких вычислениях

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

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

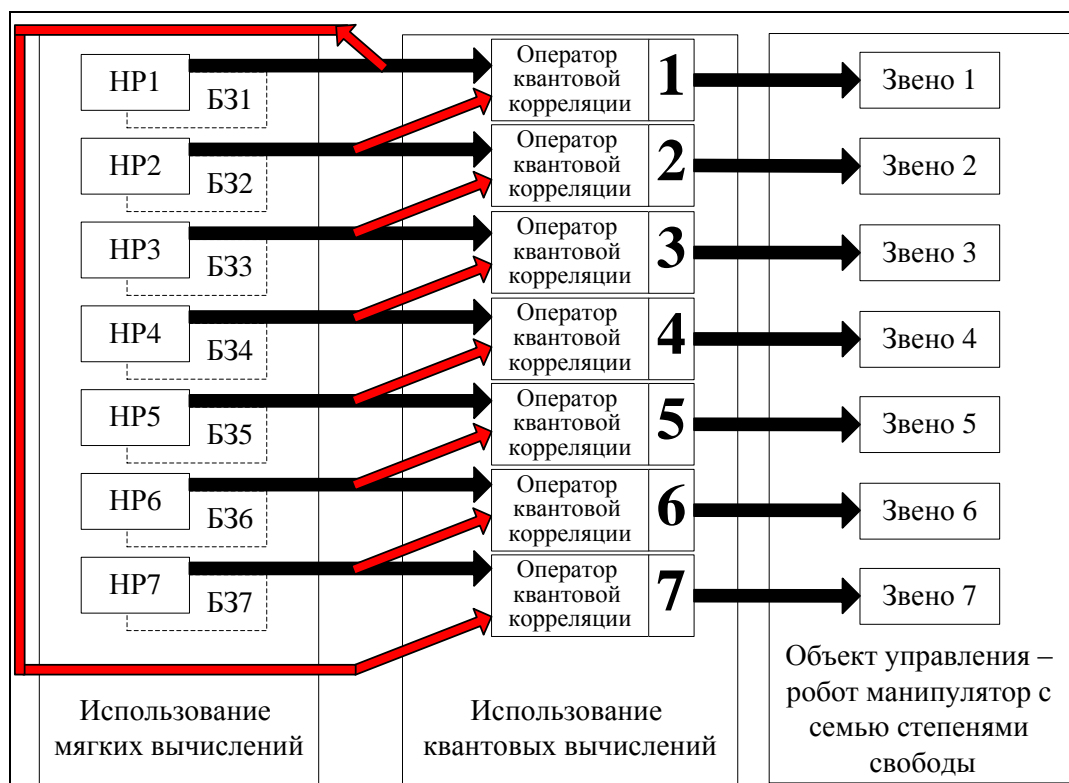


Рис. 5. Применение корреляции двух соседних НР

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

Методика проведения испытаний и критерии качества для оценки работы исследуемых систем управления приведены соответственно в Приложении А и Б.

На рис. 6-11 приведено сравнение работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях для пространственной, пространственно-временной и временной корреляций соответственно для шести комбинаций коррелируемых НР (два соседних НР, три соседних НР и т.д.).

Из результатов сравнения видно, что:

- для ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с корреляцией двух соседних НР лучшей является пространственная корреляция (рис. 6);
- для ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с корреляцией трех соседних НР лучшей является пространственно-временная корреляция (рис. 7);
- для ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с корреляцией четырех соседних НР лучшей является пространственная корреляция (рис. 8);
- для ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с корреляцией пяти соседних НР лучшей является пространственная корреляция (рис. 9);
- для ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с корреляцией шести соседних НР лучшей является пространственная корреляция (рис. 10);
- для ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с корреляцией семи НР лучшей является пространственная корреляция (рис. 11).

Сравним работу ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях при использовании отмеченных корреляций с работой ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (Таблица 1).

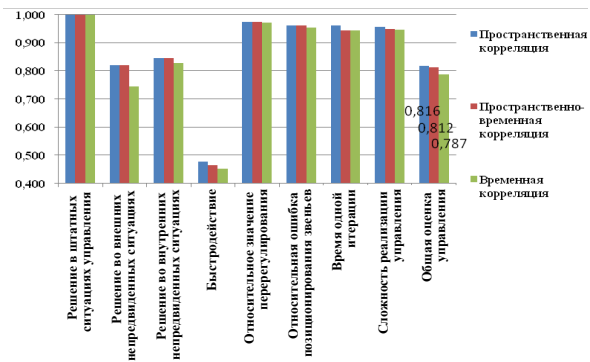


Рис. 6. Результат работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением корреляции двух соседних HP

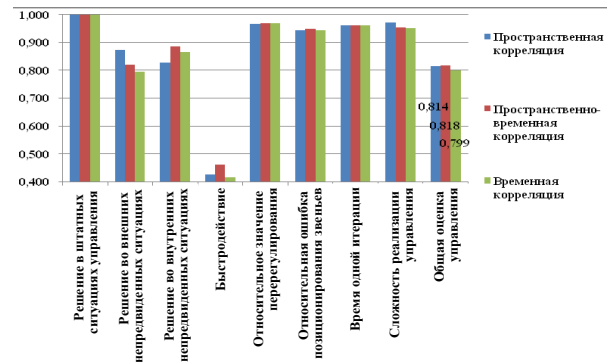


Рис. 7. Результат работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением корреляции трех соседних HP

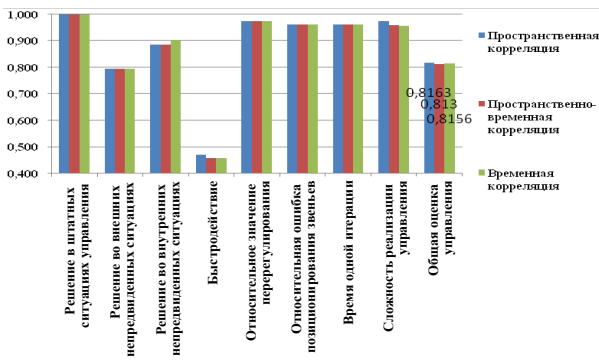


Рис. 8. Результат работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением корреляции четырех соседних HP

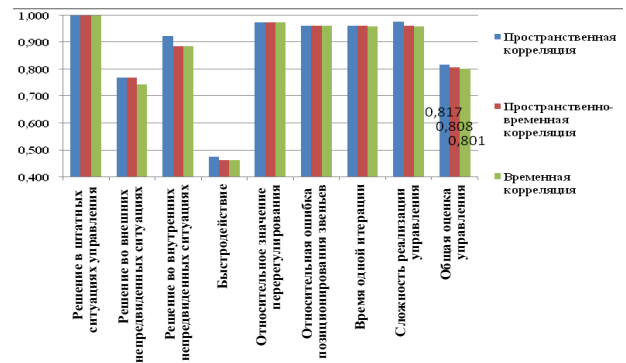


Рис. 9. Результат работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением корреляции пяти соседних HP

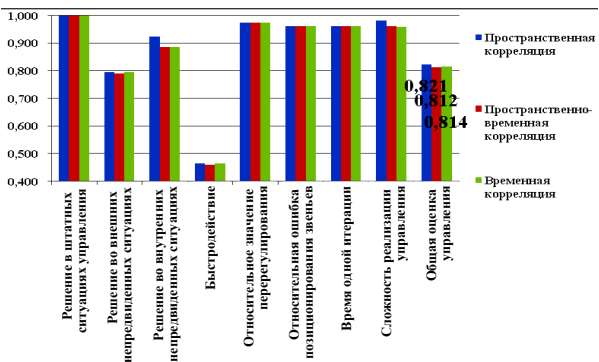


Рис. 10. Результат работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением корреляции шести соседних HP

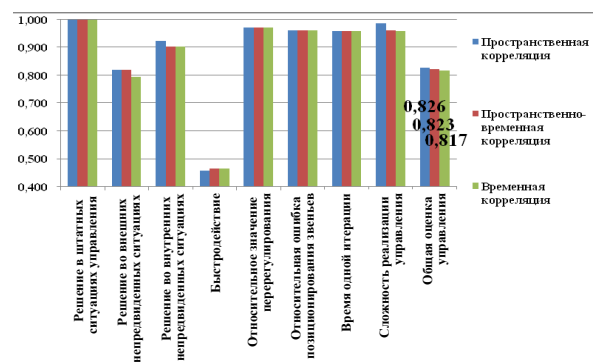


Рис. 11. Результат работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением корреляции семи HP

Таблица 1. Сравнение работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с работой ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

| | | ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях | ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях | | | | | |
|---|--|----------------------------------|---|--|--|---|--|--|
| | | | Использование корреляции двух соседних НР: пространственная | Использование корреляции трех соседних НР: пространственно-временная | Использование корреляции четырех соседних НР: пространственная | Использование корреляции пяти соседних НР: пространственная | Использование корреляции шести соседних НР: пространственная | Использование корреляции семи НР: пространственная |
| 1 | Штатные ситуации решение | 0,923 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 2 | Внешние непредвиденные ситуации решение | 0,744 | 0,821 | 0,821 | 0,795 | 0,769 | 0,795 | 0,821 |
| 3 | Внутренние непредвиденные ситуации решение | 0,923 | 0,846 | 0,885 | 0,885 | 0,923 | 0,923 | 0,923 |
| 4 | Быстродействие | 0,092 | 0,477 | 0,461 | 0,472 | 0,476 | 0,465 | 0,459 |
| 5 | Перерегулирование | 0,969 | 0,973 | 0,968 | 0,974 | 0,974 | 0,974 | 0,971 |
| 6 | Устойчивость | 0,911 | 0,962 | 0,947 | 0,962 | 0,962 | 0,962 | 0,960 |
| 7 | Время одной итерации | 0,973 | 0,961 | 0,962 | 0,961 | 0,961 | 0,961 | 0,960 |
| 8 | Сложность реализации управления | 0,946 | 0,957 | 0,953 | 0,973 | 0,977 | 0,982 | 0,986 |
| 9 | Общее управление | 0,721 | 0,816 | 0,818 | 0,8163 | 0,817 | 0,821 | 0,826 |

Из Таблицы 1 видно, что:

- 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 пространственной 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 НР (на рис. 12 – сравнение с ИСУ на мягких вычислениях).

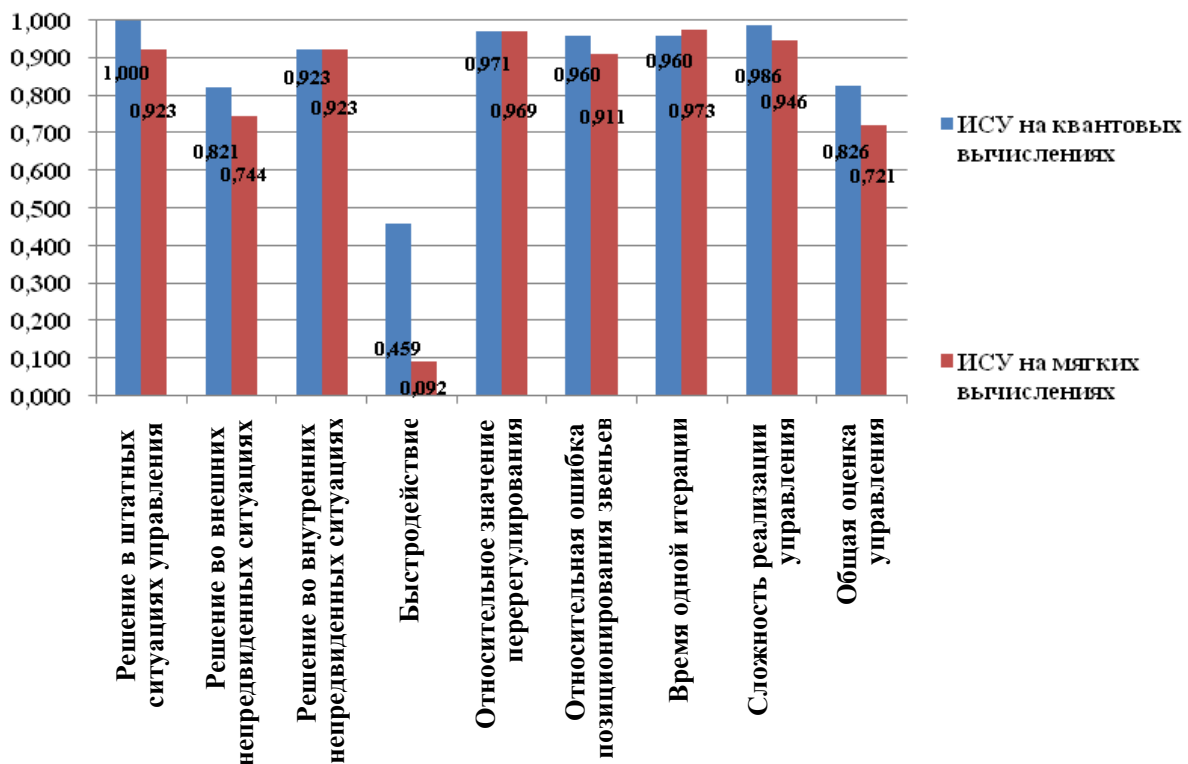


Рис. 12. Сравнение ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции всех семи НР

На рис. 13 и 14 продемонстрирована работа манипулятора при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях в условиях соответственно штатной ситуации управления и второй внешней непредвиденной ситуации управления (изменено начальное положение).

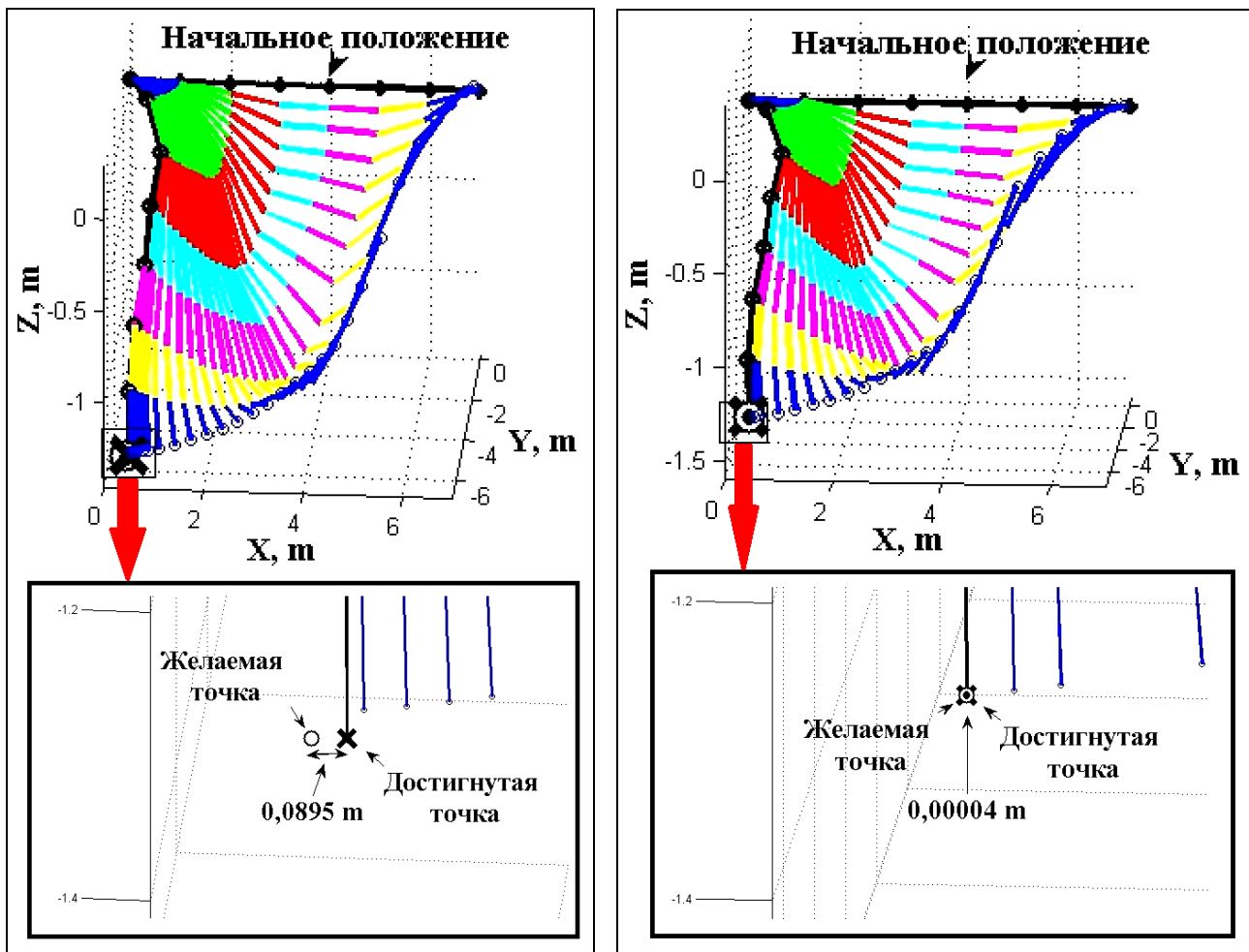


Рис. 13. Движение робота манипулятора в условиях штатной ситуации управления: под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (слева); ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях (справа)

Как видно из рис. 13 и 14, 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. На рис. 15 и 16 приведено сравнение фазовых портретов ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях для рассмотренных соответственно штатной ситуации управления и внешней непредвиденной ситуации.

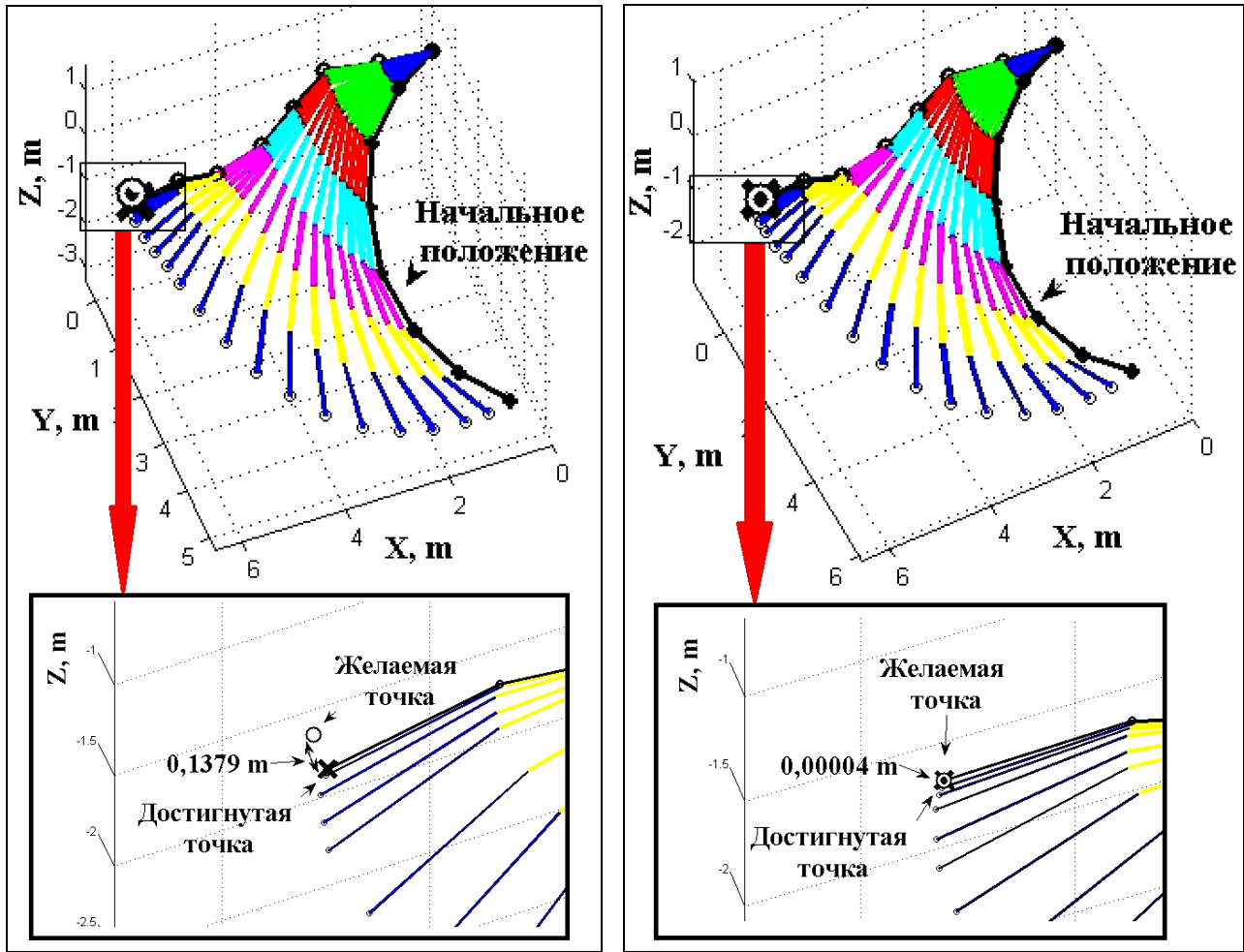


Рис. 14. Движение манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации: под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (слева); ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях (справа)

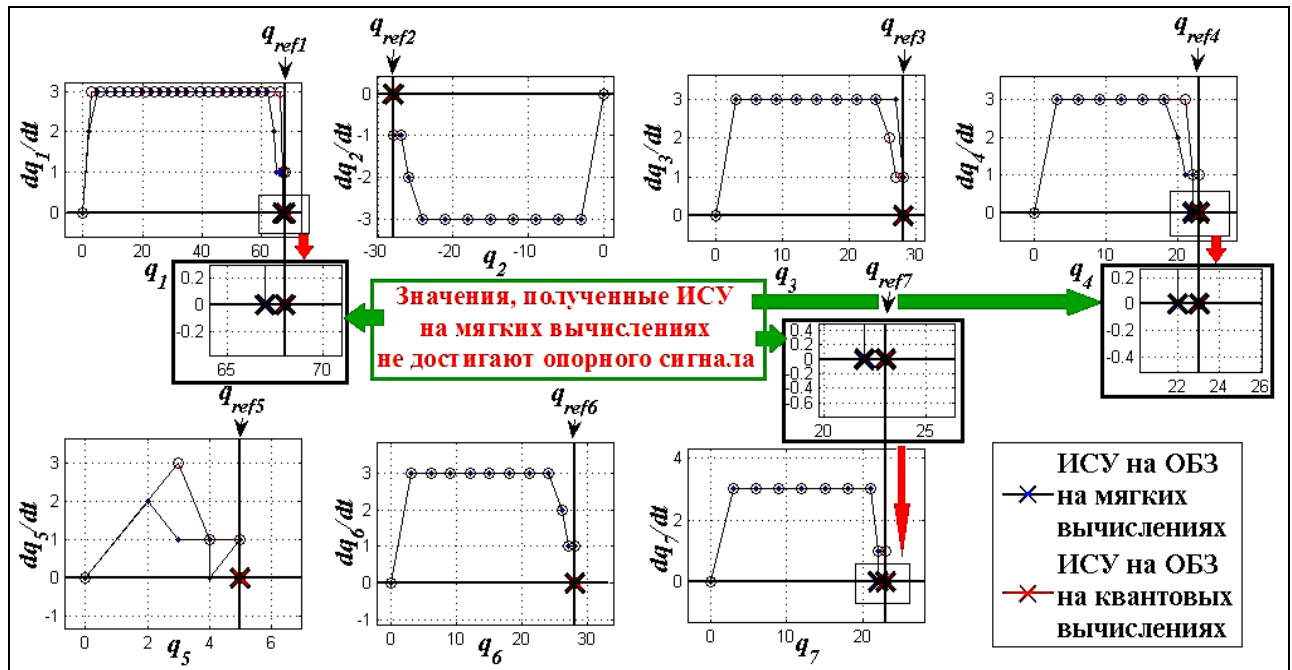


Рис. 15. Изменение положений звеньев манипулятора в условиях штатной ситуации управления: сравнение работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях

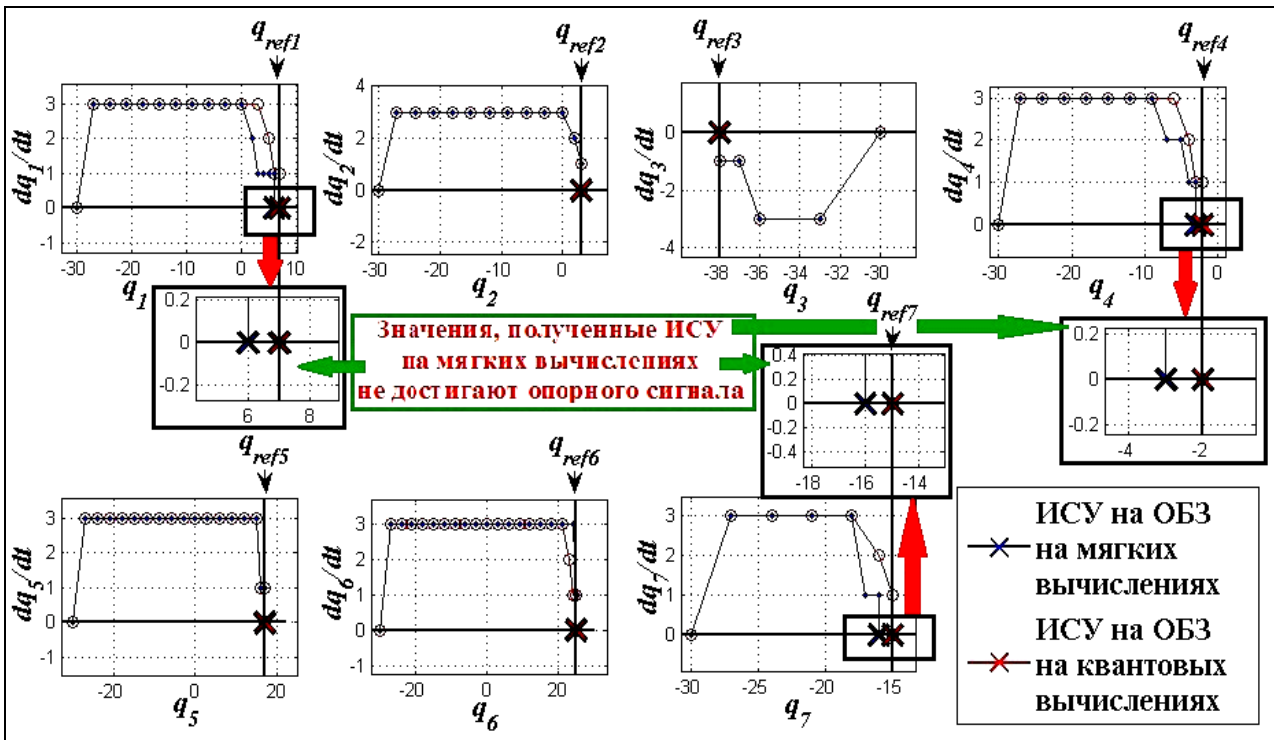


Рис. 16. Изменение положений звеньев манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации управления: сравнение работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях

Заключение

В данной работе был рассмотрен метод организации координационного управления роботом манипулятором с семью степенями свободы с использованием технологий квантовых вычислений.

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 (в 5 раз) улучшить показатель быстродействия;
- уменьшить относительную ошибку позиционирования звеньев.

Приложение А

Порядок проведения испытаний

Серия экспериментов состоит 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. А1). 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).

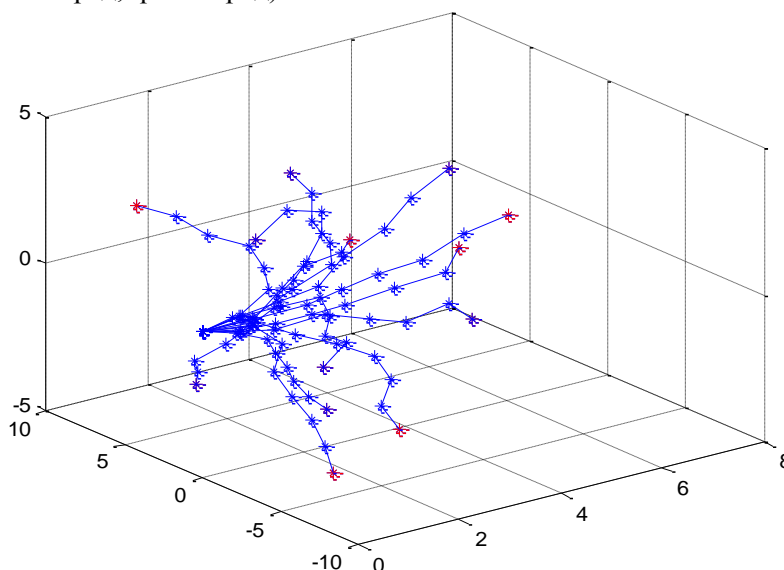


Рис. А1. Тестовое рабочее пространство

Нештатные ситуации разделяются на внешние и внутренние.

Внешние непредвиденные ситуации:

1. принудительное изменение положений звеньев (рис. А2):
 - 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.

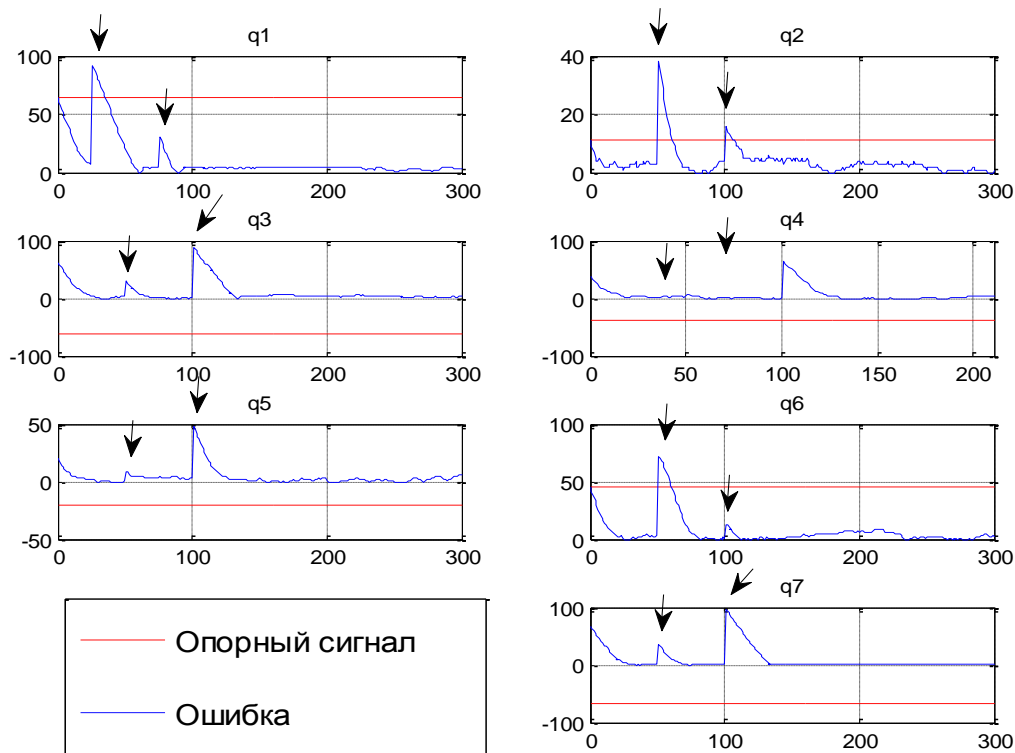


Рис. А2. Принудительное изменение положений звеньев

2. изменены начальные условия – $q1 = -30$ град; $q2 = -30$ град; $q3 = -30$ град; $q4 = -30$ град; $q5 = -30$ град; $q6 = -30$ град; $q7 = -30$ 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. А3);
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.

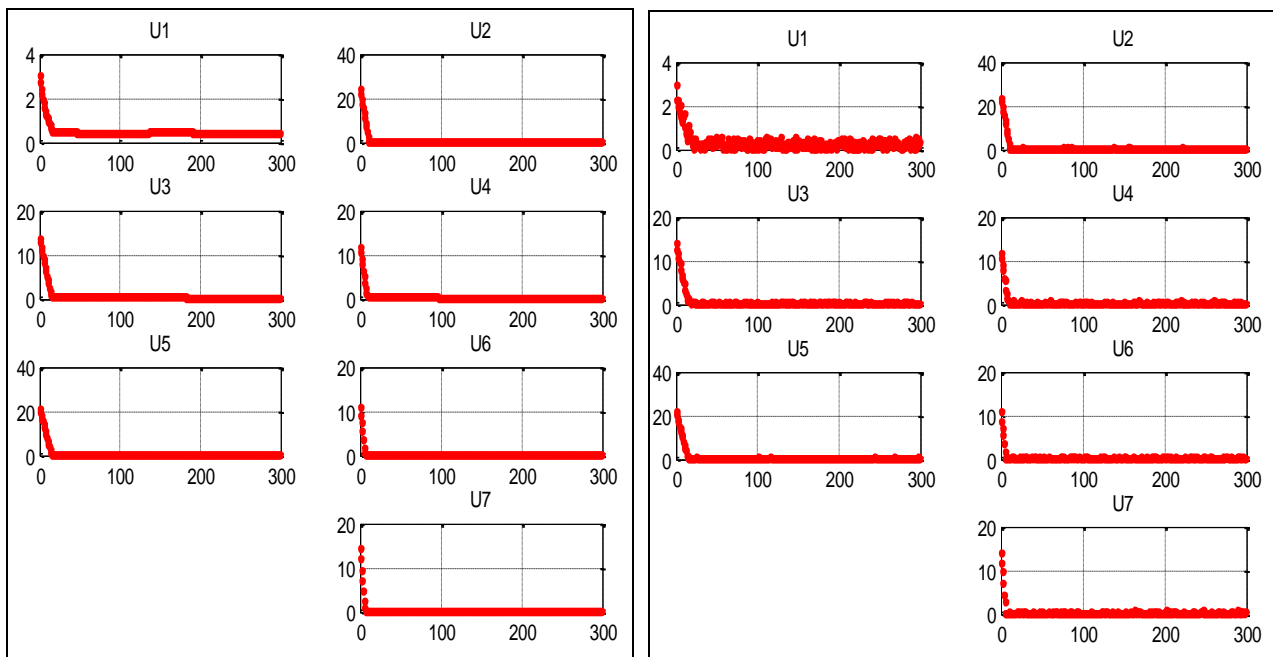


Рис. А3. Управляющие воздействия: исходные (слева); после внесения шумов (справа)

Приложение Б

Определение критериев качества

Для оценки и сравнения результатов испытаний введена система критериев качества.

1. Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления PTSKCS (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.

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

где N – число экспериментов.

2. Решение задачи позиционирования во внешних непредвиденных ситуациях управления PTSACCS1 (Position Task Solution in the above considered control situations).
3. Решение задачи позиционирования во внутренних непредвиденных ситуациях управления PTSACCS2.
4. Быстродействие ИТ.

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 e .

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

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

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).

$$FCB \equiv w_1 \cdot P \left[\text{TS}_{KCS} \right] + w_2 \cdot P \left[\text{TS}_{ACCS1} \right] + w_3 \cdot P \left[\text{TS}_{ACCS2} \right] + w_4 \cdot P \left[T \right] + w_5 \cdot P \left[\right] + w_6 \cdot P \left[\right] + w_7 \cdot P \left[\right] + w_8 \cdot P,$$

где w_i – весовые коэффициенты, значение которого определено в Таблице Б1.

Таблица Б1. 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 | y | w_5 | 0,05 |
| Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершении заданного числа итераций | e | w_6 | 0,1 |
| Время одной итерации | t | w_7 | 0,1 |
| Сложность реализации управления | P | w_8 | 0,05 |

Список литературы

1. Литвинцева Л.В., Ульянов С.И., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Квантовый нечеткий вывод для создания баз знаний в робастных интеллектуальных регуляторах // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – №6. – С. 71-126.
2. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Интеллектуальные системы управления. 1.Квантовые вычисления и алгоритм самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – №6. – С. 102-141.
3. Nielsen M.A., Chang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge Univ. Press. – UK, 2000.
4. Ульянов С.В., Сорокин С.В., Литвинцева Л.В. Оптимизатор баз знаний на основе квантовых вычислений для проектирования самоорганизующихся нечетких регуляторов: программный инструментарий // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2012. – № 1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/23>. – 0421200111\0006.
5. Николаева А. В., Ульянов С. В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом манипулятором. Ч. 3: Моделирование и физический эксперимент на основе технологии квантовых вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2013. – № 1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/27>.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011616869. Квантовый оптимизатор робастных баз знаний для проектирования интеллектуальных систем управления: заявка №2011614985 от 5.07.2011 РФ / С. В. Ульянов, Л. В. Литвинцева, А. А. Мишин, С. В. Сорокин (РФ) – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 5.09.2011 г. (РФ).