

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ МАНИПУЛЯТОРОМ.

Ч.3: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ КВАНТОВЫХ 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.

В статье рассматривается стратегия самоорганизации баз знаний нечетких одноптипных регуляторов с применением технологий квантовых вычислений. На примере реального объекта управления – Модуля Манипулятора с тремя степенями свободы демонстрируется эффективность предложенной методологии для работы как в штатных, так и непредвиденных ситуациях управления.

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

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM DESIGN OF A ROBOTIC MANIPULATOR. PT.3: MODELLING AND PHYSICAL EXPERIMENT BASED ON QUANTUM 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 self-organization knowledge base strategy of one type fuzzy controllers using quantum computing technologies is considered. Efficiency of proposed method by work both in known and unpredicted control situations for practical control object – 3 DoF (degrees of freedom) manipulator is demonstrated.

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

Введение

В первой части статьи [1] были рассмотрены интеллектуальные системы управления (ИСУ) на основе генетического алгоритма (ГА) с применением технологий мягких вычислений. На примере моделей систем управления роботом манипулятором была показана необходимость увеличения

степени интеллектуальности при последовательном приближении идеализированных систем управления к реальным.

Во второй части статьи¹ аналогичные исследования были приведены в применении к реальному объекту управления (ОУ) (в рамках исследований разработан макет – Модуль Манипулятора с тремя степенями свободы). С учетом новых требований к физическому эксперименту, была введена система критериев качества для задач точного позиционного управления роботом манипулятором. Обоснована необходимость введения средств уменьшения сложности базы знаний (БЗ). Предложен метод декомпозиции управления ИСУ, спроектированного на основе мягких вычислений, способный уменьшить сложность БЗ за счет частичного снижения качества управления.

В качестве дальнейших исследований, направленных на устранение указанного недостатка, в настоящей статье предложен метод организации координационного управления с применением технологий квантовых вычислений.

1. Технологии квантовых вычислений

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.

Возникновение «парадоксов» интеллектуальных квантовых вычислений [2] приводят к трудностям физической интерпретации процессов измерения и управления с позиции логики классической физики и управления.

Кроме того, возникает вопрос о возможности реализации квантовых алгоритмов. Обобщенный тезис Черча-Тьюринга утверждает, что для решения квантовых проблем классического компьютера (архитектура фон Неймана) недостаточно, и необходим квантовый компьютер параллельных вычислений. Р.Фейнман показал, что при решении квантовых задач на классическом компьютере сложность возрастает экспоненциально в зависимости от числа входных переменных.

Однако разработанный в [3] подход позволяет ускорить моделирование исходных квантовых алгоритмов на классическом компьютере, а в [4] приведен ряд примеров моделирования (алгоритм Дейча, Шора, Гровера и др.).

Технологии квантовых вычислений для создания баз знаний (БЗ) интеллектуальных регуляторов, рассматриваются в [5, 6]. В [5] рассматривается новый вид квантового поискового алгоритма на обобщенном пространстве БЗ нечетких регулятором (НР), спроектированных на основе технологий мягких вычислений – квантовый нечеткий вывод (КНВ) для проектирования обобщенного робастного сигнала управления. Модель КНВ основывается на физических законах теории квантовых вычислений [7-10] и использовании четырех операторов: суперпозиции, квантовой корреляции, интерференции и измерения. Первые три являются унитарными, обратимыми квантовыми операторами, а четвертый (оператор измерения) – классическим (необратимым).

Рассмотрим механизмы подключения КНВ к системе НР для проектирования обобщенных сигналов управления.

¹Николаева Н.В., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом манипулятором Ч.2: Декомпозиция управления и физический эксперимент на основе технологии мягких вычислений (настоящий номер журнала)

2. Организация координационного управления

В [9] приведена методология выбора обобщённой стратегии для переключения потока управляющих сигналов, поступающих с выхода различных БЗ НР, сконструированных для разных ситуаций управления.

Данная методология иллюстрируется рис. 1: сконструированные на первом этапе НР для разных ситуаций управления, на втором этапе обобщаются методологией КНВ – в результате «обобщенная» БЗ гарантирует управление во всех рассмотренных ситуациях управления.

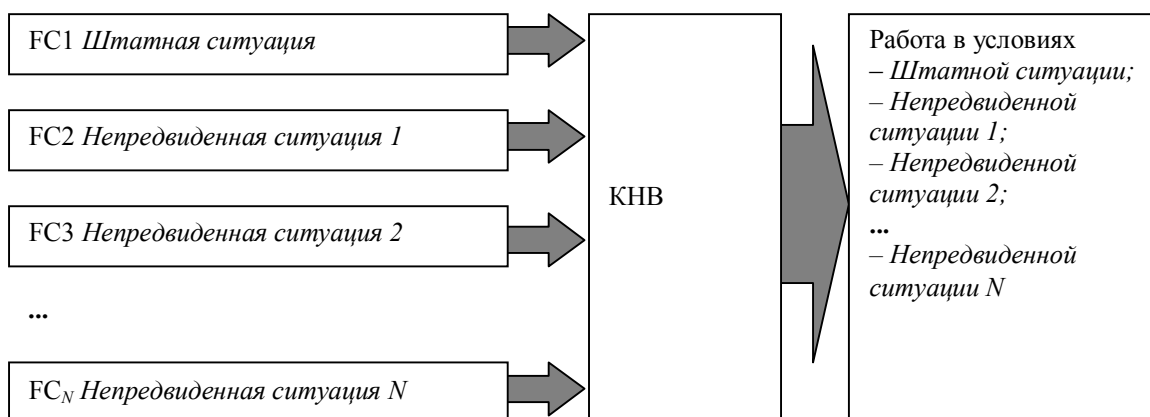


Рис. 1. Методология выбора обобщённой стратегии для переключения потока управляющих сигналов, поступающих с выхода различных БЗ НР, сконструированных для разных ситуаций управления

Для организации координационного управления в ИСУ на основе мягких вычислений с разделенным управлением, рассмотренной во второй части статьи (см. настоящий номер журнала), используем следующую методологию: извлечение скрытой информации о взаимосвязях существующих НР для трех звеньев манипулятора с БЗ, полученными для штатных ситуаций управления (рис. 2).

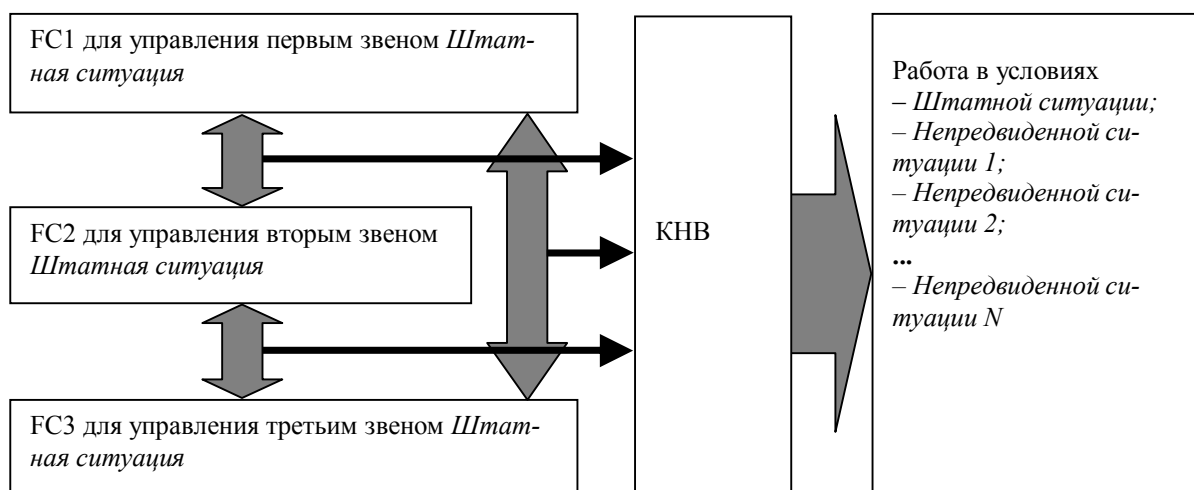


Рис. 2. Методология извлечение скрытой информации взаимосвязей БЗ НР, сконструированных для штатных ситуаций управления

Рассмотрим механизм проектирования КНВ с помощью интеллектуального инструментария Оптимизатора Баз Знаний (ОБЗ) на основе квантовых вычислений.

3. Проектирование КНВ

Для рассматриваемого примера – организации координационного управления роботом манипулятором с тремя степенями свободы – входными значениями КНВ являются коэффициенты ПИД-регулятора K_P^i, K_D^i, K_I^i , где $i = \overline{1,3}$ – номер НР, спроектированного с использованием технологий мягких вычислений.

Алгоритм КНВ [5] представлен на рис. 3

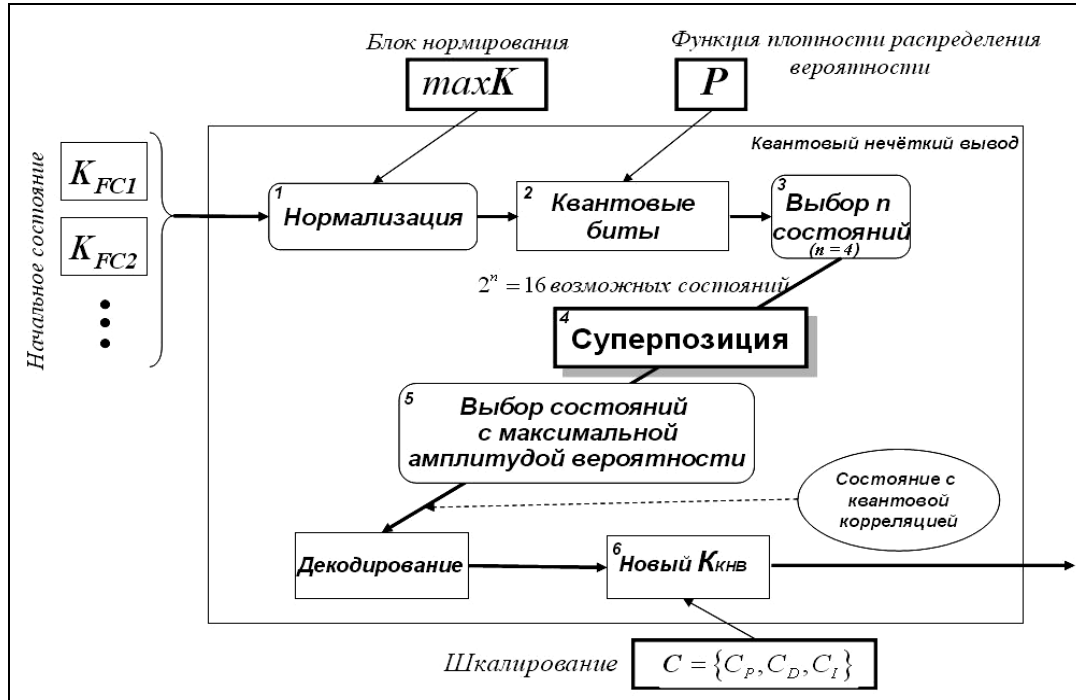


Рис. 3. Алгоритм КНВ

Алгоритм КНВ выполняет следующую последовательность шагов (подробное описание в [9]):

Шаг 1. Кодирование.

На этапе кодирования строятся все нормализованные состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$ для текущих входных переменных. Далее происходит вычисление амплитуд вероятностей $|0\rangle$ и $|1\rangle$ из соответствующих гистограмм.

Шаг 2. Выбор типа квантовой корреляции для построения выходных сигналов управления.

В рамках данной работы рассматриваются три типа корреляций (все три типа смешанные – см. [5]):

Пространственная. Зависимость выходных сигналов $K_P^{i-new}(t), K_D^{i-new}(t), K_I^{i-new}(t)$ определяется корреляцией следующих наборов входных коэффициентов:

$$\begin{aligned} \{K_P^1(t), K_P^2(t), K_P^3(t), K_D^1(t), K_D^2(t), K_D^3(t)\} &\rightarrow K_P^{new}(t) \\ \{K_D^1(t), K_D^2(t), K_D^3(t), K_I^1(t), K_I^2(t), K_I^3(t)\} &\rightarrow K_D^{new}(t), \\ \{K_I^1(t), K_I^2(t), K_I^3(t), K_P^1(t), K_P^2(t), K_P^3(t)\} &\rightarrow K_I^{new}(t) \end{aligned}$$

где каждый набор является запутанным состоянием:

$$|a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6\rangle = |K_P^1(t), K_P^2(t), K_P^3(t), K_D^1(t), K_D^2(t), K_D^3(t)\rangle.$$

Пространственно-временная.

$$\{K_p^1(t), K_D^1(t - \Delta t), K_p^2(t), K_D^2(t - \Delta t), K_p^3(t), K_D^3(t - \Delta t)\} \rightarrow K_p^{new}(t)$$

$$\{K_D^1(t), K_I^1(t - \Delta t), K_D^2(t), K_I^2(t - \Delta t), K_D^3(t), K_I^3(t - \Delta t)\} \rightarrow K_D^{new}(t)$$

$$\{K_I^1(t), K_p^1(t - \Delta t), K_I^2(t), K_p^2(t - \Delta t), K_I^3(t), K_p^3(t - \Delta t)\} \rightarrow K_I^{new}(t)$$

Временная:

$$\{K_p^1(t), K_p^2(t), K_p^3(t), K_p^1(t - \Delta t), K_p^2(t - \Delta t), K_p^3(t - \Delta t)\} \rightarrow K_p^{new}(t)$$

$$\{K_D^1(t), K_D^2(t), K_D^3(t), K_D^1(t - \Delta t), K_D^2(t - \Delta t), K_D^3(t - \Delta t)\} \rightarrow K_D^{new}(t)$$

$$\{K_I^1(t), K_I^2(t), K_I^3(t), K_I^1(t - \Delta t), K_I^2(t - \Delta t), K_I^3(t - \Delta t)\} \rightarrow K_I^{new}(t)$$

Шаг 3. Построение суперпозиции запутанных состояний.

Шаг 4. Измерение интеллектуального квантового состояния.

Выбор состояния с максимальной амплитудой вероятности.

Шаг 5. Декодирование

Вычисление выходного значения соответствующего коэффициента.

Шаг 6. Денормализация

Вычисление денормализованного выходного значения соответствующего коэффициента.

В результате включения в ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением сконструированного блока КНВ, получим новый тип системы управления – ИСУ на ОБЗ на основе квантовых вычислений (рис. 4).

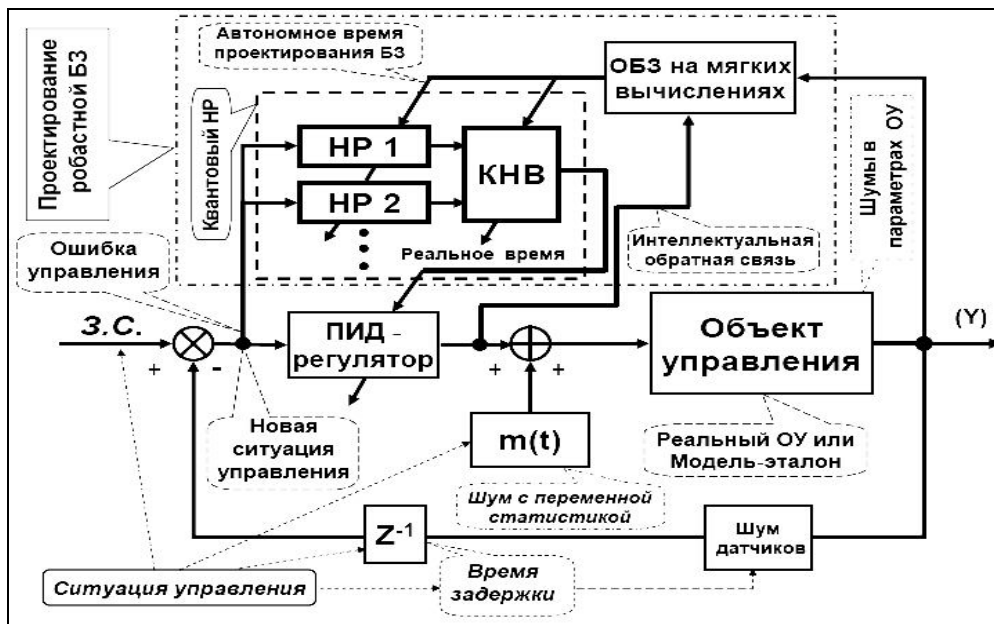


Рис. 4. ИСУ на ОБЗ на основе квантовых вычислений

Структура ИСУ, представленная на рис. 4, содержит новый физический эффект – самоорганизацию БЗ нечеткого регулятора НР (реализация в блоке «квантовый регулятор») в реальном времени.

Сравним результаты моделирования работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением. Также рассмотрим результаты физического эксперимента.

Оценка работы систем управления производится по серии экспериментов (Приложение А) с использованием введенной системы критериев качества (Приложение В).

Результаты проведения серии экспериментов, для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной, пространственно-временной и

временной корреляций, приведены соответственно в Таблицах 1 и 2 для *MatLab/Simulink* моделей и для Модуля Манипулятора, а также на рис. 5 и 6 соответственно для *MatLab/Simulink* моделей и для Модуля Манипулятора.

Таблица 1. Сравнение критериев качества для *MatLab/Simulink* моделей

	Вид решения	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственно-временной корреляции	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием временной корреляции
1	Решение в штатных ситуациях	1	1	1	1
2	Решение в непредвиденных ситуациях	0,833333	1	1	1
3	Быстродействие	0,516917	0,807667	0,8135	0,746833
4	Относительное значение перерегулирования	0,996353	1	1	0,999155
5	Относительная ошибка позиционирования	0,888263	0,99815	0,99815	0,996413
6	Время одной итерации	0,96783	0,922353	0,923098	0,93069
7	Сложность реализации управления	0,948788	0,98847	0,985205	0,986955
8	Общая оценка управления	0,819583	0,953007	0,954085	0,941382

Таблица 2. Сравнение критериев качества для Модуля Манипулятора

	Вид решения	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственно-временной корреляции	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием временной корреляции
1	Решение в штатных ситуациях	1	1	1	1
2	Решение в непредвиденных ситуациях	0,9	1	1	1
3	Быстродействие	0,569167	0,779917	0,602167	0,716833
4	Относительное значение перерегулирования	0,9955	0,998225	0,998075	0,997425
5	Относительная ошибка позиционирования	0,989375	0,998225	0,99475	0,996533
6	Время одной итерации	0,75755	0,72541	0,748325	0,73105
7	Сложность реализации управления	0,935675	0,97315	0,976525	0,998
8	Общая оценка управления	0,845085	0,926916	0,893471	0,915896

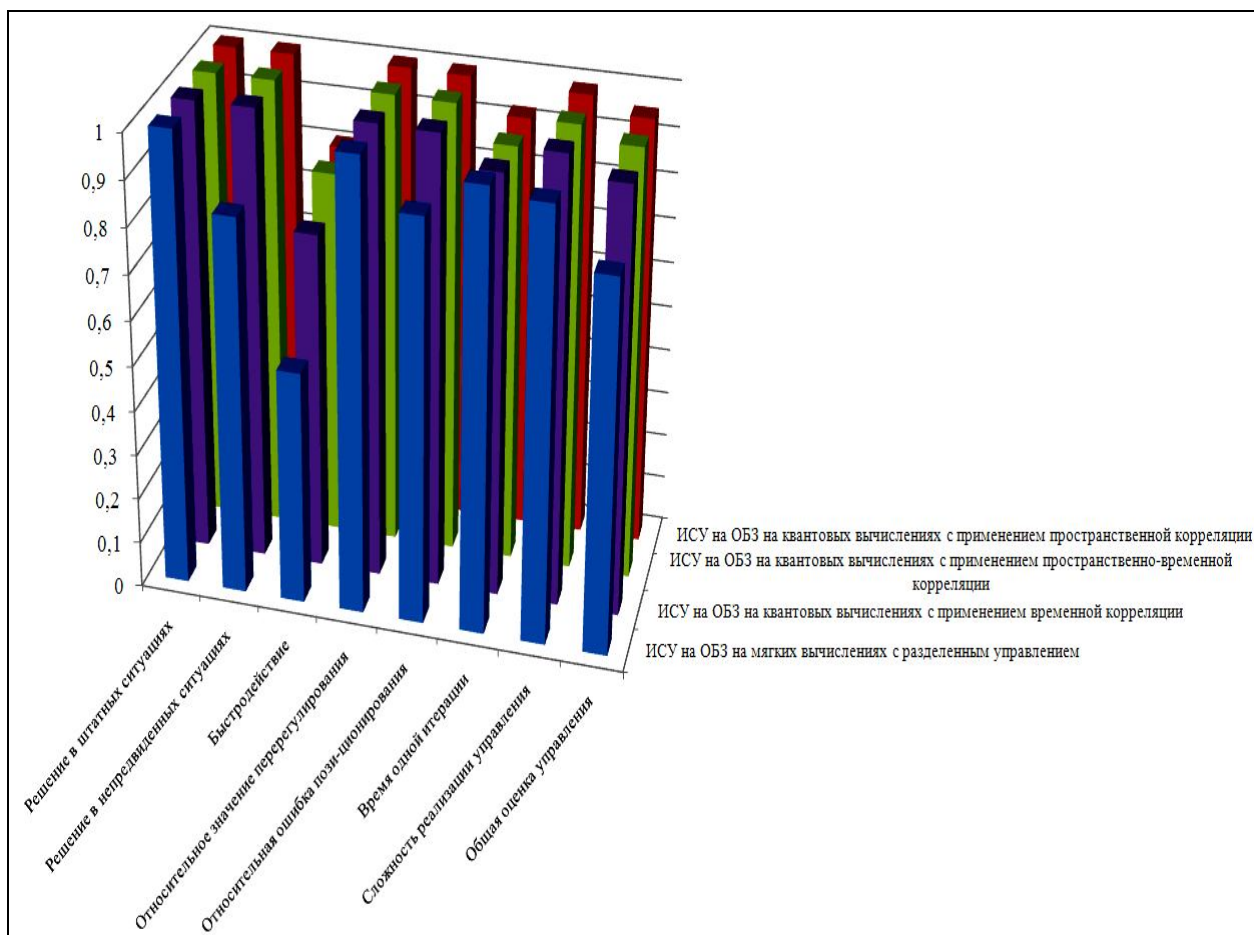


Рис. 5. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной, пространственно-временной и временной корреляций при тестировании MatLab/Simulink моделей

Из Таблиц 1 и 2, а также из рис. 5 и 6 видно, что при включении в структуру ИСУ с разделенным управлением блока КНВ, критерий «Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления» достигает максимального значения, улучшается показатель критерия «Сложность реализации управления» при использовании любого из трех рассмотренных типов корреляций как для MatLab/Simulink моделей, так и для Модуля Манипулятора.

В связи с появлением в системе управления дополнительного звена КНВ, в ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, ухудшается критерий «Время одной итерации».

Значительно улучшаются показатели критерия «Быстродействие».

В целом, «Общая оценка управления» улучшается во всех случаях при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по сравнению с использованием ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением.

Причем если для MatLab/Simulink моделей наилучший показатель обеспечивается при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственно-временной корреляции, то физическое тестирование Модуля Манипулятора определяет оптимальным выбор пространственной корреляции.

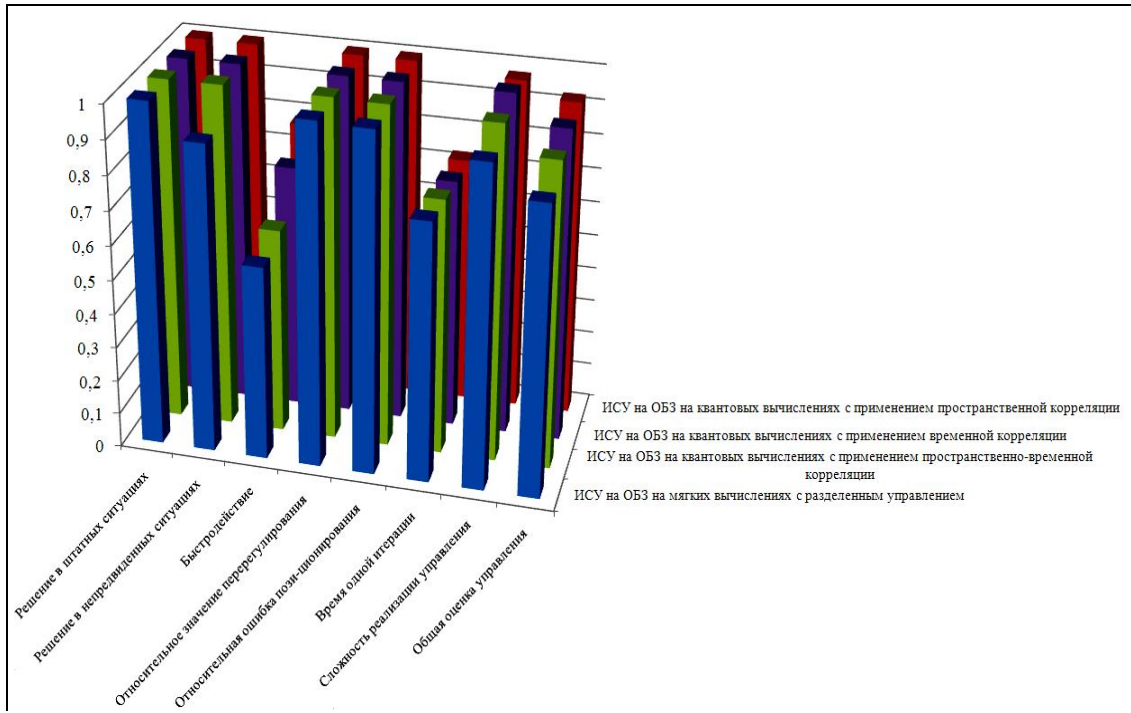


Рис. 6. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной, пространственно-временной и временной корреляции. при физическом тестировании Модуля Манипулятора

Для наглядности, рассмотрим результаты сравнения работы *MatLab/Simulink* моделей в условиях непредвиденной ситуации управления 9, в качестве которой выступает эксперимент на девятой тестовой точке первого случая непредвиденной ситуации (Приложение А): на 11-ой итерации положение второго звена принудительно изменяется (рис. 7 – изменение положения второго звена манипулятора под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением).



Рис. 7. Моделирование внешнего воздействия на второе звено манипулятора

Построим траектории движения манипулятора с тремя степенями свободы под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции в условиях обозначенной непредвиденной ситуации (соответственно рис. 8 и 9).

Из рис. 8 и 9 видно, что в отличие от ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях справляется с задачей позиционирования с заданной точностью в рассмотренной непредвиденной ситуации управления.

Неспособность ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях решить задачу точного позиционного управления иллюстрируется также на рис. 7 – НР, отвечающий за управления вторым звеном за отведенное время работы так и не смог «реабилитироваться» после мощного внешнего воздействия, в результате ошибка позиционирования второго звена составила более 50 град.

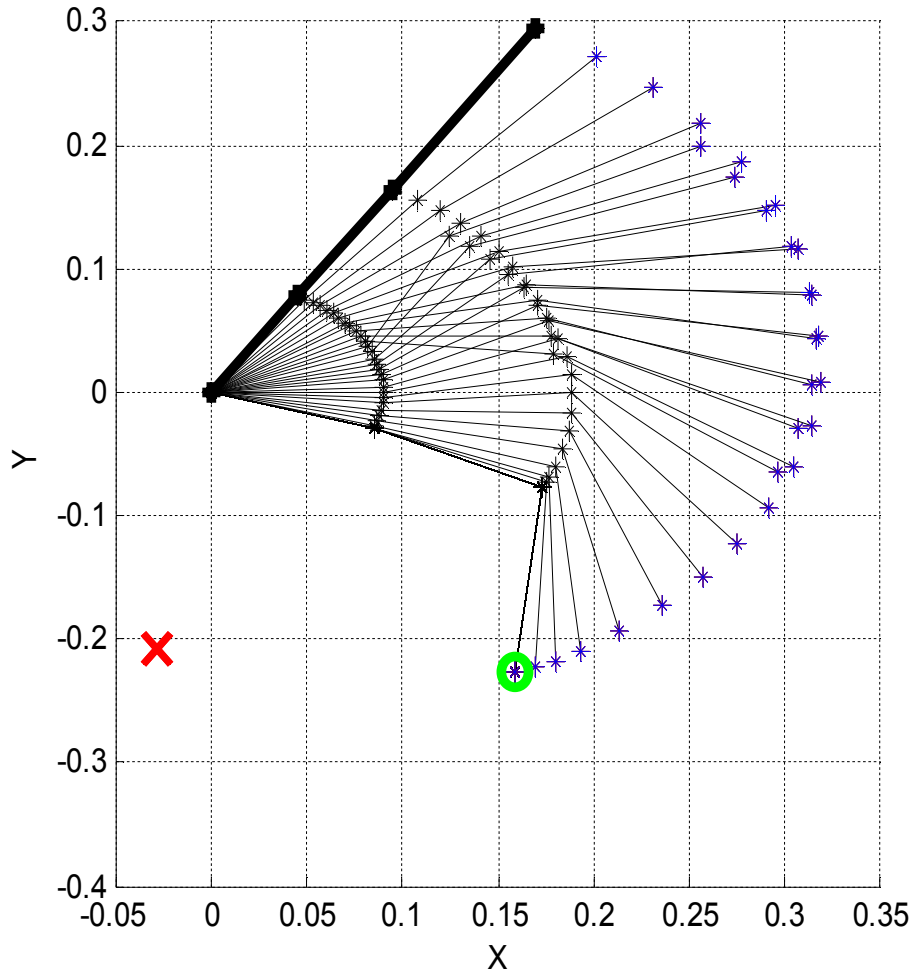


Рис. 8. Поведение манипулятора с тремя степенями свободы под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением в непредвиденной ситуации 9

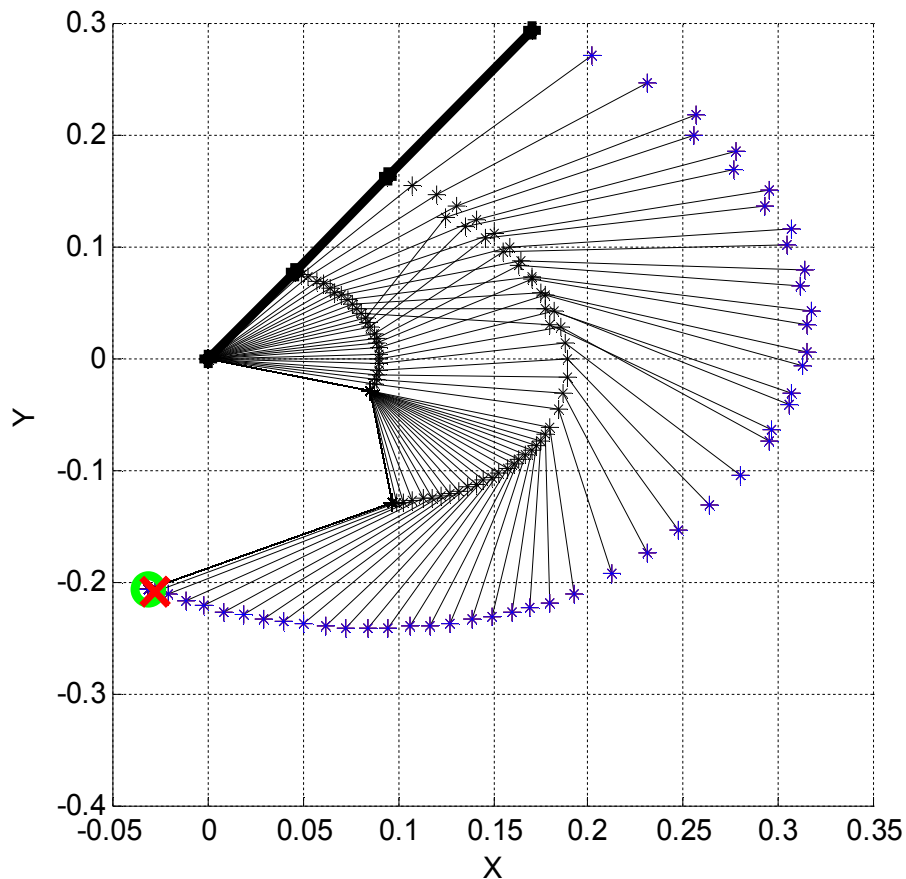


Рис. 9. Поведение манипулятора с тремя степенями свободы под управлением ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции в непредвиденной ситуации 9

На рис. 10 приведена динамика изменения коэффициентов ПИД-регулятора на входе и выходе КНВ (соответственно левый и правый столбцы) для рассматриваемой нештатной ситуации.

На рис. 11 представлено сравнение законов управления для трех звеньев манипулятора: сгенерированных с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (жирные линии) и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях (тонкие линии).

Из рис. 11 видно, что включение в ИСУ блока КНВ дает возможность получать адекватные к возмущениям сигналы управления с меньшим перерегулированием, чем на выходе НР.

Рассмотренные ранее случаи непредвиденных ситуаций управления (Приложение А) – изменение начальных условий, принудительное смещение звеньев – относятся к внешним непредвиденным ситуациям управления.

Однако помимо внешних возмущений, возможны и изменения во внутренней конфигурации объекта и системы управления, связанные с неполнотой начального описания, помехами в управляющих каналах, неточностью и инерционностью измерительной системы и т.д.

Внесем в модели систем управления дополнительные случаи непредвиденных ситуаций управления, связанных с изменениями параметров ОУ во времени.

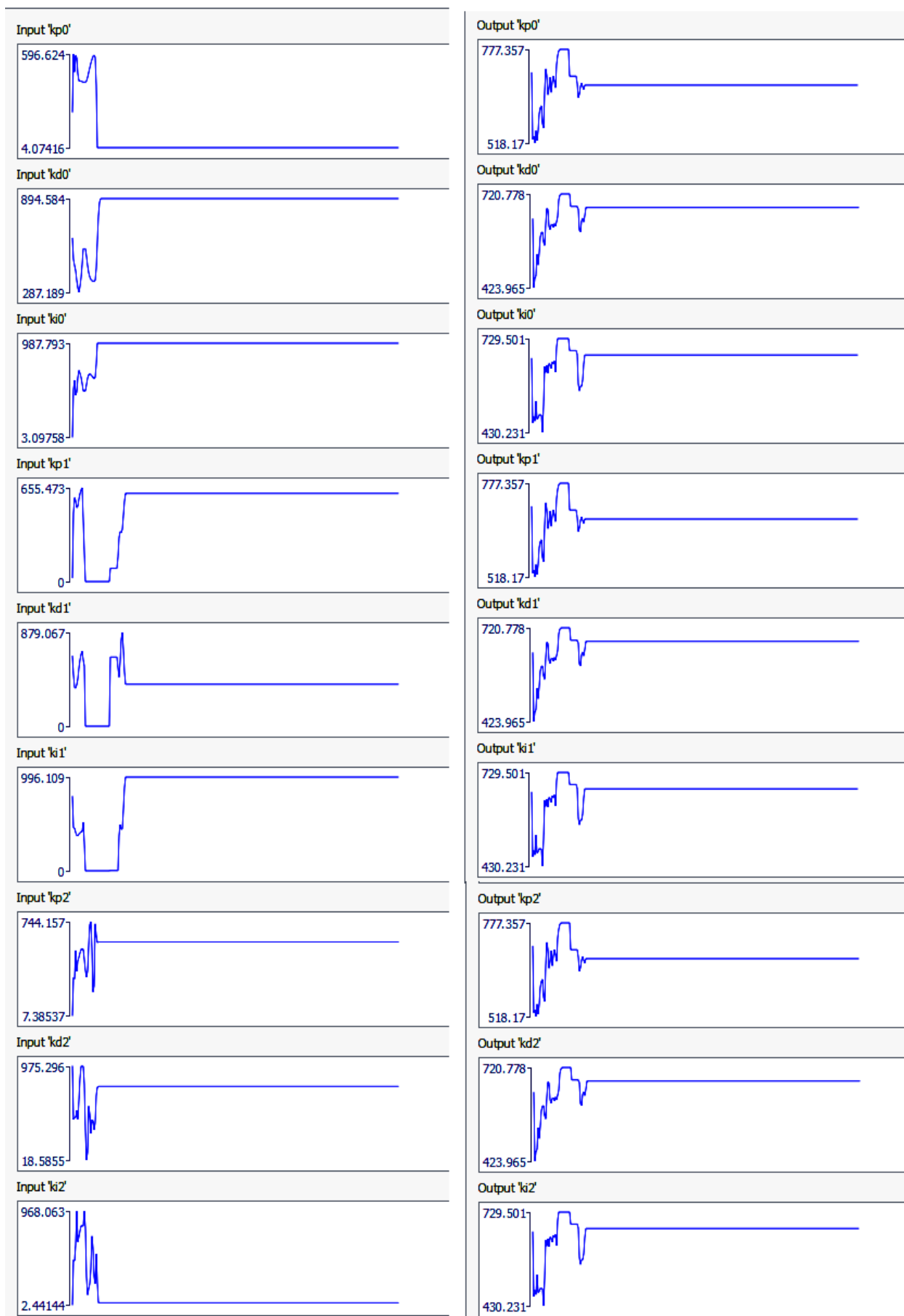


Рис. 10. Динамика изменения коэффициентов ПИД-регулятора на входе и выходе КНВ

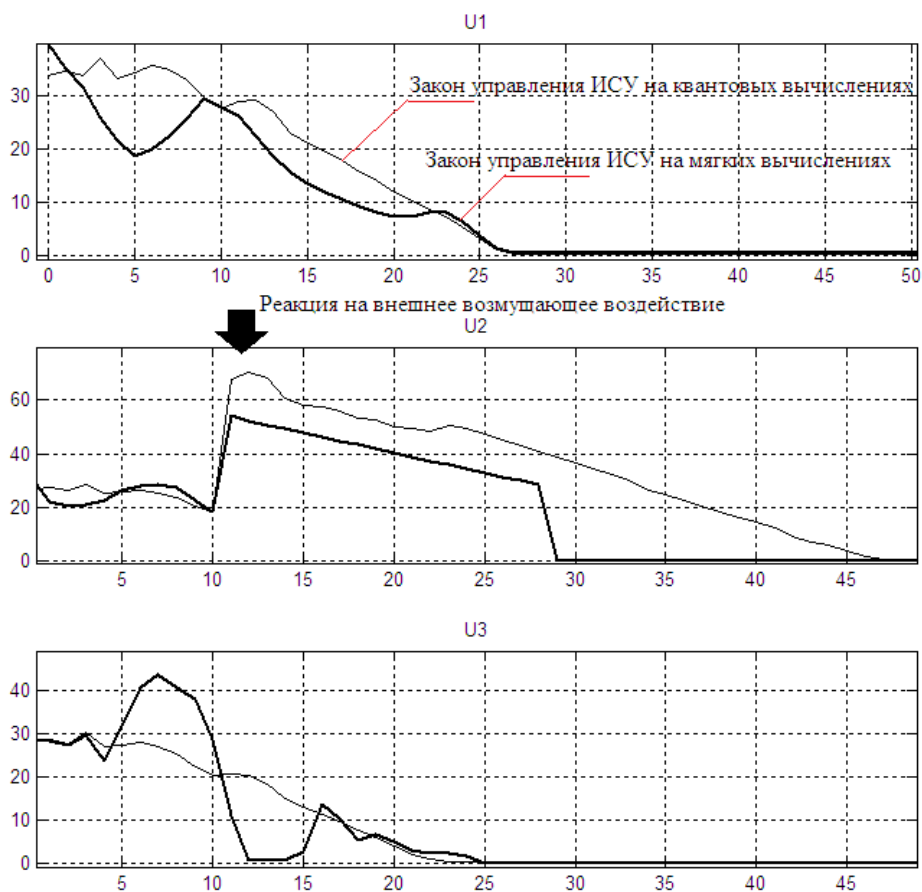


Рис. 11. Сравнение законов управления ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях

4. Моделирование непредвиденных ситуаций управления в условиях изменений параметров ОУ

Рассмотрим 2 случая непредвиденных ситуаций управления (начальные условия соответствуют штатным ситуациям управления):

1) на одиннадцатой итерации изменяется ограничение выходного воздействия в терминах изменений положений звеньев: увеличивается с 3 до 5 град.

2) на одиннадцатой итерации изменяется ограничение выходного воздействия в терминах изменений положений звеньев: уменьшается с 3 до 1 град.

Как и ранее, каждый из случаев тестируется на десяти экспериментах в соответствии с группой точек рабочего пространства, определенных как тестовых, т.е. серия состоит из 20 непредвиденных ситуаций управления.

Сравнение сформированных ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях законов управления при использовании пространственной, пространственно-временной и временной корреляций приведено на рис. 12 и 13 соответственно для первого (эксперимент 35) и второго (эксперимент 45) случаев непредвиденных ситуаций управления в условиях изменения параметров ОУ.

На рис. 12 и 13 законы управления, сформированные ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением определенного типа корреляции обозначены следующим образом: Spatial – пространственная корреляция, SpatialTemporal – пространственно-временная корреляция, Temporal – временная корреляция.

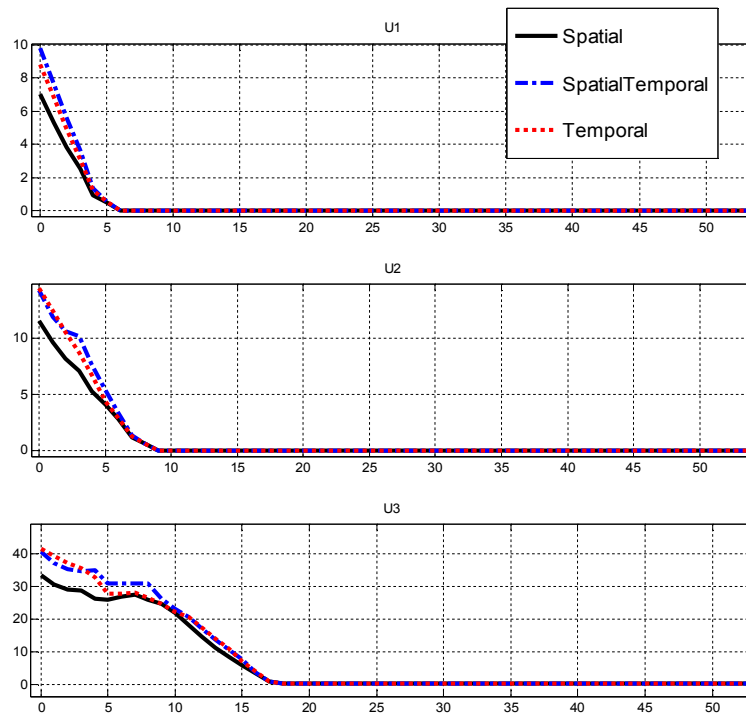


Рис. 12. Сравнение сформированных ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях законов управления с применением пространственной пространственно-временной и временной корреляций: первый случай (эксперимент 35) непредвиденной ситуации управления в условиях изменения параметров ОУ

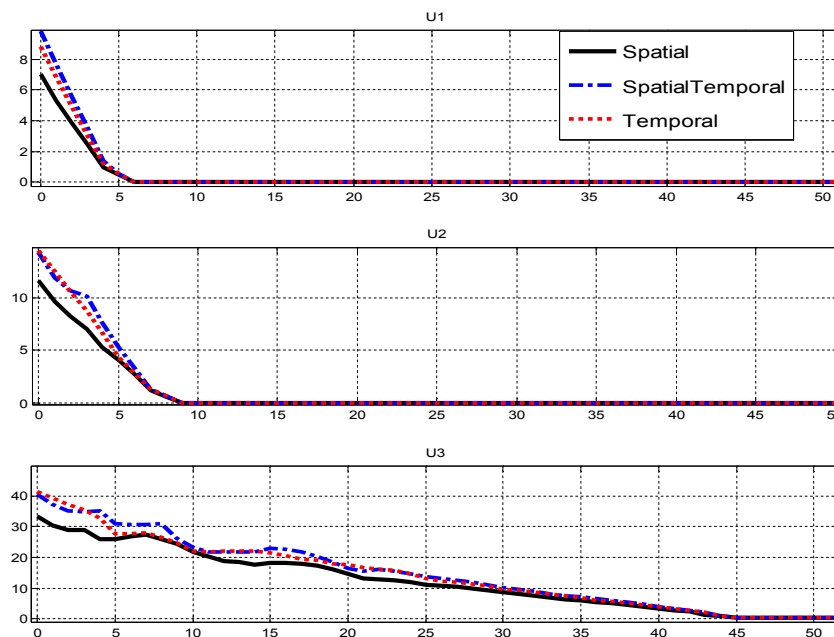


Рис. 13. Сравнение сформированных ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях законов управления с применением пространственной пространственно-временной и временной корреляций: второй случай (эксперимент 45) непредвиденной ситуации управления в условиях изменения параметров ОУ

Из рис. 12 и 13 видно, что при формировании управляющего воздействия минимальный расход полезного ресурса достигается при использовании пространственной корреляции.

Для рассмотренных экспериментов (35 и 45 – соответственно первый и второй случай непредвиденных ситуаций управления в условиях изменения параметров ОУ) сравним законы управления, формируемые с помощью ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции, а также ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и разделенным управлением (рис. 14 и 15).

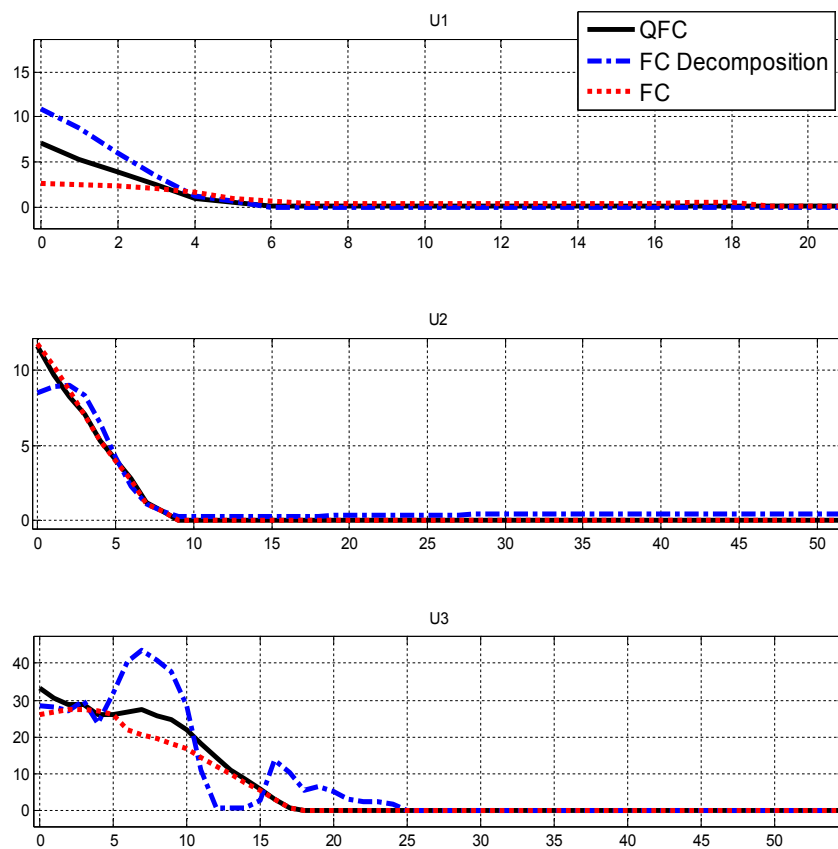


Рис. 14. Сравнение сформированных законов управления: ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением: первый случай (эксперимент 35) непредвиденной ситуации управления в условиях изменения параметров ОУ

На рис. 14 и 15 законы управления обозначены следующим образом: QFC – сформированные с помощью ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции, FC Decomposition – с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, FC – с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

Для рассмотренных экспериментов (рис. 14 и 15) с точки зрения минимизации расхода полезного ресурса, наилучшие законы управления формируются с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, незначительное ухудшение наблюдается при формировании с помощью ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции.

Законы управления, сформированные ИСУ на ОБЗ с разделенным управлением в условиях изменения параметров ОУ, приобрели колебательный характер.

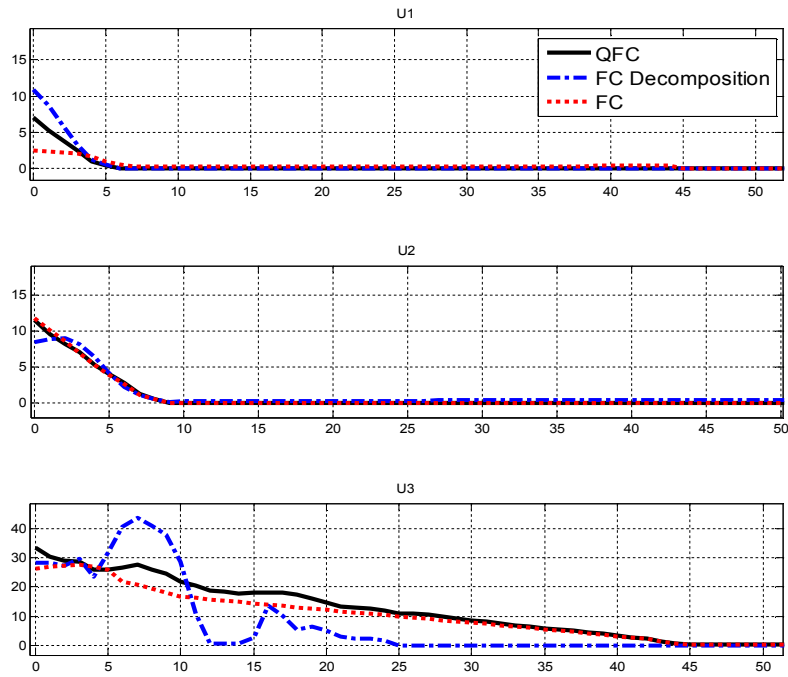


Рис. 15. Сравнение сформированных законов управления: ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением: первый случай (эксперимент 45) непредвиденной ситуации управления в условиях изменения параметров ОУ

Рассмотрим другую пару экспериментов (32 и 42), также соответствующую двум рассматриваемым случаям непредвиденных ситуаций управления в условиях изменения параметров ОУ (рис. 16 и 17).

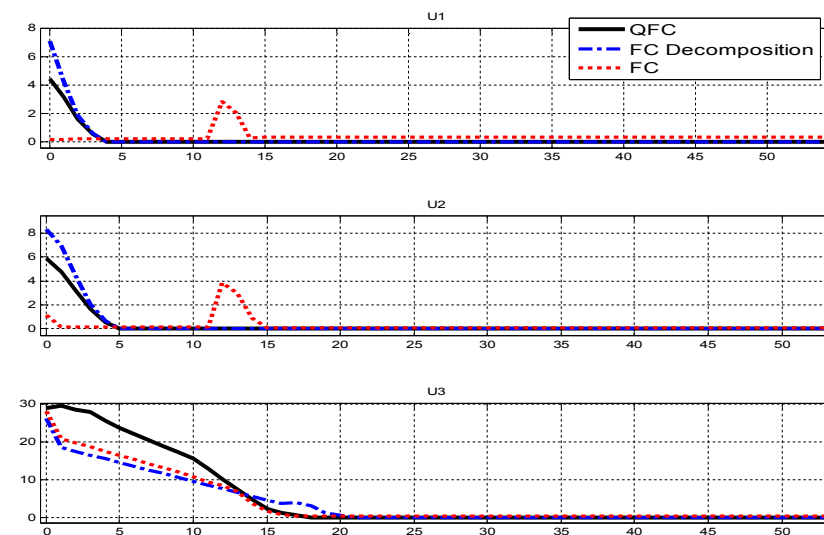


Рис. 16. Сравнение сформированных законов управления: ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением: первый случай (эксперимент 32) непредвиденной ситуации управления в условиях изменения параметров ОУ

При рассмотрении экспериментов (рис. 16 и 17), стабильные законы управления были сформированы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, тогда как в законах управления, сформированных ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР присутствуют участки локально неустойчивых состояний.

В рассмотренных примерах с точки зрения качества формирования законов управления (рис. 14 – 17), наилучшими свойствами обладает ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции, в то время как с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением был сформирован вектор управляющих воздействий с колебательным характером, а с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях – управляющие воздействия с локально неустойчивыми состояниями.

В разделе 3 настоящей статьи в терминах введенной системы критериев качества было проведено сравнение работы робота манипулятора под управлением ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной, пространственно-временной и временной корреляций и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

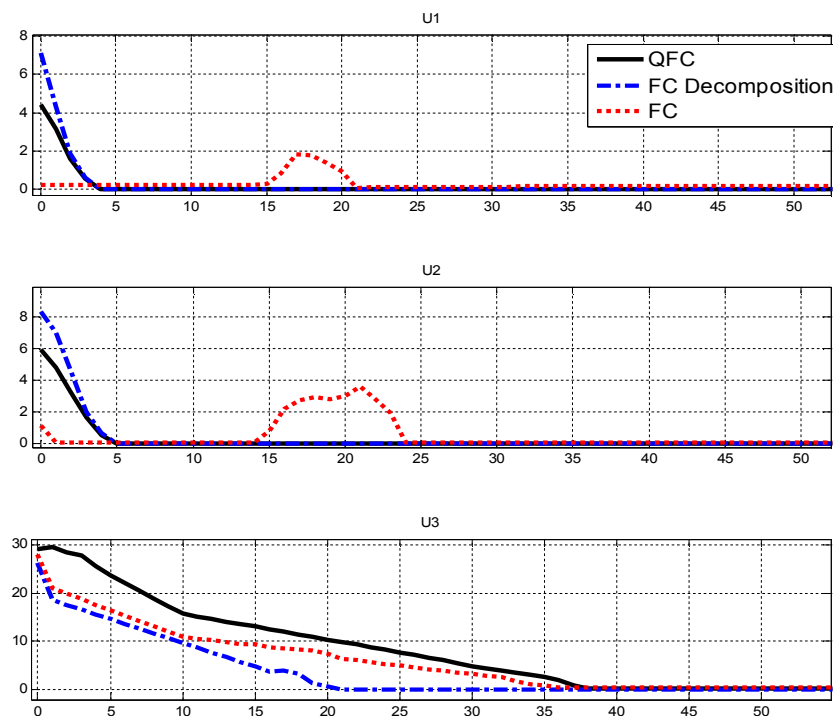


Рис. 17. Сравнение сформированных законов управления: ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением: первый случай (эксперимент 42) непредвиденной ситуации управления в условиях изменения параметров ОУ

Было показано, что общая оценка управления улучшается при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по сравнению с использованием ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением для всех рассмотренных типов корреляций.

При физическом тестировании Модуля Манипулятора наилучший показатель общей оценки управления обеспечивается при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции.

Сравним ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением различных типов корреляций и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

5. Организация координационного управления с помощью единой базы знаний и квантового нечеткого вывода

В случае использования ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним нечетким регулятором согласование поведения звеньев робота манипулятора осуществляется за счет организации единой БЗ, закладываемой в НР. Из-за большого числа входных переменных процесс создания БЗ усложняется, повышаются требования к вычислительным ресурсам процессора, на котором создаются БЗ и объему памяти системы, в которой размещается БЗ. В частности, во второй части статьи (см. настоящий номер журнала), были приведены зависимости максимального числа нечетких правил от количества функций принадлежности для входных переменных, а также зависимость максимального числа нечетких правил от числа степеней свободы робота манипулятора.

При декомпозиции управления (разделении одной БЗ на несколько независимых), координационное управление организуется с помощью введения звена КНВ, который использует дополнительные механизмы извлечения скрытой ценной информации.

Сравним два метода организации координационного управления: рассмотрим работу ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

Оценка работы систем управления будет производиться по серии экспериментов (Приложение А) с использованием введенной системы критериев качества (Приложение Б) с учетом разделения типов непредвиденных ситуаций на две составляющие:

1) непредвиденные ситуации управления в условиях внешних возмущающих воздействий (в соответствие поставим критерий качества PTS_{ACCS1} – «Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления в условиях внешних возмущающих воздействий»);

2) непредвиденные ситуации управления в условиях изменений параметров ОУ (соответствующий критерий качества PTS_{ACCS2} – «Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления в условиях изменений параметров ОУ»).

Соответствующие PTS_{ACCS1} и PTS_{ACCS2} весовые коэффициенты w_{21} и w_{22} определяются с учетом количества непредвиденных ситуаций управлений (30 для непредвиденных ситуаций управления в условиях внешних возмущающих воздействий и 20 для непредвиденных ситуаций управления в условиях изменений параметров ОУ):

$$w_{21} = w_2 \frac{30}{30+20}; \quad w_{22} = w_2 \frac{20}{30+20}.$$

Согласно определенному в Таблице Б1 $w_2 = 0,4$ в результате получим $w_{21} = 0,24$; $w_{22} = 0,16$.

Общая оценка управления определим в виде:

$$FCB \equiv w_1 \cdot P[PTS_{KCS}] + w_{21} \cdot P[PTS_{ACCS1}] + w_{22} \cdot P[PTS_{ACCS2}] + w_3 \cdot P[I_T] + w_4 \cdot P[\sigma] + w_5 \cdot P[\varepsilon] + w_6 \cdot P[t] + w_7 \cdot P.$$

Результаты проведения серии экспериментов, для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной, пространственно-временной и временной корреляций, приведены соответственно в Таблицах 3 и 4 для MatLab/Simulink моделей и для Модуля Манипулятора, а также на рис. 18 и 19 соответственно для MatLab/Simulink моделей и для Модуля Манипулятора.

Из Таблиц 3 и 4, а также из рис. 18 и 19 видно, что в отличие от ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях, критерий «Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях в условиях изменения параметров управления» достигает максимального значения при использовании пространственной и пространственно-временной корреляций (рассмотренный критерий достигал максимального значения и при использовании временной корреляции в MatLab/Simulink модели – таблица 3, однако физическое тестирование не подтвердило максимального значения – таблица 4).

При использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях улучшается показатель критерия «Сложность реализации управления» при использовании любого из трех рассмотренных типов кор-

реляций как для *MatLab/Simulink* моделей, так и для Модуля Манипулятора, однако ухудшились показатели критерия «Время одной итерации».

При тестировании *MatLab/Simulink* моделей, по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР улучшились параметры «Быстродействие» при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной и пространственно-временной корреляций (таблица 3). Но при физическом тестировании улучшение достигается только при использовании пространственной корреляции (таблица 4)

Таблица 3. Сравнение критериев качества для *MatLab/Simulink* моделей

	Вид решения	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственно-временной корреляции	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием временной корреляции
1	Решение в штатных ситуациях управления	1	1	1	1
2	Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	1	1	1	1
3	Решение в непредвиденных ситуациях: изменения параметров ОУ	0,85	1	1	1
4	Быстродействие	0,764222	0,777889	0,7865	0,717889
5	Относительное значение перерегулирования	1	1	1	0,999437
6	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,999082	0,998767	0,998767	0,997608
7	Время одной итерации	0,969658	0,90471	0,912897	0,923642
8	Сложность реализации управления	0,970215	0,98899	0,98483	0,986712
9	Общее управление	0,924229	0,945375	0,947708	0,93501

Таблица 4. Сравнение критериев качества для Модуля Манипулятора

	Вид решения	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственно-временной корреляции	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием временной корреляции
1	Решение в штатных ситуациях управления	1	1	1	1
2	Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	1	1	1	1
3	Решение в непредвиденных ситуациях: изменения параметров ОУ	0,85	1	1	0,95
4	Быстродействие	0,778667	0,803278	0,685	0,735833
5	Относительное значение перерегулирования	0,99975	0,998817	0,998717	0,998283
6	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,998873	0,998817	0,9965	0,997688
7	Время одной итерации	0,797833	0,717831	0,74905	0,726783
8	Сложность реализации управления	0,968698	0,976142	0,977817	0,98885
9	Общее управление	0,909826	0,931068	0,910382	0,910971

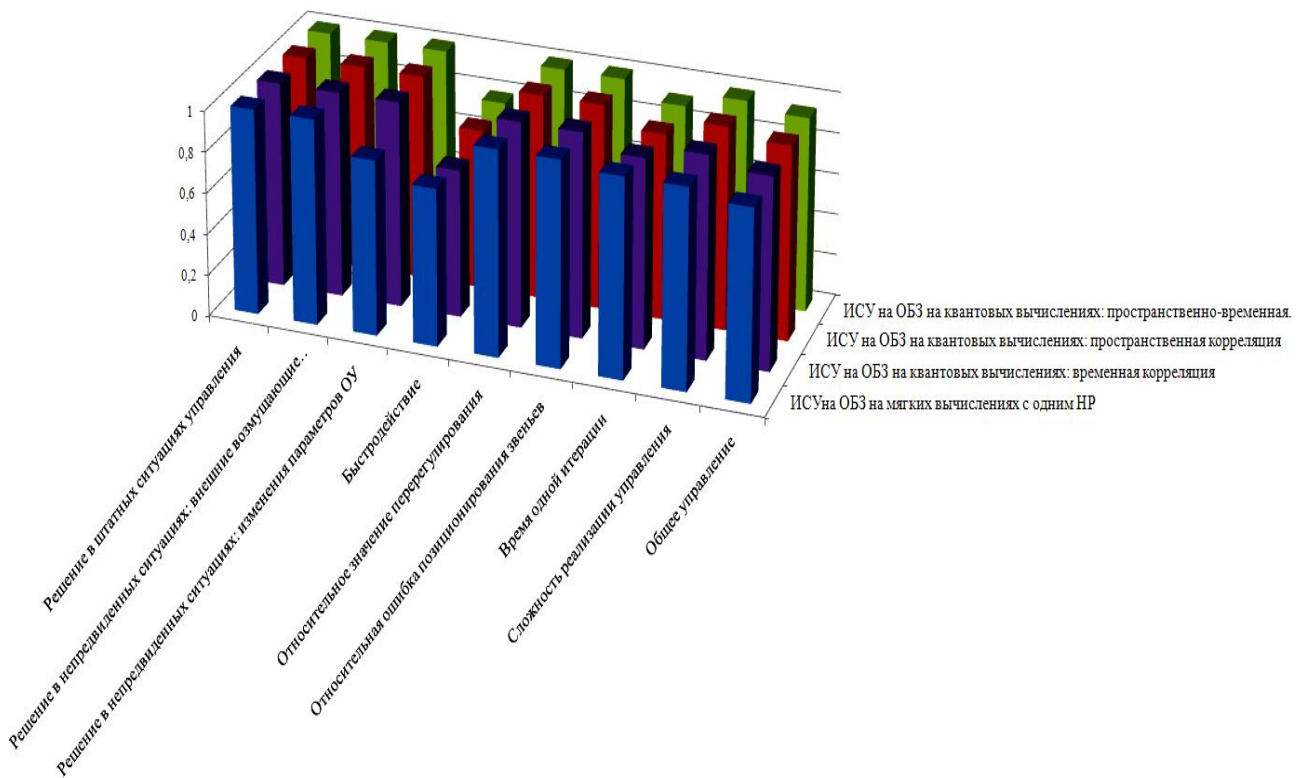


Рис. 18. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной, пространственно-временной и временной корреляций при тестировании MatLab/Simulink моделей

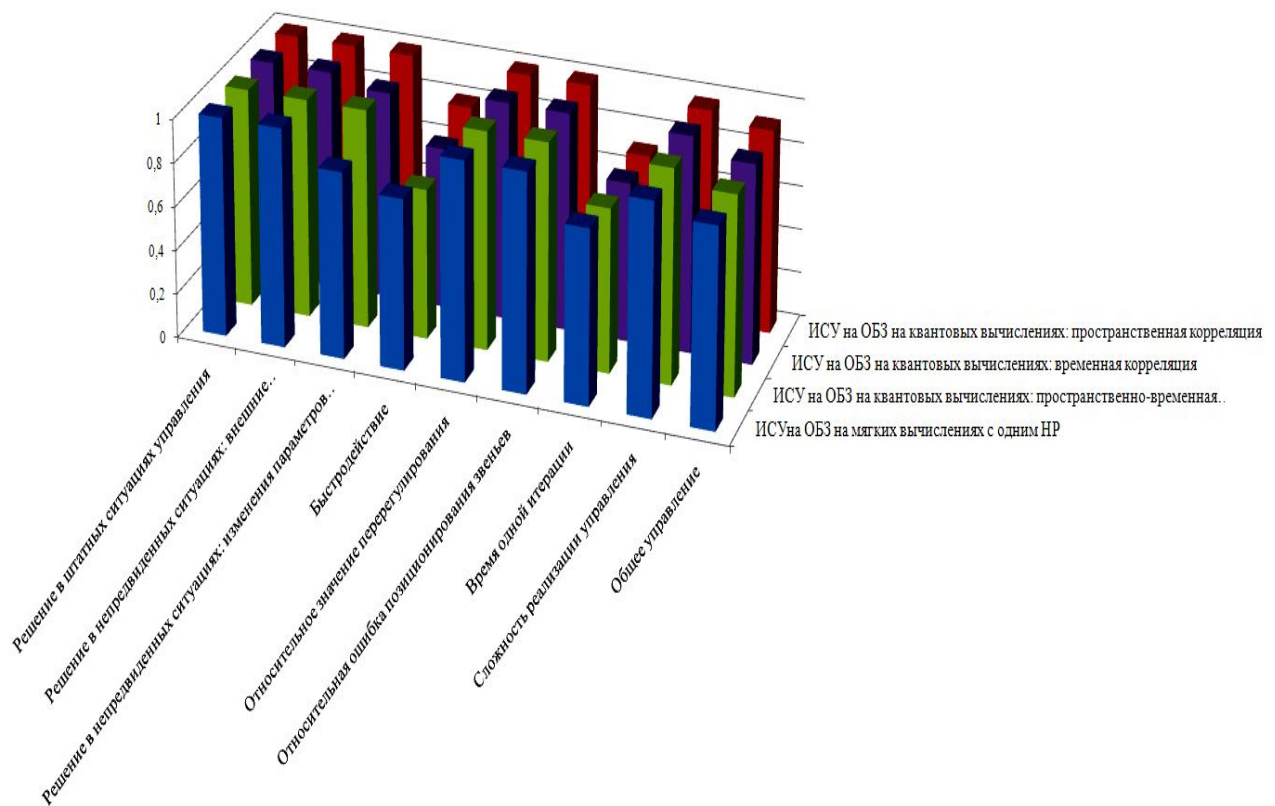


Рис. 19. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной, пространственно-временной и временной корреляций. при физическом тестировании Модуля Манипулятора

В целом, «Общая оценка управления» улучшается во всех случаях при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по сравнению с использованием ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР при использовании любого из рассмотренных типов корреляций, причем если для *MatLab/Simulink* моделей наилучший показатель обеспечивается при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственно-временной корреляции, то при физическом тестировании Модуля Манипулятора наилучший показатель обеспечивается при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции.

Резюмируя разделы 3-5 с точки зрения оценки работы ИСУ на квантовых и мягких вычислениях отметим следующие результаты:

1. Общая оценка качества управления выше в случае применения ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях (для пространственной, пространственно-временной и временной корреляций) по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, что является следствием введения в структуру ИСУ (рис. 4) дополнительного звена КНВ, организующего координационное управление. Причем если в результате тестирования *MatLab/Simulink* моделей лучшими показателями обладала ИСУ, использующая пространственно-временную корреляцию, то физическое тестирование определило наиболее оптимальным использование пространственной корреляции.

2. Общая оценка качества управления улучшается при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях при любом из рассмотренных типов корреляции по сравнению с использованием ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР. Результат физического тестирования определил оптимальным использование пространственной корреляции.

Данный результат особенно примечателен тем, что при организации координационного управления за счет единой БЗ (соответственно использованию одного НР в ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях) количество входных переменных – т.е. параметры, определяющие функционирование системы – ограничены вычислительными ресурсами процессора, на котором создается БЗ и объемом памяти системы, в которой размещается БЗ.

Возможность декомпозиции управления (разделения одной БЗ на несколько однотипных независимых БЗ) и организация координационного управления с помощью введения звена КНВ, существенно увеличивает возможное число входных переменных и тем самым расширяет возможности учета параметров системы и объекта управления.

3. Минимальный расход полезного ресурса достигается при использовании в ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях пространственной корреляции по сравнению с пространственно-временной и временной корреляциями.

4. Законы управления, сформированные ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением в условиях изменения параметров ОУ или внешних возмущающих воздействий, приобрели колебательный характер, а в законах управления, сформированных ИСУ на ОБЗ с одним НР появились участки локально неустойчивых состояний. Показатель критерия качества «Сложность реализации управления» всегда выше для ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях для всех рассмотренных типов корреляций по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Заключение

В цикле статей рассматривалась эволюция систем управления с последовательным увеличением интеллектуальности: САУ на ПИД-регуляторе, ИСУ на ГА, ИСУ с применением технологий мягких и квантовых вычислений для задачи точного позиционного управления роботом манипулятором с тремя степенями свободы.

Анализировалось поведение идеализированных моделей, моделей, приближенные к реальным условиям, а также физического ОУ. На каждом этапе делались выводы о границах применимости систем управления с различной степенью интеллектуальности.

Однако для разработчиков систем управления избыточными роботами манипуляторами, помимо организации прямого управления положениями звеньев, важной задачей также является обеспечение дополнительного качества - реконфигурируемость (структурная адаптация) ОУ в зависимости от состояния окружающей среды (в том числе и динамически изменяющейся): решение задачи обратной

динамики избыточного манипулятора, построения оптимальной траектории устройства захвата, обход препятствий и др.

Подобные задачи также возможны с использованием технологий интеллектуальных вычислений; методы решения перечисленных задач с применением мягких и квантовых вычислений будут рассмотрены в дальнейших работах.

Приложение А

Порядок проведения испытаний

Серия экспериментов состоит из двух этапов:

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

В качестве штатных ситуаций управления выступают 10 (десять) экспериментов в соответствии с группой точек рабочего пространства, определенных как тестовых (рис. А1).

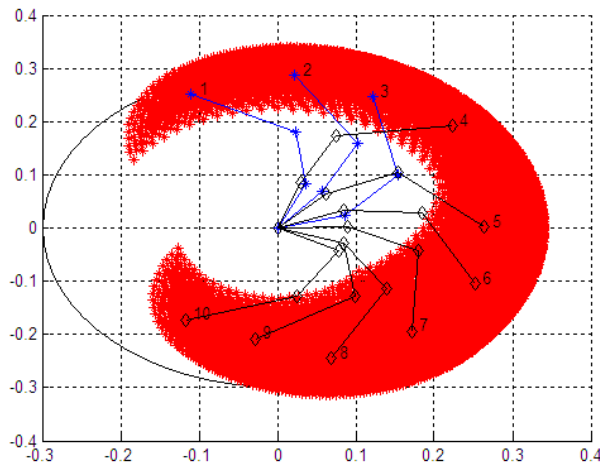


Рис. А1. Тестовое пространство

За начальное положение манипулятора принимается конфигурация:

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

В качестве нештатных ситуаций управления выступают три случая:

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

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

Таким образом, проводится 30 экспериментов для непредвиденных ситуаций управления.

Приложение Б

Определение критериев качества

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

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

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

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

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

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

где N – число экспериментов.

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

3. Быстродействие I_T .

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

$$I_T = I \left((|q_{1ref} - q_1| < 1 \text{ deg}) \wedge (|q_{2ref} - q_2| < 1 \text{ deg}) \wedge (|q_{3ref} - q_3| < 1 \text{ deg}) \right); \quad I_T \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N I_T}{NI_{max}}.$$

4. Относительное значение перерегулирования σ

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

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

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

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

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

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

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)

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

где w_i – весовые коэффициенты, значения которых приведены в Таблице Б1.

Таблица Б1. Значения весовых коэффициентов

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

Список литературы

1. Николаева А.В., Петров С.П., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором. Ч. 1: Технологии мягких вычислений. // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2012. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/25>. – 0421200111\0021.
2. Ульянов С.В., Андреев Е.И., Афанасьева О.А., Барбашинов М.Н., Резникова Н.В., Самигулина Э.А. Логические и квантовые парадоксы интеллектуальных квантовых и мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2010. – №2. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/16>. – 0421000111\0018.
3. Ulyanov S.V. System and method for control using quantum soft computing // US patent. – 2003. – №6, 578, 018 B1.
4. Ulyanov S. V., Kurawaki I., et al., Information analysis of quantum gates for simulation of quantum algorithms on classical computers // Proc. Intern. Confer. Quantum Communication, Measurements and Computing (QCM&C'2000), Capri, Italy, 2000. – Springer Verlag: Quantum Communication, Computing, and Measurement 3, 2002. – Pp 207-214.
5. 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.
6. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Интеллектуальные системы управления. 1.Квантовые вычисления и алгоритм самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – №6.
7. Nielsen M.A., Chang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge Univ. Press. UK. – 2000.
8. Marinescu D.C., Marinescu G.M. Approaching quantum computing. Pearson Prentice Hall. USA. – 2005.
9. 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: 0421200111\0006.
10. Ghisi F., Ulyanov S. The information role of entanglement and interference operators in Shor's quantum algorithm gate dynamics // Journal of Modern Optics. – 2000. – Vol. 47. – №12.