

УДК 658.012.011.56

РОБАСТНОЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМ РОБОТОМ: КВАНТОВАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ НЕТОЧНЫХ БАЗ ЗНАНИЙ – ЭКСПЕРИМЕНТ

© 2023 г. А. Г. Решетников^{a,b,*}, В. С. Ульянов^{c,**}, С. В. Ульянов^{b,***}

^aГБОУ ВО МО “Университет “Дубна”, Институт системного анализа и управления, г. Дубна, Россия

^bОбъединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна, Россия

^cМосковский государственный ун-т геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

*e-mail: agreshetnikov@gmail.com

**e-mail: ulyanovik@mail.ru

***e-mail: ulyanovsv46_46@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2023 г.

После доработки 28.04.2023 г.

Принята к публикации 05.06.2023 г.

Рассматривается информационная технология проектирования робастной интеллектуальной системы управления на базе квантового нечеткого вывода. Применение разработанной методологии проектирования основано на квантовой самоорганизации неточных баз знаний нечетких регуляторов и приводит к повышению уровня робастности интеллектуальных систем управления в непредвиденных ситуациях. Проводится сравнение результатов математического моделирования и физического эксперимента на примере автономного робота в виде системы “перевернутый маятник–движущаяся каретка”. Получено экспериментальное подтверждение существования синергетического эффекта формирования робастного самоорганизующегося нечеткого регулятора из конечного числа неробастных нечетких регуляторов в реальном времени. Полученный эффект основан на существовании скрытой квантовой информации, извлекаемой из классических состояний процессов изменения во времени коэффициентов усиления регуляторов. Выведенный закон квантовой информационной термодинамики устанавливает возможность формирования термодинамической силы управления за счет извлеченного количества скрытой квантовой информации и совершения дополнительной полезной работы, гарантирующих достижение цели управления на базе повышения уровня робастности самоорганизующегося квантового регулятора. При этом количество совершенной объектом управления полезной работы (на макроуровне) превышает количество работы, затраченной (на микроуровне) квантовым самоорганизующимся регулятором на извлечение квантовой информации, скрытой в реакциях неточных баз знаний без нарушения второго информационного закона термодинамики открытых квантовых систем с обменом информацией запутанных суперкоррелированных состояний. Приведен конкретный пример автономного робота, демонстрирующий существование синергетического эффекта квантовой самоорганизации неточных баз знаний.

DOI: 10.31857/S000233882305013X, EDN: OCLHQB

Введение. Методология проектирования интеллектуальных систем управления (ИСУ), основанная на технологии мягких вычислений, рассматривает в качестве базиса структуру нечеткого регулятора (НР) как один из вариантов эффективного проектирования традиционных систем автоматического управления (САУ) [1, 2]. С самого момента своего появления (1974 г.) модели НР демонстрируют повышенную способность управления динамическими объектами управления (ОУ), которые обладают слабо формализованной структурой или функционируют в условиях неопределенности или неточности исходной информации, непредвиденных ситуациях или информационного риска.

В работе рассматриваются вопросы проектирования ИСУ на примере динамически неустойчивого ОУ типа “Каретка движения–перевернутый маятник”, с использованием оптимизаторов баз знаний (ОБЗ) на мягких и квантовых вычислениях – SCOptKB™ & QCOptKB™ соответственно [2–4]. Приводится описание технологии проектирования робастной ИСУ на основе

квантового нечеткого вывода (КНВ). Управление объектом типа “Каретка–перевернутый маятник” является одной из типовых задач в теории управления, так как решение этой задачи наглядно демонстрирует качество САУ. Более подробное описание ОУ и верификация его математической модели рассмотрены в [5].

Главный результат работы – экспериментальное доказательство существования синергетического информационного эффекта квантовой самоорганизации неточных баз знаний НР за счет извлечения скрытой квантовой информации, предсказанного и доказанного моделированием в [6–9].

Промышленное применение. Первый экспериментальный результат получен на реальном физическом объекте в [10] для ИСУ охлаждением сверхпроводящего магнита ускорительного комплекса мега сайнс проекта разработки коллайдера NICA [11].

В частности, была разработана программно-аппаратная платформа управления давлением и расходом жидкого азота сверхпроводящих магнитов криогенной системы на основе встраиваемых в контур управления квантовых НР с реализацией на процессоре классической архитектуры. Многоуровневая система управления включает существующий нижний исполнительный уровень, основанный на системе Tango Controls, и новый уровень, на котором управляющие воздействия формируются с помощью квантового НР. При этом обеспечиваются оптимальные параметры качества управления, такие, как температура, расход азота, быстродействие, требуемый уровень давления и минимальная сложность реализации управления коэффициентами усиления пропорционально интегрально-дифференциальным (ПИД) регуляторам.

Экспериментально продемонстрирована работоспособность и эффективность созданной интеллектуальной системы дистанционного управления технологическим процессом охлаждения сверхпроводящего магнита с гарантированным достижением устойчивой зоны сверхпроводимости [10]. Проектирование квантовых НР основано на квантовых информационных технологиях и осуществляется с помощью разработанного сотрудниками ЛИТ им. М.Г. Мещерякова программного инструментария QSCIT (quantum soft computational intelligence toolkit) [11]. Рассматривается возможность удаленной настройки базы знаний (БЗ) реального ОУ с использованием дистанционного соединения реального ОУ с ОБЗ на квантовых вычислениях. Расширен класс непредвиденных ситуаций для проверки робастности разработанной ИСУ и доказательства достижения глобальной робастности по сравнению с ОБЗ на мягких вычислениях.

Актуальность рассматриваемой проблемы. Создание корректного алгоритма проектирования требуемого уровня робастности ИСУ является одной из актуальных задач современной теории и систем управления. Одновременно данная проблема относится к сложной и слабо исследованной области разработки ИСУ, способных эффективно и надежно функционировать в условиях риска и непредвиденных ситуаций управления. Применение технологии интеллектуальных вычислений в задачах проектирования робастного управления показало на практике повышение надежности функционирования ОУ в непредвиденных ситуациях управления за счет повышения интеллектуальности нижнего исполнительского уровня в виде традиционных структур САУ на основе традиционных ПИД-регуляторов, регуляторов со скользящим режимом, ПИД² (2-степенной ПИД), регуляторов дробного порядка и мн. др. [12, 13].

Методология исследования. Эффективность разработанной технологии проектирования ИСУ рассматривается на примере вопросов проектирования ИСУ, традиционного для теории систем управления неустойчивого ОУ типа “каретка–перевернутый маятник”, с использованием ОБЗ на квантовых вычислениях.

Исследованы возможности робастного управления динамически неустойчивыми нелинейными объектами управления с реализацией на встраиваемых процессорах классической архитектуры. Описана стратегия проектирования интеллектуальных систем управления на основе технологий квантовых и мягких вычислений. В этом подходе математический формализм квантовой механики используется для построения новых алгоритмов квантового управления, успешно моделируемых на компьютерах классической архитектуры. Алгоритмы применяют схему КНВ – из БЗ (включающих параметры функций принадлежности и множества нечетких правил), принадлежащих отдельным НР, извлекается скрытая квантовая информация, на основе которой создается новая робастная БЗ. Этот процесс демонстрирует синергетический эффект квантовой самоорганизации – из двух ненадежных БЗ НР создается (в режиме реального времени) робастная БЗ квантового нечеткого регулятора. Этот эффект имеет чисто квантовую природу и использует скрытую квантовую информацию, извлеченную из классических состояний. Разработанная технология повышает надежность интеллектуальных когнитивных систем, функционирующих в непредвиденных ситуациях управления, например при взаимодействии ансамбля

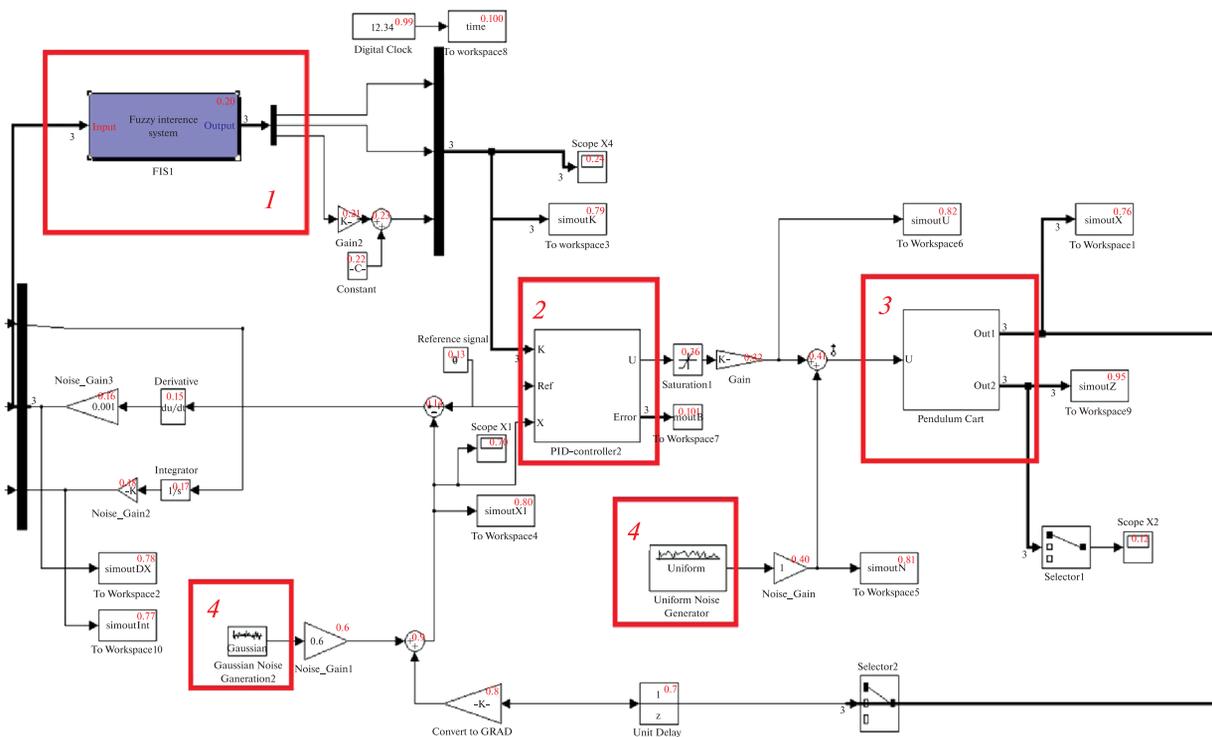


Рис. 1. Структура системы моделирования: 1 – блок КНВ; 2 – ПИД-регулятор; 3 – объект управления; 4 – генераторы шумов

роботов различных типов. На множестве примеров различных систем было продемонстрировано эффективное внедрение схемы КНВ в качестве готового программируемого алгоритмического решения для систем нижнего исполнительного уровня управления [14]. Алгоритмы и стратегия проектирования были успешно, как отмечено, применены к разработке ИСУ охлаждением сверхпроводящих магнитов в рамках проекта НИКА.

Развитие технологии. Представленная методология проектирования и реализации квантовых самоорганизующихся НР позволяет масштабировать и тиражировать данный продукт на другие типы физических ОУ.

Моделирование и физический эксперимент с автономным роботом. Математическая модель ОУ, используемая в данной работе, подробно описана и исследована в [15, 16]. В эксперименте применены БЗ для НР, найденные с помощью моделирования в [7, 8, 15], и пояснения приведены по мере необходимости понимания физической строгости и математической корректности интерпретации полученных результатов.

1. Компьютерная модель ОУ “каретка перемещения–маятник”. Система обладает глобальной динамической неустойчивостью, при отсутствии управляющей силы происходит неограниченный рост угла отклонения, т.е. маятник падает.

Структура компьютерной модели “каретка–перевернутый маятник”, выполненная в среде моделирования *MatLab/Simulink*, представлена на рис. 1.

Модель включает в себя ПИД-регулятор, шумы в системе управления и измерения, а также блок, формирующий сигнал для регулятора. Данная компьютерная модель используется для получения обучающего сигнала и настройки БЗ с помощью ОБЗ на мягких вычислениях – *SCOptKB™* [2] и формирования БЗ законов изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора по методике, разработанной в [17]. В качестве модели управления данной системой, будем использовать следующее выражение для определения управляющего воздействия:

$$u(t) = k_p(t)e(t) + k_i(t) \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d(t)\dot{e}(t) \tag{1.1}$$

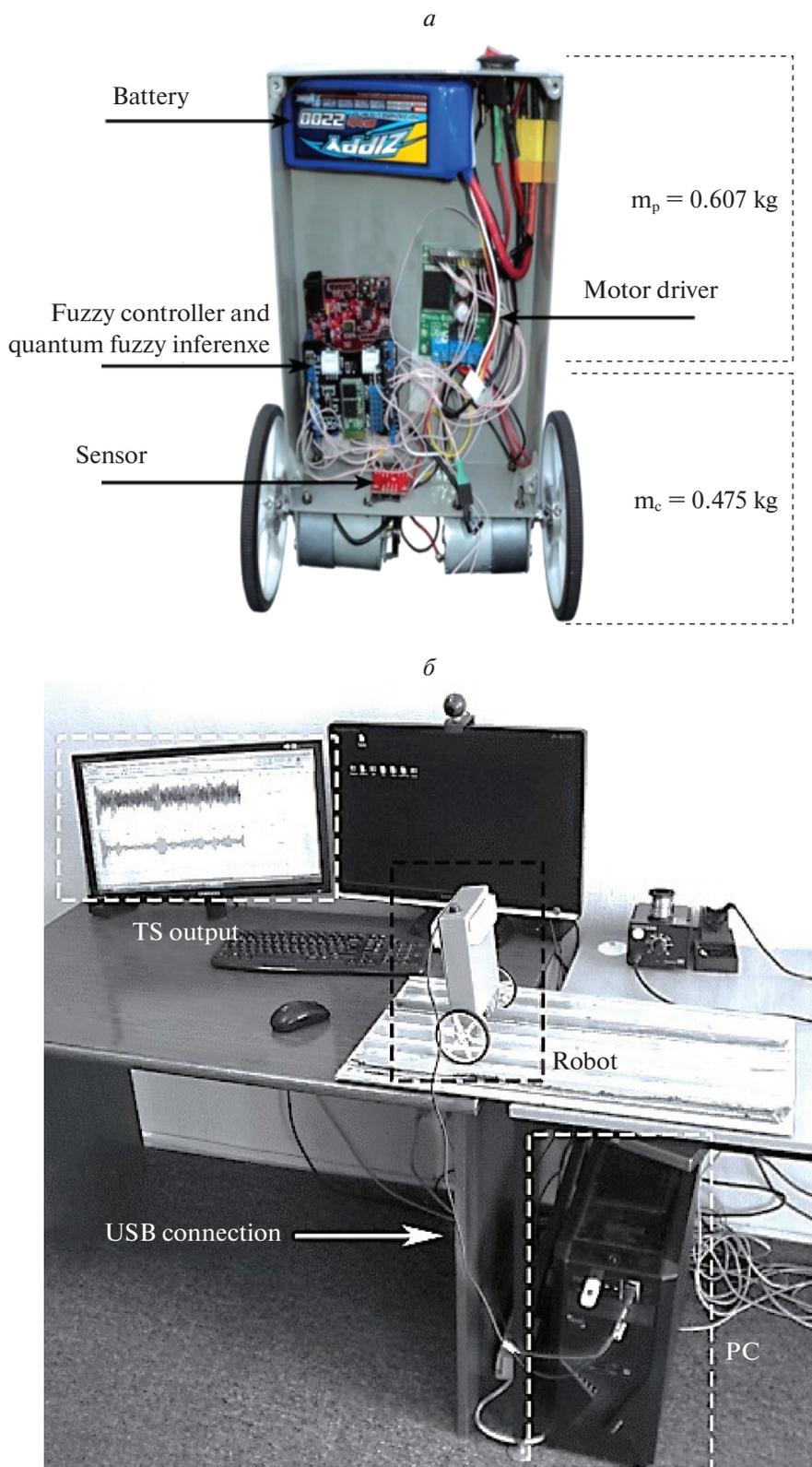


Рис. 2. Макет системы “каровка–перевернутый маятник” (а); стенд для проведения экспериментов (б), где TS output – представление обучающего сигнала (ОС) с модели, Robot – макет ОУ, USB connection – кабельное соединение компьютера и макета, PC – персональный компьютер

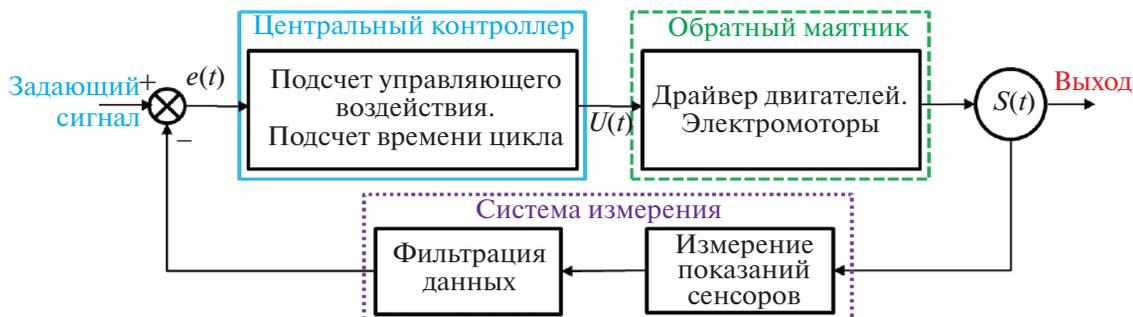


Рис. 3. Алгоритм программы микроконтроллера

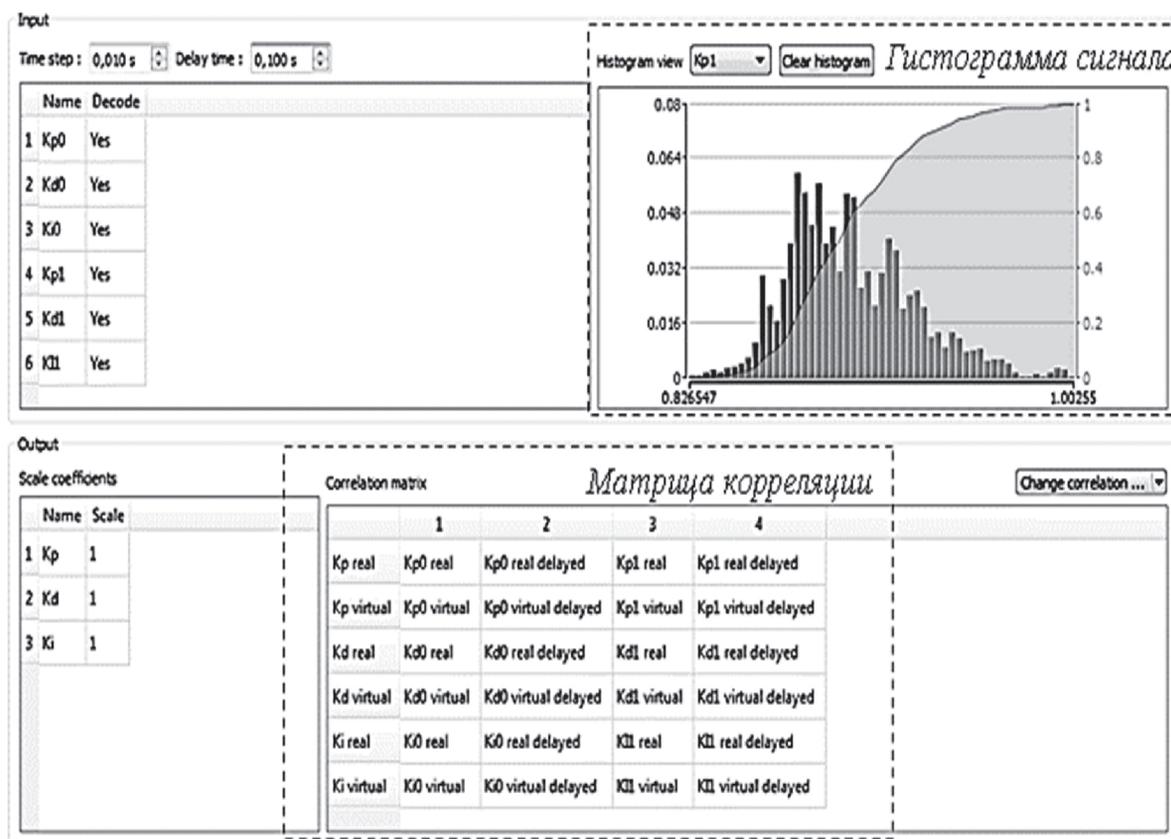


Рис. 4. Рабочее окно квантового оптимизатора

В соответствии со схемой управления применяется ПИД-регулятор (1.1) с контуром глобальной отрицательной обратной связи.

1.1. Макет системы. Данный тип ОУ является типовым (Benchmark) для тестирования программного инструментария робастного интеллектуального управления. Рассмотрим подробнее устройство подобного макета ОУ.

На рис. 2,а представлен макет, используемый для тестирования технологий проектирования ИСУ с помощью ОБЗ и стенд (рис. 2,б) для проведения экспериментов.

Стенд оборудован различными покрытиями для проведения экспериментов с макетом, в том числе в непредвиденных ситуациях управления. Также на стенде имеется возможность устанавливать определенный начальный угол для запуска макета.

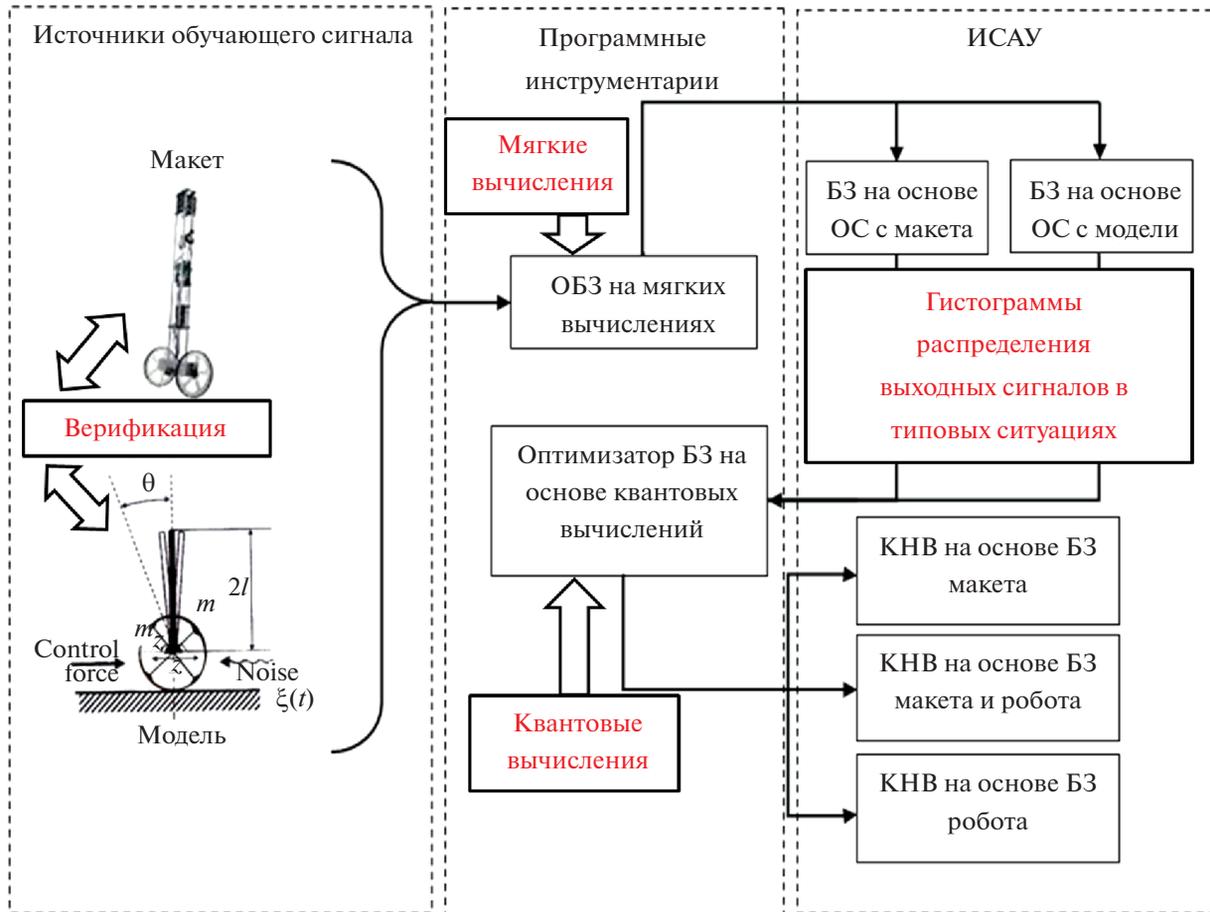


Рис. 5. Технология проектирования КНВ, где ИСАУ – интеллектуальная система автономного управления, ОС – обучающий сигнал

В качестве измерительной системы (рис. 2, Sensor) в макете используется плата с комбинацией датчиков – гироскопа и акселерометра – 5 DoF (пять степеней свободы) IDG500/ADXL335.

Ядром и центральным элементом системы является микроконтроллер компании Microchip® Chirkit, основанный на процессоре PIC32MX320F128. Плата оборудована USB-разъемом для передачи данных с процессора на компьютер. Интерфейс USB применяется при проведении экспериментов для передачи и приема данных (угла отклонения и величины управляющего

Таблица 1. Сравнение БЗ

БЗ, источник сигнала, описание, подпись	Количество правил	Количество функций принадлежности	Способ оптимизации
БЗ1, матмодель, FC1	245	$8 \times 6 \times 6$	Моделирование
БЗ4, макет ОУ FC4	288	$9 \times 9 \times 6$	Аппроксимация обучающего сигнала ОС (генетический алгоритм – ГА2)
Q-S	FC1 × FC4	–	Моделирование
Q-T	FC1 × FC4	–	Моделирование
Q-ST	FC1 × FC4	–	Моделирование

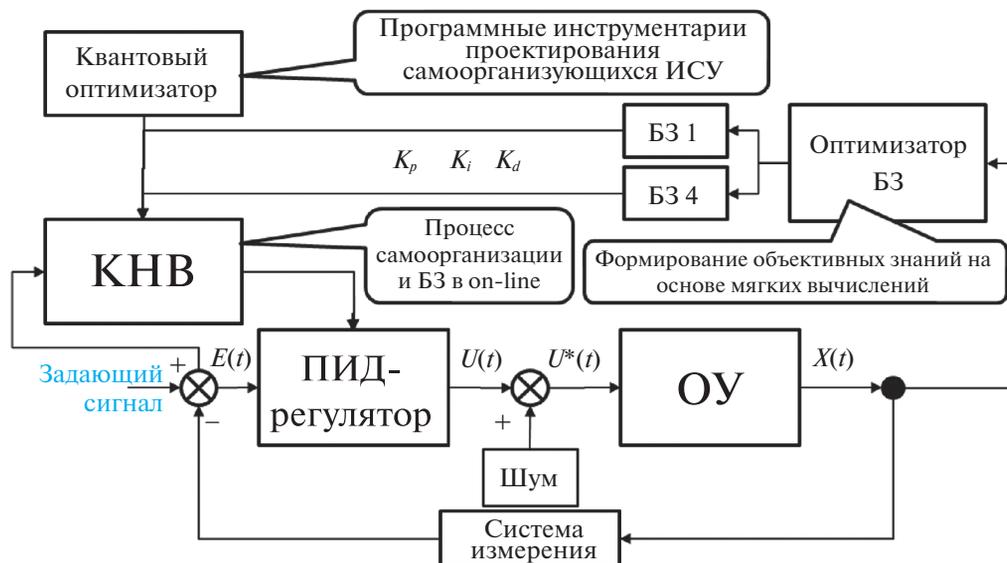


Рис. 6. Структура квантового НР

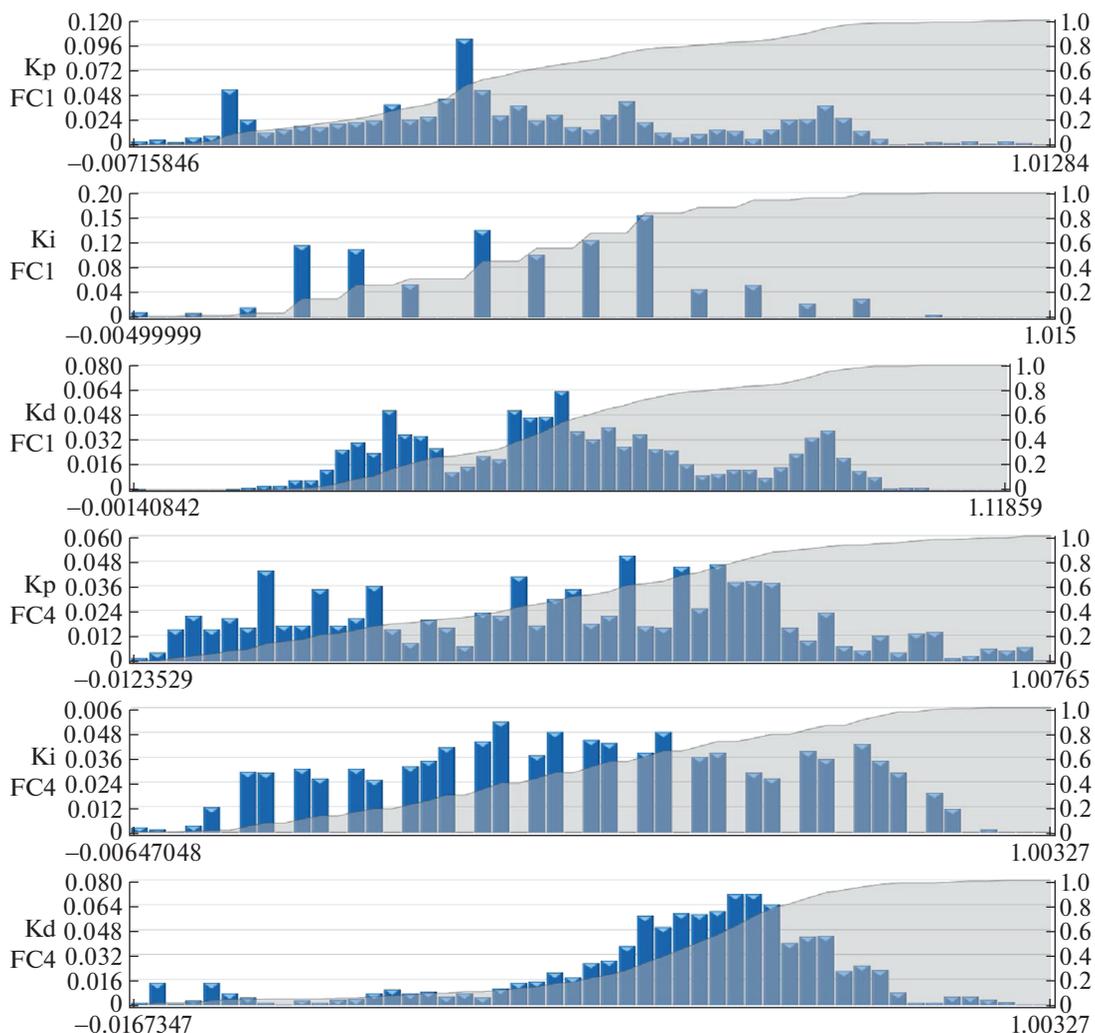


Рис. 7. Гистограммы входных коэффициентов КНВ с НР FC1 и FC4

Connection Setup		Normalization	Generalization	Signal			
Input Normalization							
	Name	Scale	Offset	Signal Max.	Signal Min.	Force clipping	
1	Kp0	0.591716	8.79	10.48	8.79	No	
2	Kd0	0.467289	14.4	16.54	14.4	No	
3	Ki0	33.3333	0.33	0.36	0.33	No	
4	Kp1	0.421941	11.36	13.73	11.36	No	
5	Kd1	0.302115	14.36	17.67	14.36	No	
6	KI	16.6667	0.31	0.37	0.31	No	
<i>Normalization equation is Internal=(External-Offset)*Scale</i>							
Output Denormalization							
	Name	Scale	Offset	Signal Max.	Signal Min.	Force clipping	
1	Kp	0.199601	8.79	13.8	8.79	No	
2	Kd	0.232558	14.4	18.7	14.4	No	
3	Ki	4.99999	0.3	0.5	0.3	No	

Рис. 8. Окно КНВ. Нормализация и денормализация сигнала с макета

воздействия), а также для удаленной настройки, речь о которой пойдет ниже. Подключение датчиков осуществляется с помощью аналоговых входов микроконтроллера.

Базовые функции программ макета представлены на рис. 3, обобщенно их можно описать следующими шагами: измерение, фильтрация, управление, подсчет времени (задержка).

Заметим, что алгоритм работы макета системы, приведенный на рис. 3, является частным примером САУ с обратной связью и воспроизводится в лабораторных условиях.

2. Проектирование КНВ на основе программного инструментария – квантовый оптимизатор QCOptKB™. Создание системы управления на базе КНВ осуществляется с использованием программного инструментария “Квантовый оптимизатор”. Рабочее окно этого продукта представлено на рис. 4.

Примечание 1. Снизу на рис. 4 отображена матрица временной корреляции для формирования запутанного состояния, сверху – гистограмма входящего сигнала пропорционального коэффициента.

Технология применения КНВ позволяет объединять в единую систему управления несколько БЗ, и таким образом, позволяя нечетким нейронным сетям работать параллельно, обеспечивая ИСУ дополнительной робастностью.

Рассмотрим возможность применения КНВ для объединения БЗ, полученных на основе различных информационных ресурсов. В качестве таких ресурсов выступает измеряемый сигнал на конечном промежутке времени работы системы, который можно получить из различных источников. Например, с использованием различных математических моделей или физически

Таблица 2. Ситуации управления и параметры математических моделей

Параметры ОУ	Типовая ситуация (С1)	Непредвиденная (С2)
Начальный угол	0	0
Начальная скорость	1	1
Масса тележки	0.56	0.56
Масса маятника	0.63	0.63
Длина маятника	0.05	0.07
Трение в креплении	3.55 + нормированный шум с интенсивностью 0.01 и амплитудой 0.35	3.73 + нормированный шум с интенсивностью 0.01 и амплитудой 0.35
Трение колес	3.63 + гауссовский шум 15%	3.63 + гауссовский шум 15%
Сила упругости	5.54	5.54
Шум в системе управления	Равномерный [–2.15 2.15], интенсивность 0.48	Равномерный [–2.15 2.15], интенсивность 0.48
Шум в системе измерения	Амплитуда 0.22, гауссовский шум, интенсивность 0.01	Амплитуда 0.32, гауссовский шум, интенсивность 0.01
Задержка управляющего воздействия	0.015	0.035

измеряемых сигналов реальных объектов управления, функционирующих в разных окружающих средах и при разных начальных условиях [2, 3]. Ключевым элементом подобной ИСУ является механизм объединения стратегий, заложенных в БЗ. Представленные ранее теоретические основы КНВ были реализованы и апробированы на базе различных математических моделей и реальных объектах управления [4, 5]. При этом практика показала, что для проектирования самоорганизующейся системы, способной функционировать в экстремальных условиях, необходимо применять дополнительный программный инструментарий проектирования КНВ, основанный на новых типах вычислений, таких, как квантовые мягкие вычисления [3]. Общая методология проектирования КНВ представлена на рис. 5.

В таком контексте можно выделить три типа КНВ на базе различных источников:

БЗ, полученных с помощью математических моделей;

БЗ, найденных с использованием физически измеряемого сигнала управления;

совместное применение различных информационных ресурсов.

Проведенные исследования показали, что наилучшим качеством управления обладают квантовые регуляторы (КР) на основе различных информационных ресурсов [2].

Далее для проектирования КНВ будем использовать БЗ1 и БЗ4, разработанные в соответствии с технологией мягких вычислений на оптимизаторе БЗ [7, 8, 13] (рис. 6).

Сравнение приведенных БЗ рассмотрено в табл. 1.

Перед тем как приступить к созданию КНВ, необходимо получить гистограммы распределения выходных сигналов (коэффициентов усиления) НР (рис. 7).

Для этого проводится серия экспериментов и моделирования в типовой ситуации управления. Используя полученные значения коэффициентов усиления при работе модели и макета, формируется массив данных для построения гистограмм коэффициентов усиления нечетких ПИД-регуляторов. Построение гистограмм происходит автоматически при загрузке данных в

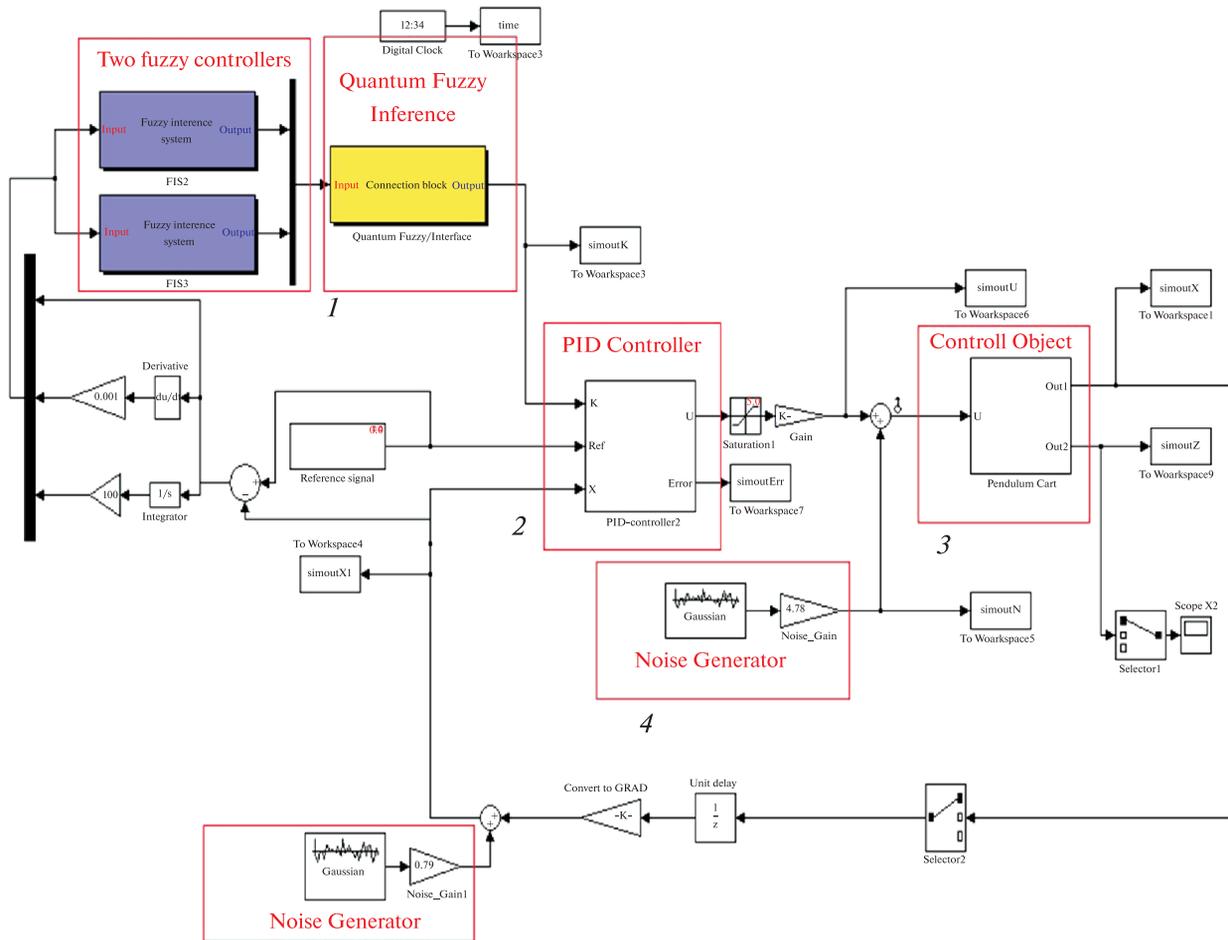


Рис. 9. Структура системы моделирования в среде MatLab/Simulink: 1 – Блок КНВ; 2 – ПИД-регулятор; 3 – ОУ; 4 – генераторы шумов

квантовый оптимизатор. В дальнейшем эти гистограммы применяются в алгоритме КНВ для формирования виртуальных состояний (рис. 7).

В эксперименте на макете используются гистограммы коэффициентов усиления, полученные экспериментально, а гистограммы коэффициентов усиления, найденные с помощью математического моделирования, применяются в формировании КНВ для моделирования управления роботом. На рис. 7 представлены гистограммы коэффициентов полученных с FC1 и FC4.

После создания новой модели регулятора и загрузки данных в квантовый оптимизатор выбирается вид квантовой корреляции между коэффициентами усиления. Формирование запутанных состояний осуществляется на основе выбранной корреляционной матрицы, которая отображается в рабочем окне оптимизатора (рис. 4).

На следующем шаге устанавливаются соответствующие максимальные и минимальные значения для входных и выходных сигналов КНВ в специальном окне программы (рис. 8).

На заключительном шаге проектирования производится настройка шкалирующих коэффициентов усиления выходных сигналов КНВ с использованием генетического алгоритма (ГА) и математической модели для подбора наилучшего решения.

3. Моделирование и эксперимент автономных ИСУ на основе КНВ. Перейдем к практическому применению разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора. Рассмотрим классическую задачу системы стабилизации “каретка перемещения—перевернутый маятник”, модель и макет которой приведены в [7, 13, 15, 16].

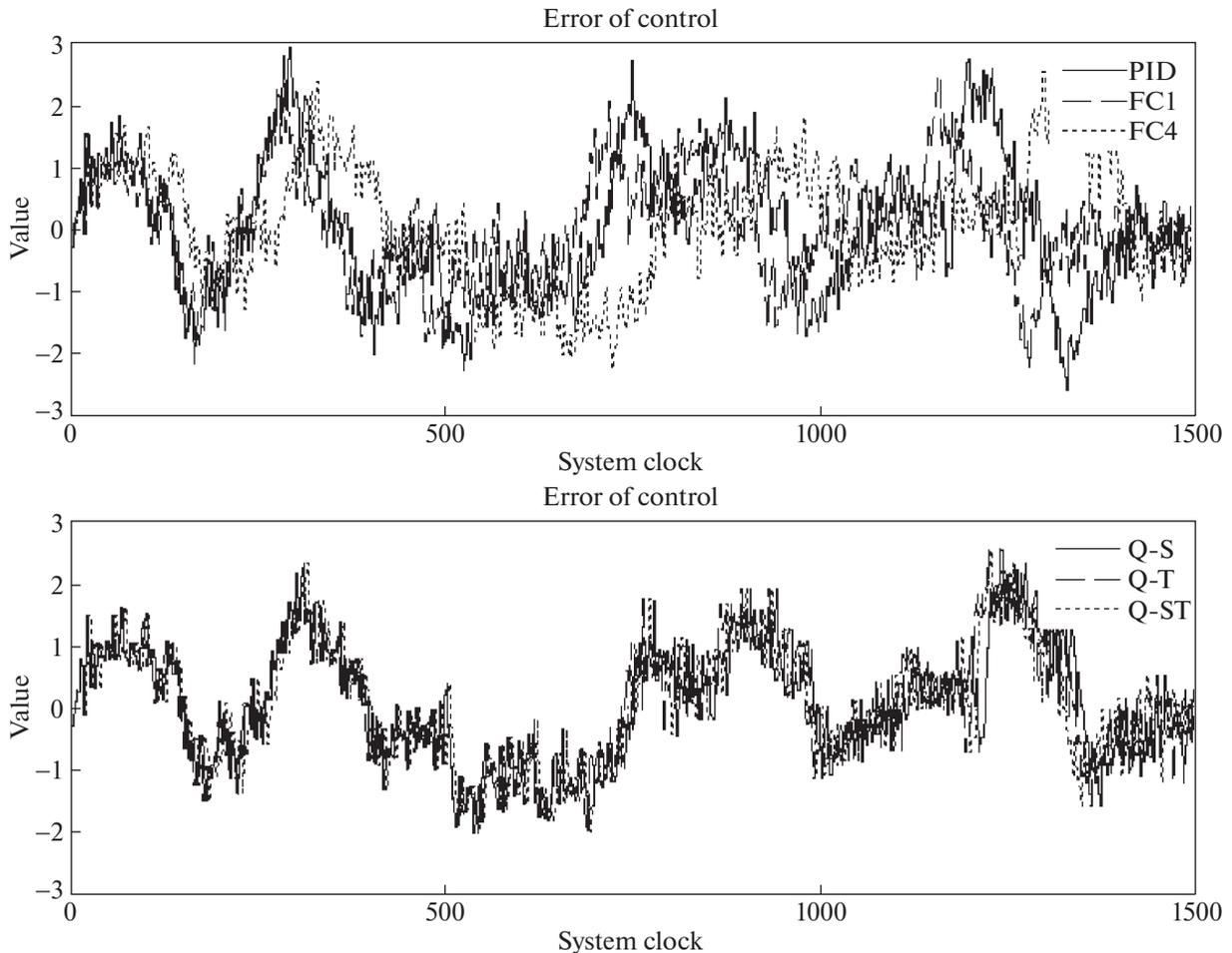


Рис. 10. Угол отклонения математической модели. Типовая ситуация управления (C1). Моделирование

Опишем результаты математического моделирования и физического эксперимента в двух ситуациях управления:

в первой (типовой) ситуации (C1) задержка управляющего сигнала стандартная – 0.015 с;

во второй непредвиденной ситуации (C2) задержка управляющего сигнала – 0.035 с (увеличенная в 3 раза).

В табл. 2 представлены параметры математической модели для C1 и C2.

Примечание 2. Размерность физических величин в табл. 2 приведена в системе СИ и имеет размерность вид (м, с, м/с, Н) для перемещения, времени, скорости и силы соответственно. Шумы генерируются формирующими фильтрами, и дополнительной информации о характеристиках шумов не требуется, так как шумы применяются только для формирования робастных БЗ НР.

На рис. 9 приведена структура системы моделирования, выполненная в среде *MatLab/Simulink*.

Результаты моделирования регуляторов в типовой ситуации управления проиллюстрированы на рис. 10 и 11.

Рассмотрим связь между входными и выходными значениями КНВ на примере пропорционального коэффициента усиления. На рис. 12 представлены входные значения КНВ (коэффициенты усиления FC1 и FC4) и выходное значение пропорционального коэффициента КНВ при временной корреляции.

На рис. 13 показаны фазовые портреты моделируемых систем.

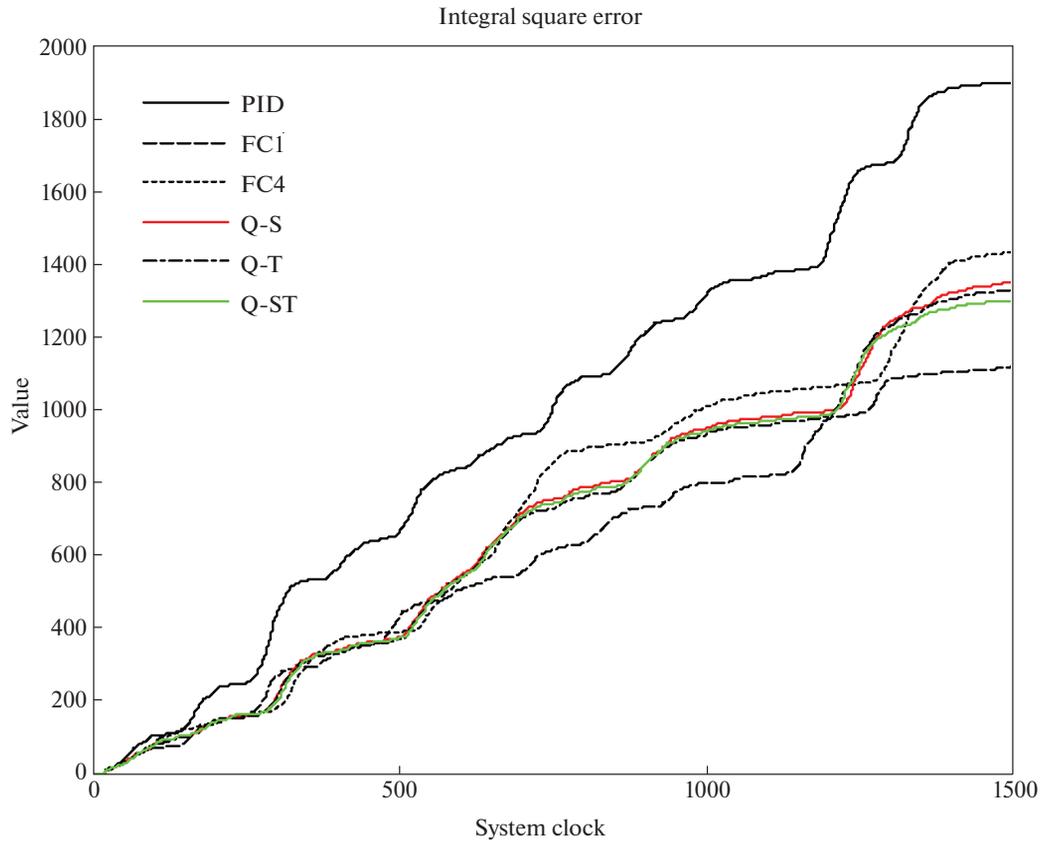


Рис. 11. Интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления (C1). Моделирование

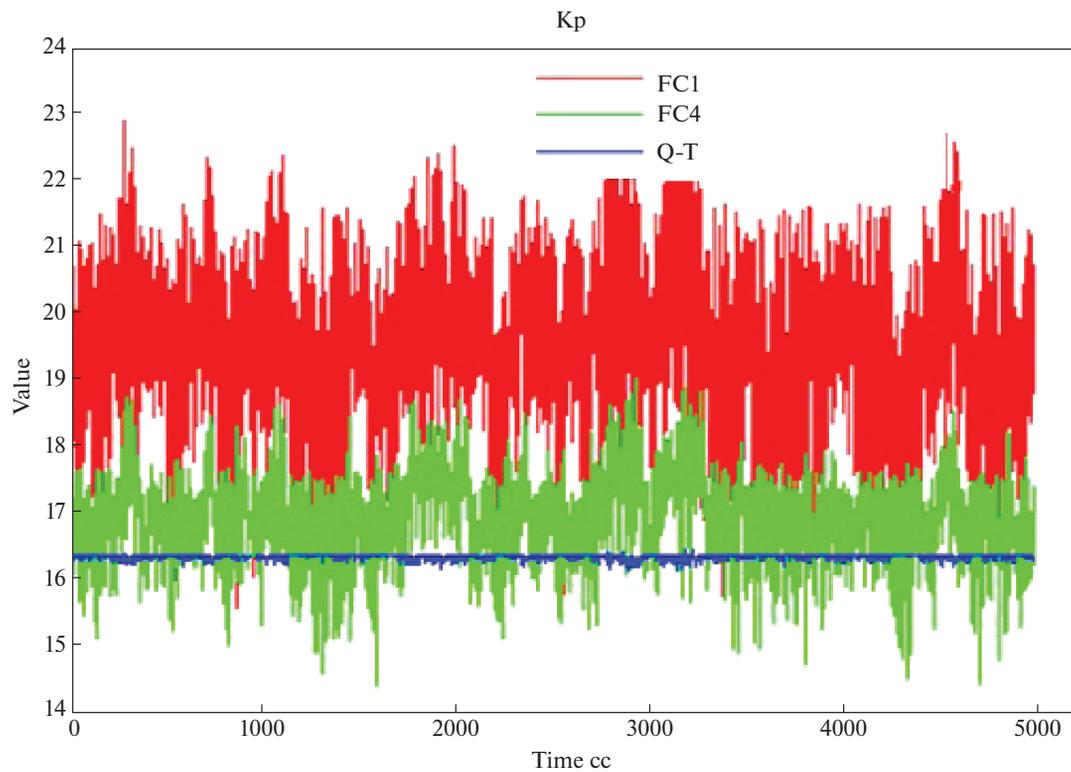


Рис. 12. Пропорциональный коэффициент усиления. Входные и выходные значения КНВ. Моделирование в типовой ситуации управления

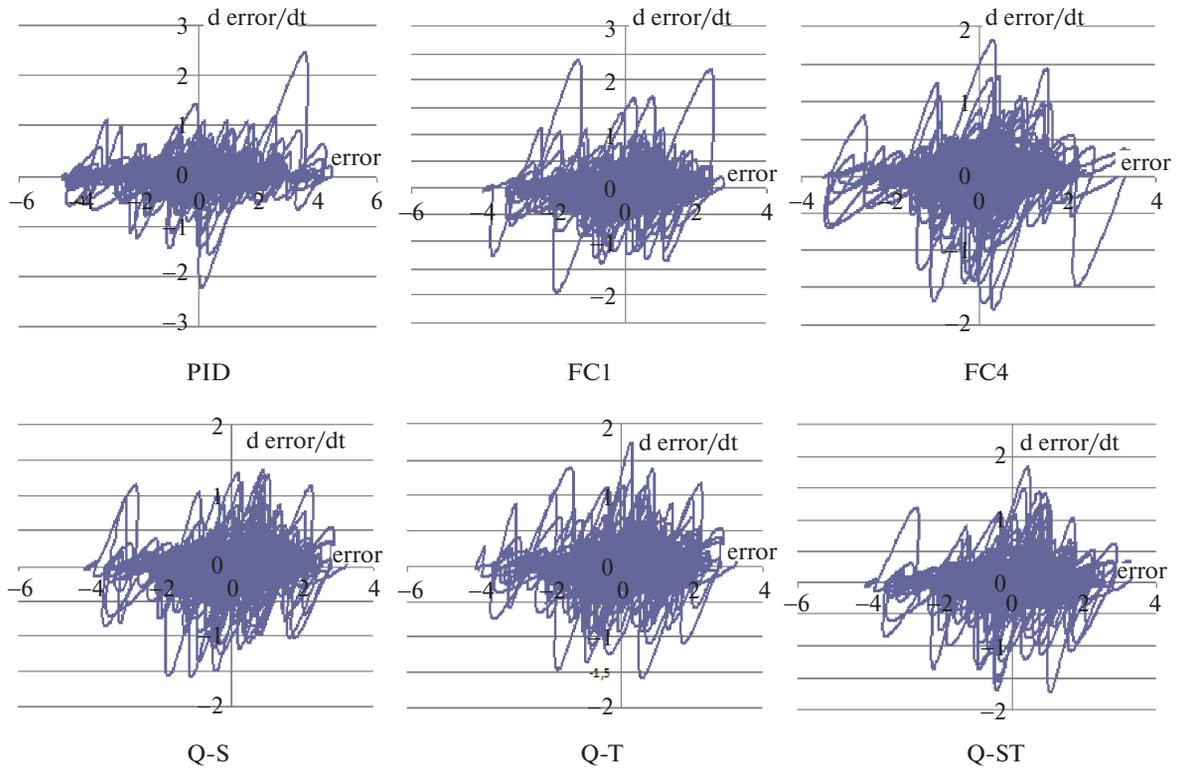


Рис. 13. Фазовые портреты моделируемых контроллеров

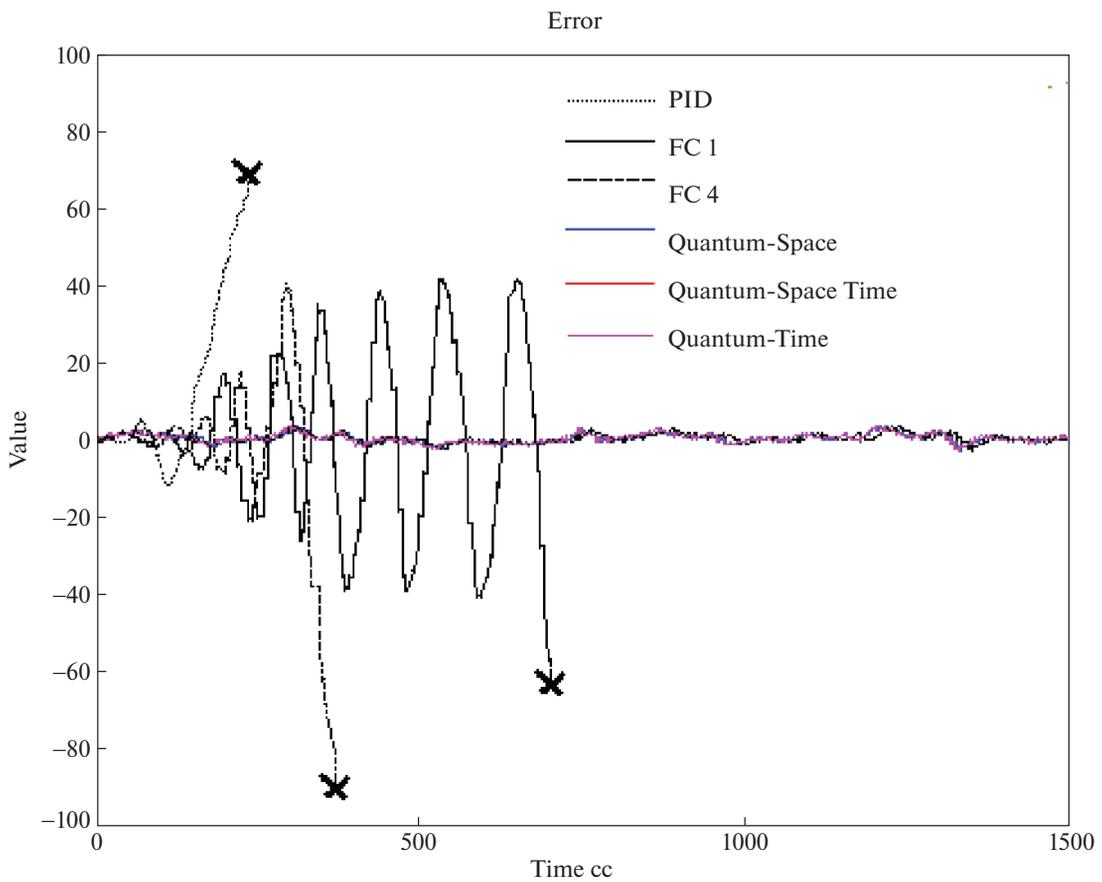


Рис. 14. Угол отклонения математической модели. Непредвиденная ситуация управления. Моделирование

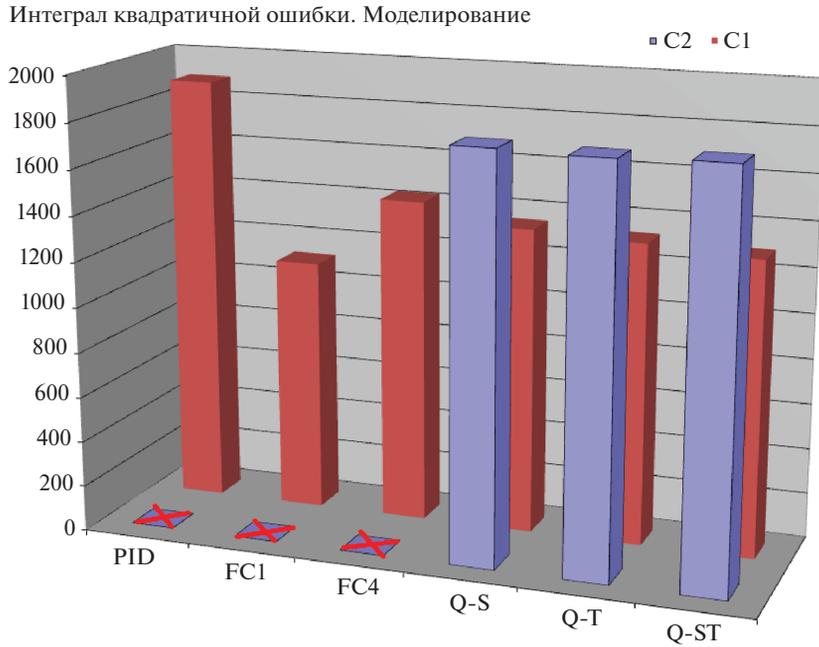


Рис. 15. Интеграл квадратичной ошибки. Непредвиденная и типовая ситуации управления. Моделирование, где FC1–FC4 – нечеткие регуляторы, и сокращения: Q – quantum, S(Space) – пространственная, T(Time) – временная, ST(SpaceTime) – пространственно-временная корреляции

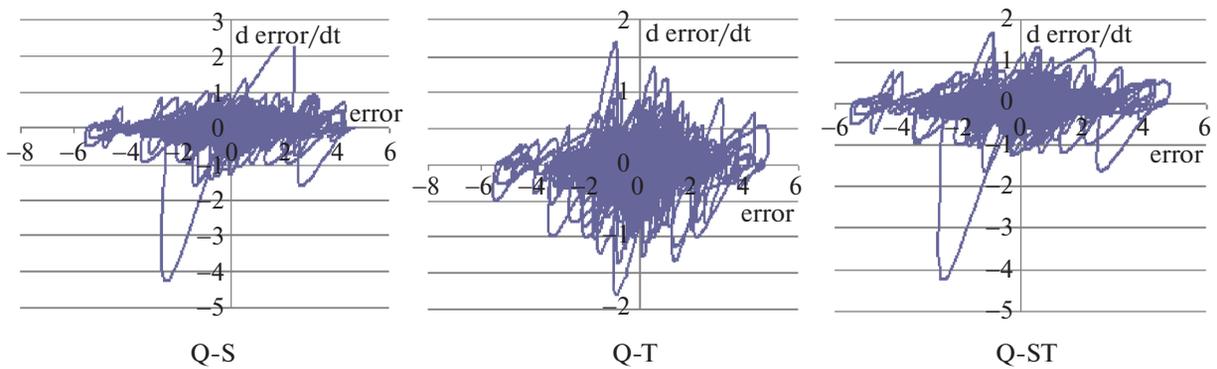


Рис. 16. Фазовые портреты модели с квантовыми НР в непредвиденной ситуации управления (C2). Моделирование

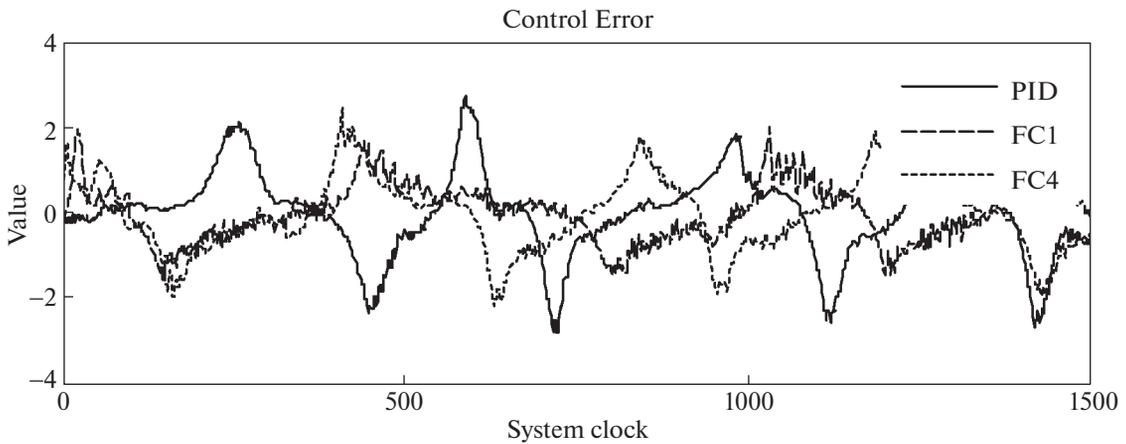


Рис. 17. Угол отклонения макета. Типовая ситуация управления. Эксперимент

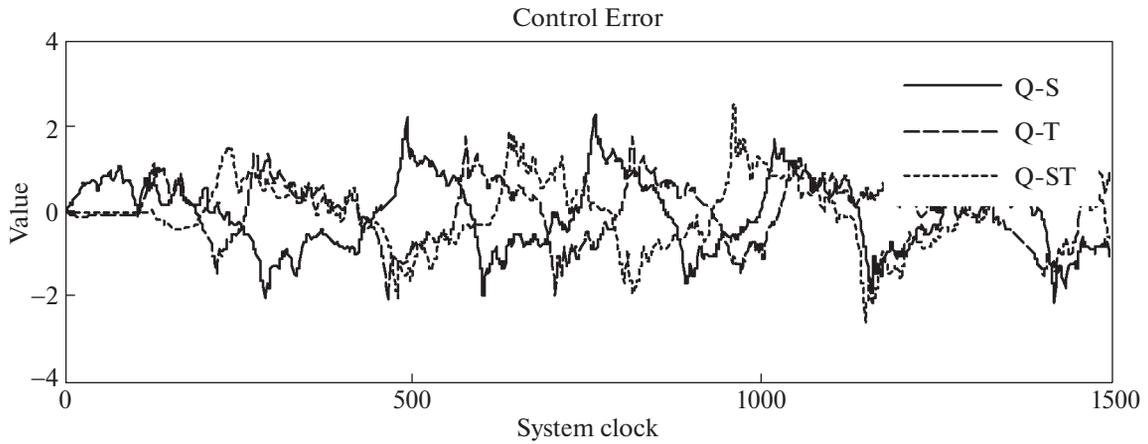


Рис. 18. Угол отклонения макета. Типовая ситуация управления. Эксперимент

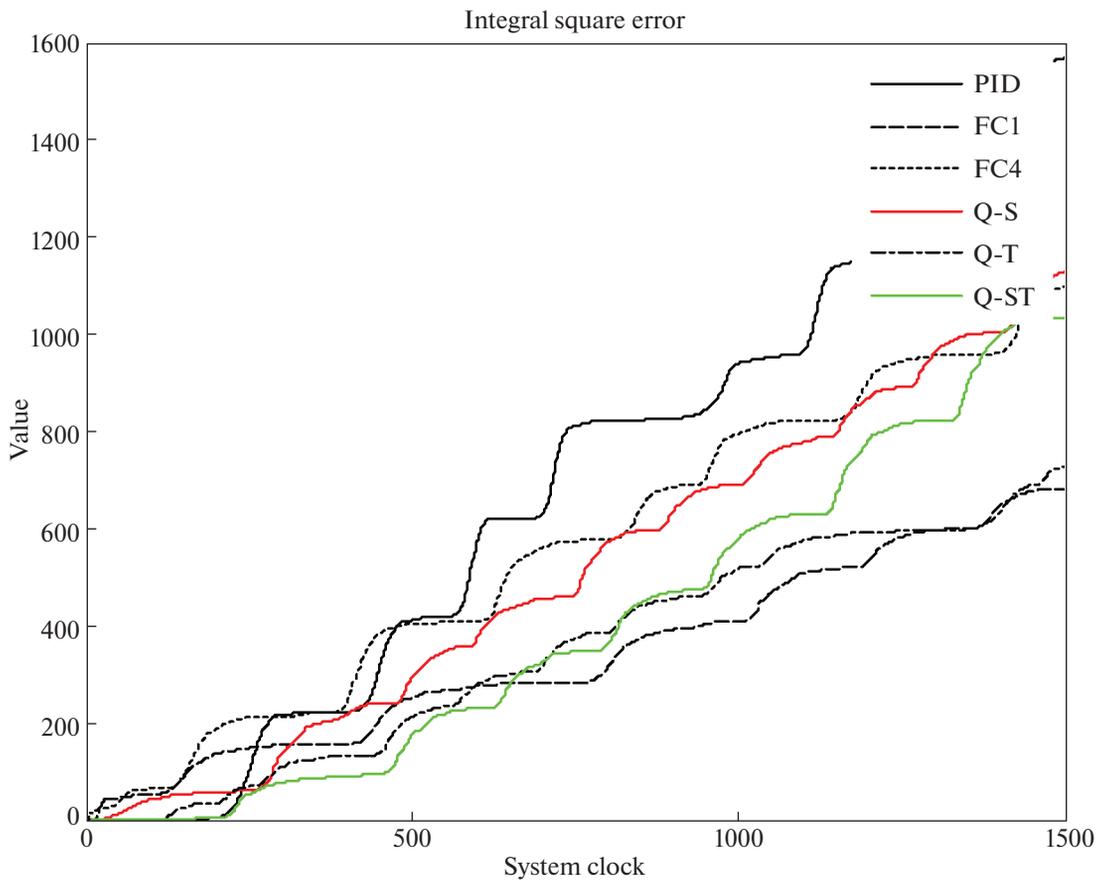


Рис. 19. Интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления. Эксперимент

Далее на рис. 14 представлены результаты моделирования в непредвиденной ситуации управления.

На рис. 15 описана общая диаграмма интеграла квадратичной ошибки моделирования.

На рис. 14 можно заметить, что значение интегральной ошибки КР располагается между нечеткими контроллерами, образовавшими КНВ.

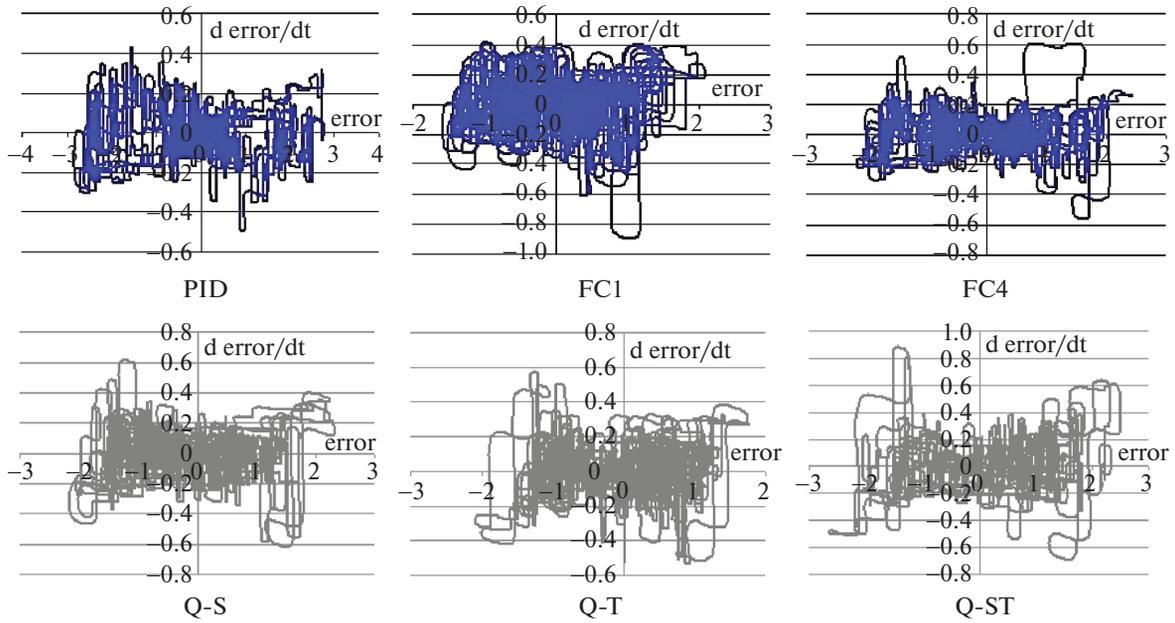


Рис. 20. Фазовые портреты регуляторов в типовой ситуации управления. Эксперимент

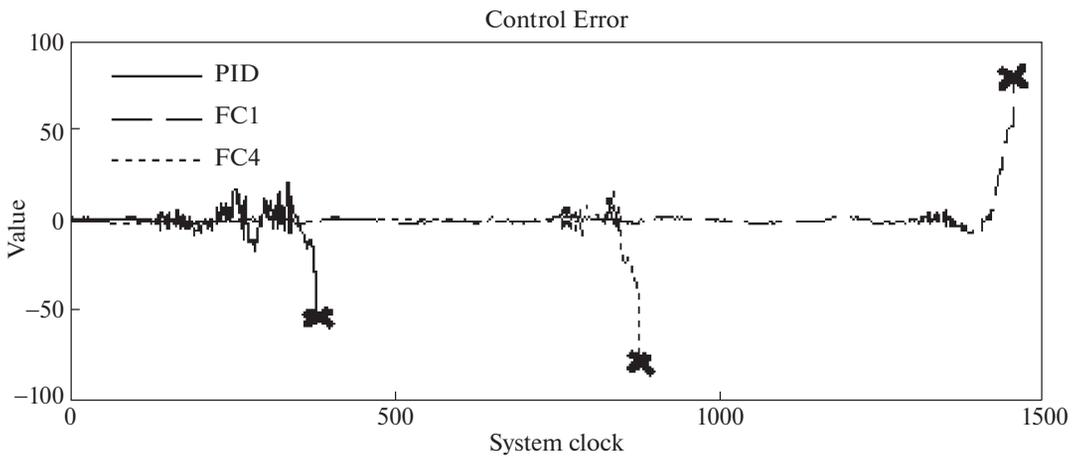


Рис. 21. Угол отклонения макета. Нештатная ситуация управления. Эксперимент

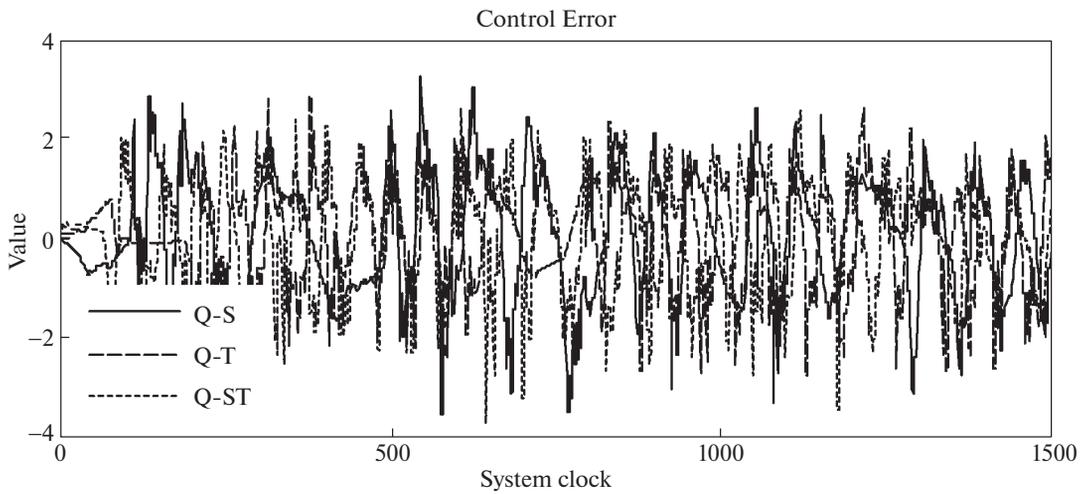


Рис. 22. Угол отклонения макета. Нештатная ситуация управления. Эксперимент

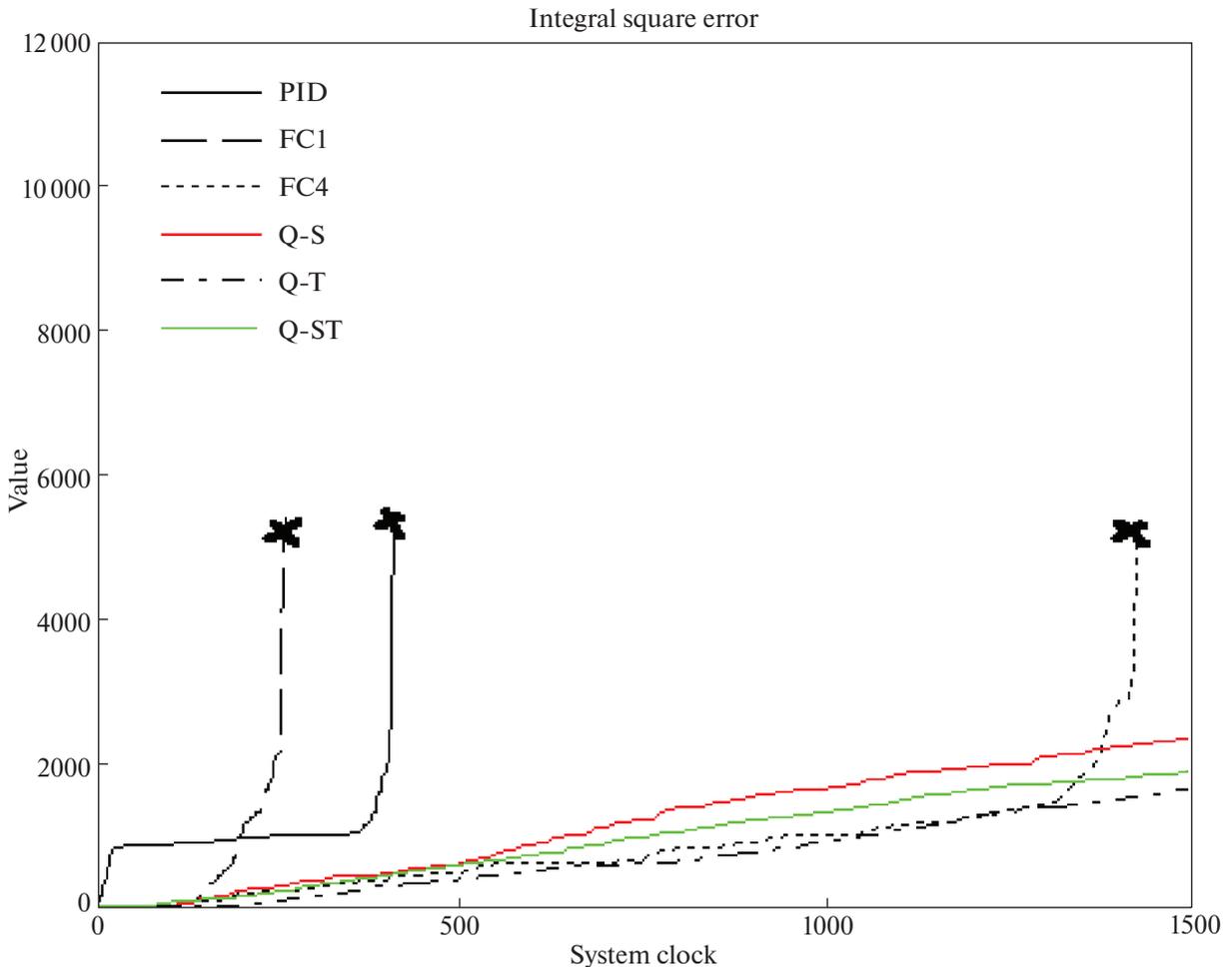


Рис. 23. Интеграл квадратичной ошибки. Нештатная ситуация управления. Эксперимент

Проведем физический эксперимент на реальном ОУ в типовой ситуации управления. На рис. 16–20 рассмотрены результаты экспериментов.

Проведем эксперимент на реальном ОУ в нештатной ситуации управления (С2).

На рис. 21–25 представлены результаты экспериментов.

Как показывают результаты моделирования и эксперимента, разработанная методология объединения стратегий управления позволяет эффективно справляться с задачами управления даже в экстремальных условиях, в которых с задачей управления не справляются НР, лежащие в основе КНВ. Важно отметить, что система управления на основе КНВ наследует лучшие характеристики качества управления от БЗ НР, добавляя способность к самоорганизации.

Примечание 3. Приведенные результаты существенно отличаются от известных из литературных источников [18–33], в которых отсутствуют результаты экспериментальной проверки эффективности применения квантовых вычислений на реальных физических ОУ.

Таким образом показана эффективность и необходимость применения квантовых вычислений и алгоритмов управления не только для квантовых систем, но и для классических ОУ. Открытый в [6–9] эффект квантовой самоорганизации неточных БЗ за счет извлечения скрытой квантовой информации экспериментально проверен и установлен в экспериментах для многих сложных плохо формализуемых и слабоструктурированных физических ОУ.

Заключение. Технология применения квантового оптимизатора БЗ обеспечивает систему дополнительным свойством робастности только с помощью программно-алгоритмического обеспечения. Проведенные эксперименты показали, что интеллектуальное управление позволяет выполнять настройку даже сложных объектов управления с несколькими контурами обратной

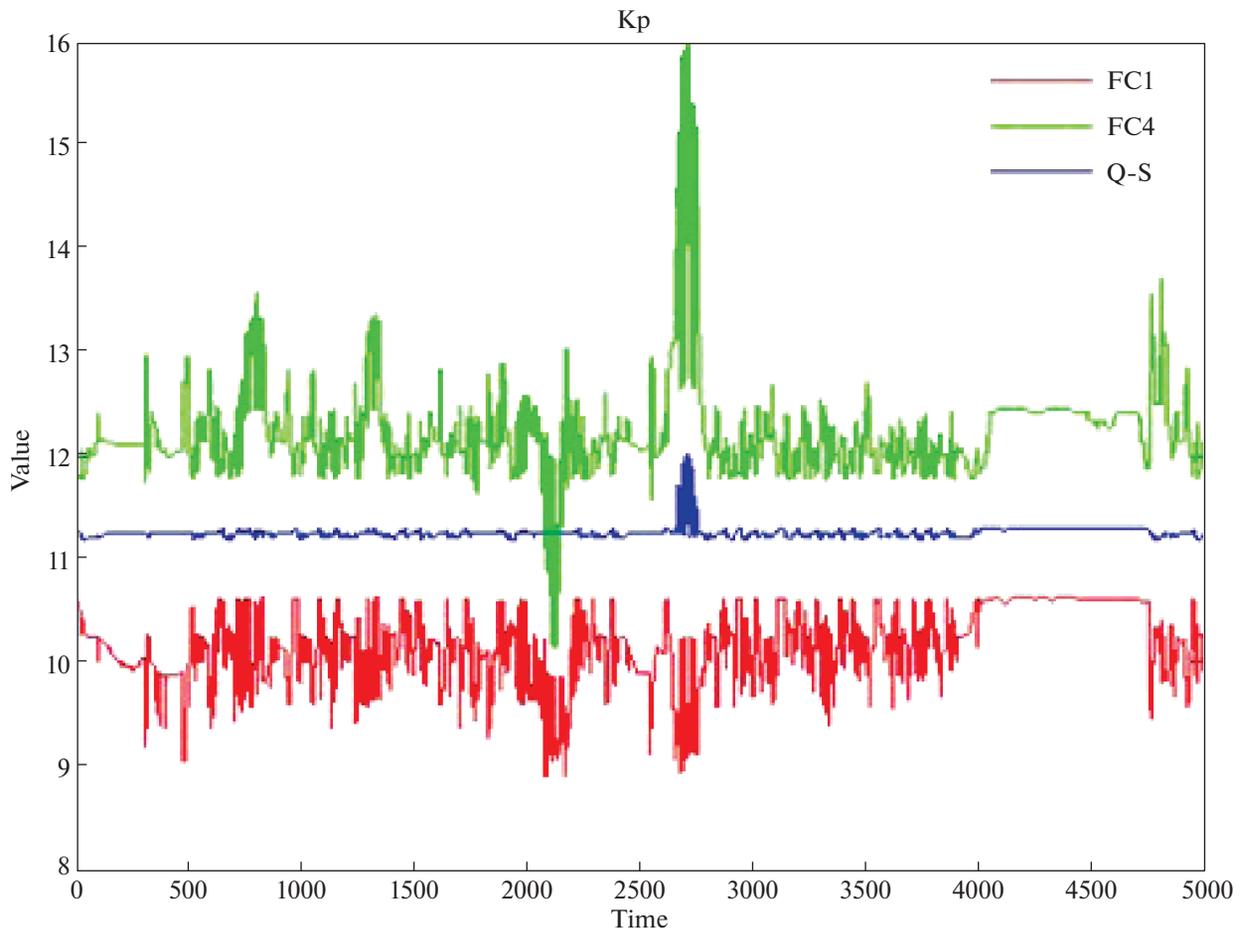


Рис. 24. Пропорциональный коэффициент усиления квантового регулятора на основе БЗ с макета и модели. Эксперимент в нештатной ситуации

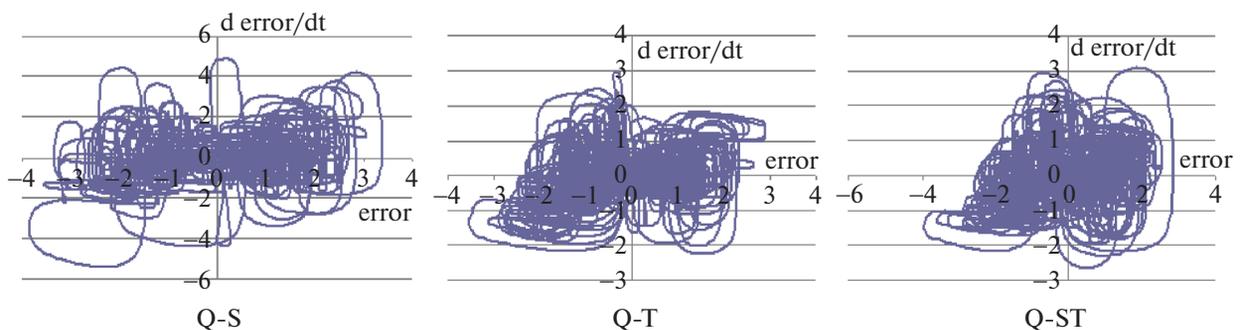


Рис. 25. Фазовые портреты квантовых НР в нештатной ситуации управления. Эксперимент

связи. Продемонстрировано, что квантовый НР в реальных условиях на реальных физических ОУ справляется с задачей управления сложным ОУ на достаточно высоком уровне, где классический регулятор и НР не обладают требуемым качеством управления. Установленный эффект подтверждает реализацию принципа квантовой самоорганизации БЗ за счет использования алгоритма КНВ, разработанного в [3, 4, 6, 7]. Показано применение квантовых вычислений на классическом процессоре в режиме реального времени. Результаты моделирования и экспериментов доказывают полезность и эффективность скрытой квантовой информации, извлекаемой из классических состояний коэффициентов усиления, в процессах управления [34, 35].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ulyanov S.V.* System for Intelligent Control Based on Soft Computing // US patent No 6,415,272 B1, 2003.
2. *Ulyanov S.V.* Soft Computing Optimizer of Intelligent Control System Structures // US Patent No 7,219,087 B2, 2007.
3. *Ulyanov S.V.* System and Method for Control Using Quantum Soft Computing // US Patent No 6,578,018 B1, 2003.
4. *Ulyanov S.V.* Self-organizing Quantum Robust Control Methods and Systems for Situations with Uncertainty and Risk // US Patent No 8788450 B2, 2014.
5. *Reshetnikov A.G., Ulyanov S.V., Zrellov P.V., Zrellova D.P.* INTELLIGENT COGNITIVE ROBOTICS V. III. Quantum Computational Toolkit of Quantum Self-organized Intelligent Control System Simulator: Quantum deep Learning on Quantum-inspired Neural Network and Quantum Genetic Algorithms. M.: Kurs, 2023.
6. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Hagiwara T.* Design of Self-organized Intelligent Control System Based on Quantum Fuzzy Inference: Intelligent System of Systems Engineering Approach // Proc. IEEE Intern. Conf. on System, Man and Cybernetics (SMC'2005). Hawaii. USA, 2005. V. 4. P. 3835–3840.
7. *Litvintseva L.V., Ulyanov I.S., Ulyanov S.V., Ulyanov S.S.* Quantum Fuzzy Inference for Knowledge Base Design in Robust Intelligent Controllers // J. Computer and Systems Sciences Intern. 2007. V. 46. № 6. P. 908–961.
8. *Litvintseva L.V., Ulyanov S.V.* Intelligent Control System. I. Quantum Computing and Self-organization Algorithm // J. Comp. and Sys. Sciences Intern. 2009. V. 48. № 6. P. 946–984.
9. *Ulyanov S.V.* Quantum Self-organization of Imperfect Knowledge Bases: Quantum Intelligent Force Control and Information-thermodynamic Law of Extracted Informed Useful Work. Intelligent Cognitive Robotics. V. 2. M.: Kurs, 2022.
10. *Бутенко А.В., Зрелов П.В., Кореньков В.В., Костромин С.А., Никифоров Д.Н., Решетников А.Г., Семашко С.В., Трубников Г.В., Ульянов С.В.* Интеллектуальная система дистанционного управления давлением и расходом жидкого азота в криогенной системе сверхпроводящих магнитов: программно-аппаратная платформа // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20. № 2. С. 247.
11. *Korenkov V.V., Reshetnikov A.G., Ulyanov S.V., Zrellov P.V., Zrellova D.P.* Self-Organized Intelligent Quantum Controller: Quantum Deep Learning and Quantum Genetic Algorithm – QSCOptKB™ Toolkit // Proc. 6th Intern. Workshop on Deep Learning in Computational Physics (DLCP2022). Dubna, 2022.
12. *Ульянов С.В., Решетников Г.П.* Технологии интеллектуальных вычислений: Мягкие и дробные вычисления в интеллектуальном управлении: Учебно-метод. пособие. Дубна: ОИЯИ, 2013. 244 с.
13. *Ульянов С.В., Решетников А.Г., Решетников Г.П.* Технологии интеллектуальных вычислений: Квантовые вычисления и программирование в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления. Дубна: ОИЯИ, 2015. 246 с.
14. *Ulyanov S.V., Reshetnikov A.G., Zrellova D.P.* Industrial Robotic Intelligent Robust Control System: Applying Quantum Soft Computing Technologies and Quantum Software Engineering in Unpredicted Control Situations // Программные продукты и системы. 2023. V. 36. № 1. P. 197–206. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.141.197-206>
15. *Litvintseva L.V., Karatkevich S.G., Ulyanov S.V.* Intelligent Control System. II. Design of Self-organized Robust Knowledge Bases in Contingency Control Situations // J. Computer and Systems Sciences Intern. 2011. V. 50. № 2. P. 250–292.
16. *Ulyanov S.V., Ulyanov V.S., Reshetnikov A.G.* Physical Rigidity and Mathematical Correctness of the Intelligent Robot Model: Adequacy to a Physical Object and Accuracy of Motion Dynamic System Equations – Method of Deep Machine Learning Based on Lagrangian Neural Networks // System Analysis in Science and Education. 2021. № 1. P. 1–41 (In Russ). Available from: <http://sanse.ru/download/458>.
17. *Litvintseva L.V., Ulyanov S.V., Ulyanov S.S.* Design of Robust Knowledge Bases of Fuzzy Controllers for Intelligent Control of Substantially Nonlinear Dynamic Systems: II. A Soft Computing Optimizer and Robustness of Intelligent Control Systems // J. Computer and Systems Sciences Intern. 2006. V. 45. № 5. P. 744–771.
18. *Dong D., Chen Ch., Chen Z., Zhang Ch.* Quantum Mechanics Helps in Learning for More Intelligent Robots // Chin. Phys. Lett. 2006. V. 23. № 7. P. 1691–1694.
19. *Lukac M., Perkowski M.* Inductive Learning of Quantum Behaviors // Facta Universitatis. 2007. V. 20. № 3. P. 561–586.
20. *Kagan E., Ben G.I.* Navigation of Quantum-controlled Mobile Robots // Recent Advances in Mobile Robotics. 2011. V. 15. P. 311–220.
21. *Bannikov A., Egerton S., Callaghan V., Johnson B.D.* Quantum Computing: Non-deterministic Controllers for Artificial Intelligent Agents // Proc. 5th Intern. Wokshop Artif. Intell. Techniques for Ambient Intelligence (AITAm'10). Kuala Lumpur. Malasia, 2010.
22. *Chatzis S.P., Korkinof D., Demiris Y.* A Quantum-statistical Approach Toward Robot Learning by Demonstration. // IEEE Transactions on Robotics. 2012. V. 28. № 6. P. 1371–1381.

23. *Mannone M., Seidita V., Chella A.* Categories, Quantum Computing, and Swarm Robotics: A Case Study // *Mathematics*. 2022. V. 10. P. 372. <https://doi.org/10.3390/math10030372>
24. *Li Y., Hghvami A., Dong D.* Intelligent Trajectory Planning in UAV-mounted Wireless Networks: A Quantum-Inspired Reinforcement Learning Perspective // *arXiv:2007.13418v2 [eess.SP]* 2 Mar 2021.
25. *Kumar A., Pacheco D., Kaushik K., Rodrigues J.* Futuristic View of the Internet of Quantum Drones: Review, Challenges and Research Agenda // *Vehicular Communications*. 2022. V. 36. P. 100487. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100487>
26. *Li J.-A., Dong D., Wei Z., Liu Y.* Quantum Reinforcement Learning During Human Decision Making // *Nature Human Behaviour*. 2020. V. 4. P. 294–307. URL: www.nature.com/nathumbbehav.
27. *Lamata L., Qaudrelli M., W. de Silva C., Kumar P.* Quantum Mechatronics // *Electronics*. 2021. V. 10. P. 2483. <https://doi.org/10.3390/electronics10202483>
28. *Qiao L.-F., Gao J., Jiao Z., Zhang Z.* Quantum Go Machine // *arXiv:2007.12186v1 [quant-ph]* 23 Jul 2020.
29. *Widdows D., Rani J., Pothos E.* Quantum Circuit Components for Cognitive Decision Making // *arXiv:2302.03012v1 [quant-ph]* 6 Feb 2023.
30. *Domino K., Konioreczyk M., Krawiec K., Jalowiecki K.* Quantum Annealing in the NISQ Era: Railway Conflict Management // *Entropy*. 2023. V. 25. P. 191. <https://doi.org/10.3390/e25020191>
31. *Huang, Z., Li Q., Zhao J., Song M.* Variational Quantum Algorithm Applied to Collision Avoidance of Unmanned Aerial Vehicles // *Entropy*. 2022. V. 24. P. 1685; <https://doi.org/10.3390/e24111685>
32. *Atchade P., Alonso-Linaje G., Albo-Canals J., Casado-Fauli D.* qRobot: A Quantum Computing Approach in Mobile Robot Order Picking and Batching Problem Solver Optimization // *Algorithms*. 2021. V. 14. P. 194. <https://doi.org/10.3390/a14070194>
33. *Vella F., Chella A., Gaglio S., Pilato G.* A Quantum Planner for Robot Motion // *Mathematics*. 2022. V. 10. P. 2475. <https://doi.org/10.3390/math10142475>
34. *Korenkov V.V., Reshetnikov A.G., Ulyanov S.V., Zrellov P.V., Zrellova D.P.* Self-Organized Intelligent Quantum Controller: Quantum Deep Learning and Quantum Genetic Algorithm – QSCOptKBTM Toolkit // *Proc. 6th Intern. Workshop on Deep Learning in Computational Physics (DLCP2022)*. Dubna. JINR, 2022.
35. *Кореньков В.В., Решетников А.Г., Ульянов С.В., Зрелов П.В., Зрелова Д.П.* Интеллектуальное роботизированное управление в экстремальных ситуациях на основе квантовых самоорганизующихся контроллеров // *Сб. тез. 33-й междунар. научно-техн. конф. “Экстремальная робототехника”*. С.-П., 2021. С. 224–225.