

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВЫМ ОБЪЕКТОМ. Ч. 2: ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

**Керимов Тимур Александрович¹, Решетников Андрей Геннадьевич²,
Ульянов Сергей Викторович³**

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: T.Kerimov@hotmail.com.

² 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: reshetnikovag@pochta.ru.

³ 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 работе рассматривается технология проектирования интеллектуальной системы управления на основе квантового нечеткого вывода. Программно-аппаратная реализация квантового нечеткого вывода осуществляется на основе двух нечетких регуляторов, рассмотренных в первой части статьи. Проводится сравнение результатов физического эксперимента ПИД-регулятора, нечетких регуляторов и квантовых нечетких регуляторов с различными типами квантовых и классических корреляций. Настройка квантовых регуляторов производится при помощи удаленного соединения с объекта управления в реальном времени.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, квантовый нечеткий вывод, нечеткий регулятор, робастная база знаний, удаленное соединение.

INTELLIGENT ROBUST CONTROL OF DYNAMIC UNSTABLE OBJECT. PT. 2: QUANTUM COMPUTING TECHNOLOGY

Kerimov Timur¹, Reshetnikov Andrey², Ulyanov Sergey³

¹ PhD student;

DubnaInternationalUniversity of Nature, Society and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: T.Kerimov@hotmail.com.

² PhD student;

DubnaInternationalUniversity of Nature, Society and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: reshetnikovag@pochta.ru.

³ Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

DubnaInternationalUniversity of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

This paper presents the technology of designing intelligent control system based on quantum fuzzy inference. The hardware and software implementation of quantum fuzzy inference is based on two fuzzy controllers that discussed in the first section. Comparing of the results of physical experiments PID-controller, fuzzy controller and quantum fuzzy controllers with different types of quantum and classical correlations. Tuning the quantum controllers made by means of a remote connection to the control object in real time.

Keywords: intelligent control, quantum fuzzy inference, fuzzy controller, quantum optimizer, robust knowledge base, remote connection.

Введение

Практика и результаты моделирования реальных объектов показали, что в условиях неопределенности или неточности исходной информации, непредвиденных ситуациях или информационного риска традиционный (использующий принцип глобальной отрицательной обратной связи) и широко применяемый в промышленности ПИД-регулятор часто не справляется с поставленной задачей управления. В тоже время, решение задачи о глобальной робастности ПИД-регулятора до настоящего времени неизвестно, несмотря на актуальность данной проблемы.

Использование нечетких регуляторов (НР) совместно с ПИД-регулятором привело к созданию гибридных нечетких ИСУ с различными уровнями интеллектуальности в зависимости от полноты и корректности спроектированной базы знаний (БЗ). Использование технологии мягких вычислений (основанной на генетических алгоритмах и нечетких нейронных сетях) расширило области эффективного применения НР за счет добавления новых функций в виде обучения и адаптации. Однако в общем случае нештатных ситуаций управления очень трудно спроектировать глобально «хорошую» и робастную структуру ИСУ.

Данное ограничение особенно характерно для непредвиденных ситуаций управления, когда объект управления (ОУ) функционирует в резко изменяющихся условиях (отказ датчиков или шум в измерительной системе, наличие времени задержки сигналов управления или измерения, резкое изменение структуры ОУ или её параметров и т.п.).

Решение такого рода проблем может быть найдено на основе введения принципа самоорганизации БЗ в процесс проектирования НР, который реализуется и программно поддерживается разработанной моделью квантового нечеткого вывода (КНВ) с применением методологии квантовых мягких вычислений и системной инженерией – System of System Engineering (синергетический принцип самоорганизации) [1-2].

Предлагаемая модель КНВ использует частные индивидуальные БЗ НР, каждая из которых получается с помощью оптимизатора баз знаний (ОБЗ) на мягких вычислениях для соответствующих условий функционирования ОУ и фиксированных ситуаций управления во внешней случайной среде. Процесс проектирования частных индивидуальных БЗ НР с помощью программного инструментария ОБЗ для заданных ситуаций управления осуществляется в соответствии с технологией проектирования ИСУ и подробно рассмотрен в [3].

Структура и основные функции квантового нечеткого вывода

Основной задачей, решаемой КНВ, является формирование БЗ с повышенным уровнем робастности из конечного множества БЗ для НР, сформированных с применением технологии мягких вычислений. Рассмотрим кратко функциональную структуру и работу основных блоков КНВ. В качестве примера, без потери общности результата, обсудим процессы извлечения скрытой квантовой информации, обработки данных и формирования робастной БЗ НР, используя БЗ двух НР, спроектированных для фиксированных (отличных друг от друга) ситуаций управления. На рис. 1 показана функциональная структура модели КНВ.

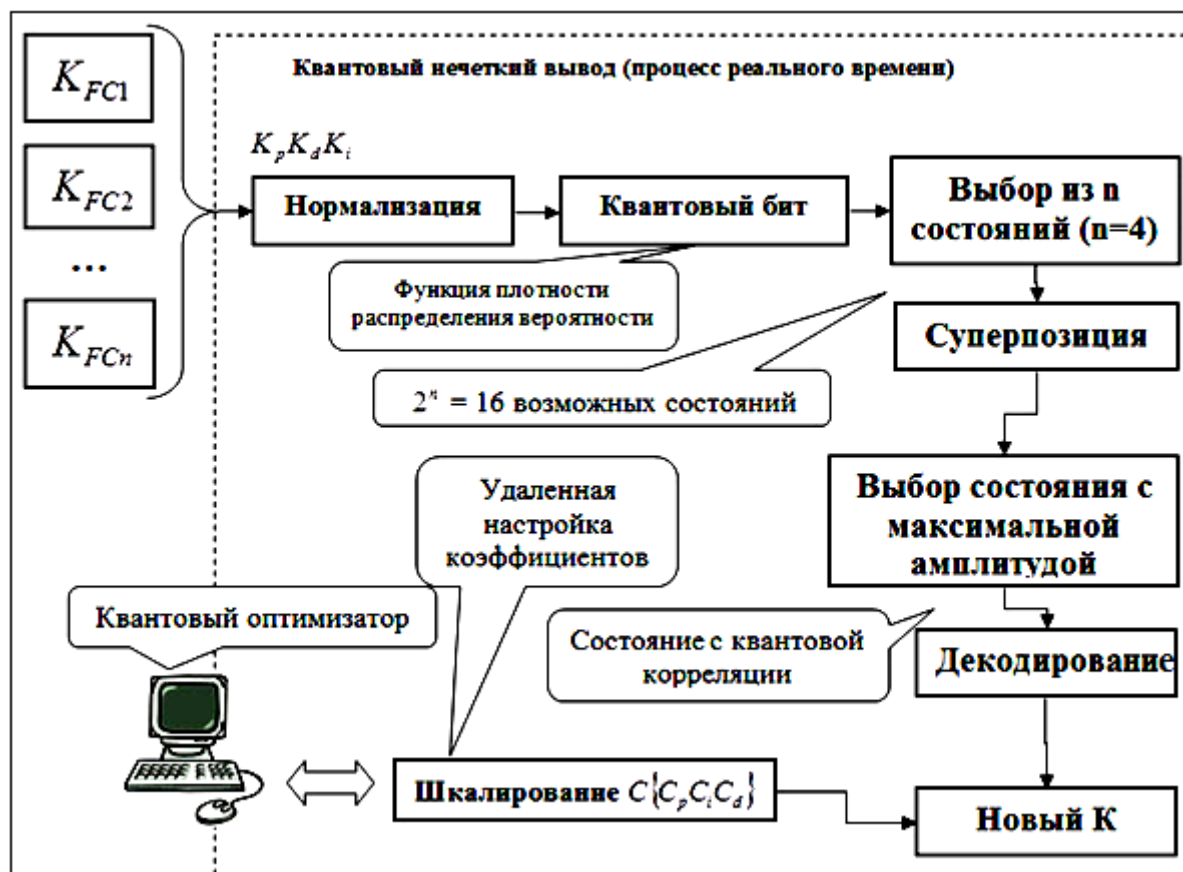


Рис. 1. Функциональная структура КНВ в процессе реального времени

На вход КНВ в реальном времени поступают сигналы управления от сформированных заранее БЗ НР (шаг «Начальное состояние» рис.1). Следующим шагом является процесс нормализации (блок 1 на рис.1) полученных сигналов в интервале $[0, 1]$ путем деления амплитуд траектории сигналов управления на максимальные амплитуды (блок 1 на рис.1). После нормировки сигналов осуществляется формирование квантовых битов (блок 2 на рис.1) из текущих значений нормированных сигналов управления. С этой целью предварительно определяется функция плотности распределения вероятности по представленным выборочным траекториям сигналов управления. Далее путем интегрирования полученной функции плотности распределения вероятности определяются интегральные функции распределения вероятностей (блок 2 на рис. 1). Полученные таким образом функции распределения вероятности позволяют выделить «виртуальные» состояния $|1\rangle$ сигналов управления для формирования суперпозиции с помощью преобразования Адамара из текущего состояния введенных сигналов управления.

При этом используется закон вероятности типа $P|0\rangle + 1 - P(|1\rangle) = 1$, где $P|0\rangle$ и $1 - P|1\rangle$ – вероятности текущего реального и виртуального состояний сигнала управления, соответственно. Для текущего реального нормированного состояния сигнала управления $|0\rangle$ с помощью интегральной функции распределения вероятности определяется его вероятность. Далее из закона сохранения вероятностей рассчитывается вероятность виртуального состояния сигнала управления. Используя тот же интегральный закон распределения вероятностей, путём обратного отображения, вычисляется численное значение соответствующего виртуального состояния сигнала управления.

Следовательно, суперпозиция квантовой системы «реальное состояние – виртуальное состояние» имеет следующий вид:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{P}|0\rangle + \sqrt{1-P}|1\rangle = \text{квантовый бит}.$$

На рис. 2 отображен схематично вычислительный процесс и формирование квантового бита для текущего состояния нормированного сигнала управления, описывающего коэффициенты усиления нечеткого ПИД-регулятора в структуре ИСУ.

Далее осуществляется выбор типа квантовой корреляции (рис. 1, блок 3) из соответствующих компонент для используемого типа корреляции из нормированных сигналов управления. Для рассматриваемой ситуации возможны три типа квантовой корреляции (содержащих скрытую в спроектированных БЗ ценную квантовую информацию): пространственная, временная и пространственно-временная.

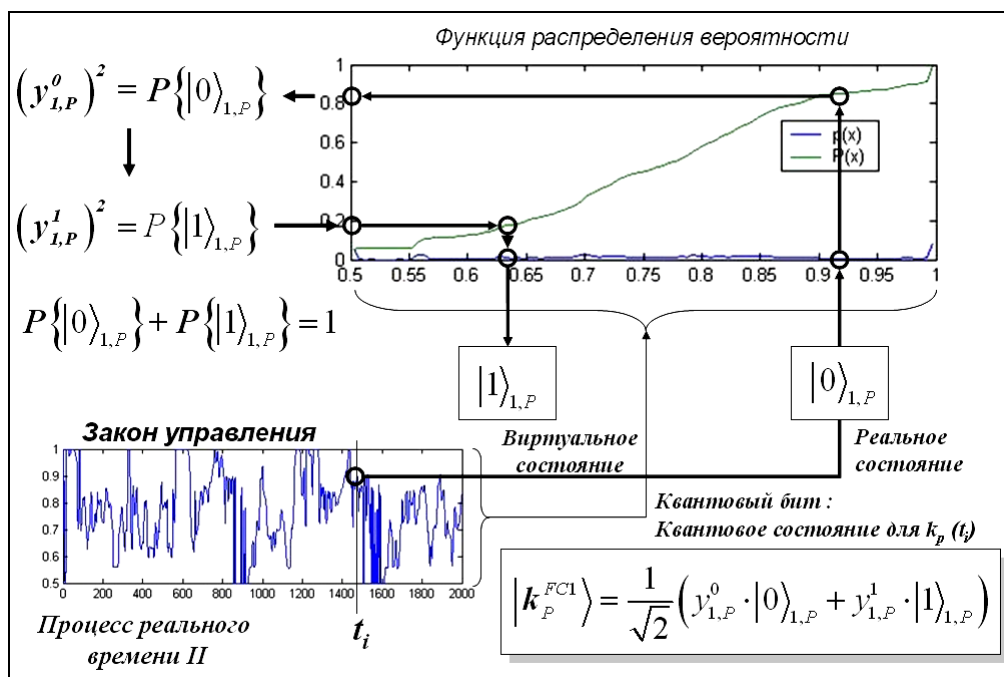


Рис. 2. Процесс формирования квантовых битов (блок 2)

На рис. 3 показаны перечисленные три типа корреляции между процессами управления коэффициентами усиления двух нечётких ПИД-регуляторов.

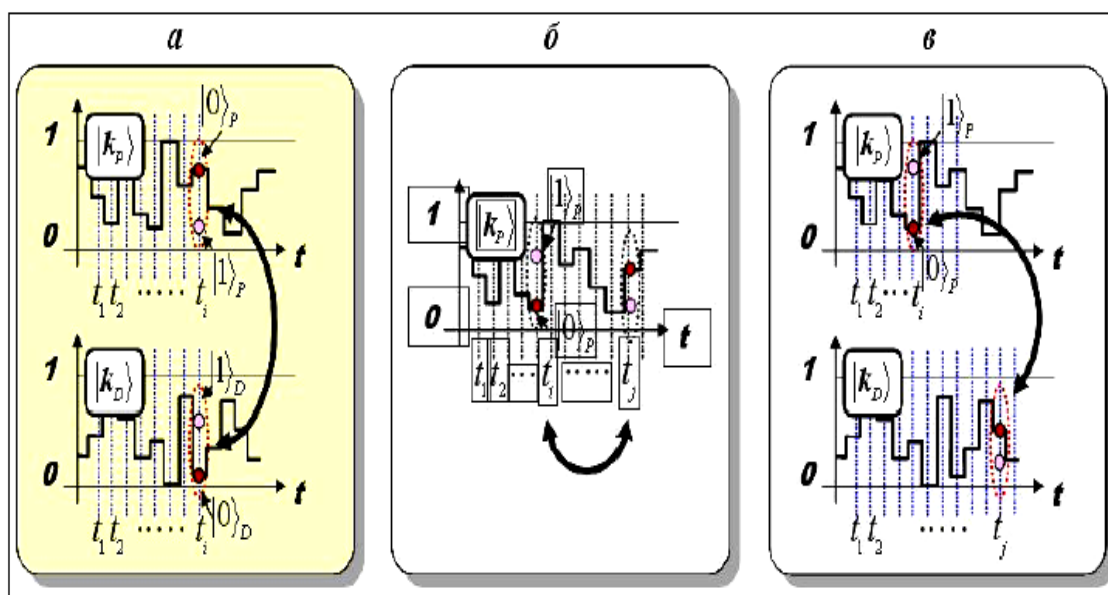


Рис. 3. Типы квантовых корреляций в законах управления коэффициентами усиления нечёткого ПИД-регулятора в процессе реального времени: а – пространственная, б – временная, в – пространственно-временная

На рис. 4 приведен пример формирования пространственной корреляции в КНВ из сигналов управления коэффициентами усиления двух нечётких ПИД-регуляторов, БЗ которых спроектированы с помощью инструментария ОБЗ для двух различных ситуаций управления.

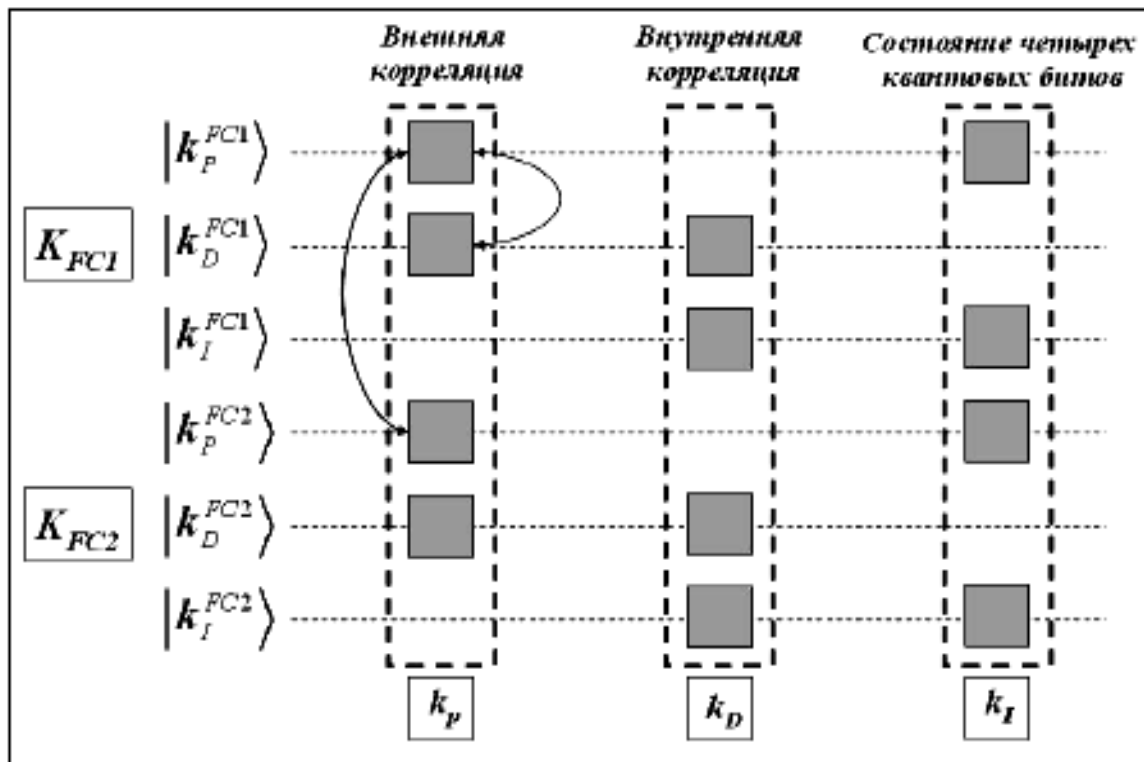


Рис. 4. Процесс формирования внутренней и внешней пространственной корреляции для новых коэффициентов усиления k_p, k_i, k_d

Согласно рис. 4 квантовая пространственная корреляция (как тип) классифицируется, в свою очередь, на два вида корреляций: внутренняя и внешняя. Внутренняя корреляция формируется за счет установления статистических взаимосвязей между выходными сигналами управления коэффициентами усиления заданного первого НР типа K_{FC1} . Внешний вид корреляции характеризует связь между соответствующими сигналами управления первого K_{FC1} и второго K_{FC2} НР, где индекс «FC1» означает нечёткий регулятор 1 (НР1), а индекс «FC2» означает нечёткий регулятор 2 (НР2).

Отметим также, что аналогичные рассуждения справедливы для временной и пространственно временной корреляций. В результате формирования таких типов и видов квантовой корреляции осуществляется координационное управление между коэффициентами усиления за счёт соответствующей внутренней и внешней силы корреляции. Следовательно, для конкретного рассматриваемого случая двух НР каждое квантовое состояние суперпозиции выбранного коэффициента усиления описывается четырьмя квантовыми битами.

Рассмотрим алгоритм формирования суперпозиции (рис.1, блок 4) для вычисления оптимального значения, например, пропорционального коэффициента усиления нечёткого ПИД-регулятора (рис.1, блок 5), используя БЗ двух НР из разных ситуаций управления. Остальные коэффициенты вычисляются по аналогичному алгоритму.

На рис. 5 показан пример вычисления искомого множества значений пропорционального коэффициента усиления из множества комбинаций $\{k_p^{FC1}, k_p^{FC2}, k_d^{FC1}, k_d^{FC2}\}$.

$$\begin{aligned}
 & |k_p^{FC1}\rangle \otimes |k_p^{FC2}\rangle \otimes |k_d^{FC1}\rangle \otimes |k_d^{FC2}\rangle \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} (y_{1,p}^0 \cdot |0\rangle_{1,p} + y_{1,p}^1 \cdot |1\rangle_{1,p}) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (y_{2,p}^0 \cdot |0\rangle_{2,p} + y_{2,p}^1 \cdot |1\rangle_{2,p}) \\
 &\otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (y_{1,d}^0 \cdot |0\rangle_{1,d} + y_{1,d}^1 \cdot |1\rangle_{1,d}) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (y_{2,d}^0 \cdot |0\rangle_{2,d} + y_{2,d}^1 \cdot |1\rangle_{2,d}) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \underbrace{(\alpha_1 \cdot |0000\rangle + \alpha_2 \cdot |0001\rangle + \dots + \alpha_{2^{n-1}} \cdot |1110\rangle + \alpha_{2^n} \cdot |1111\rangle)}_{16 \text{ _возможных_ состояний}} \\
 &n = 4 \\
 &\alpha_1 = y_{1,p}^0 \cdot y_{2,p}^0 \cdot y_{1,d}^0 \cdot y_{2,d}^0 : \text{амплитуда _вероятности}
 \end{aligned}$$

Рис. 5. Пример вычисления пропорционального коэффициента усиления k_p на основе множества

$\{k_p^{FC1}, k_p^{FC2}, k_d^{FC1}, k_d^{FC2}\}$: новый k_p (суперпозиция четырех выбранных состояний)

Здесь k_p^{FC1} – используемое значение сигналов управления пропорциональным коэффициентом усиления БЗ первого НР, спроектированного для первой фиксированной ситуации управления; k_d^{FC2} – значение сигналов управления дифференциальным коэффициентом усиления БЗ второго НР, разработанного для второй ситуации управления (существенно отличающейся от первой по внешним условиям функционирования ОУ).

Применяя тензорное произведение между преобразованиями Адамара, получим члены вида $k_p^{FC1} \otimes k_d^{FC2}$ и аналогичные комбинации коэффициентов усиления. Как видно из обозначений на рис. 5, имеется 16 возможных состояний, описывающих комбинации корреляций (с учетом их типа и вида) между соответствующими коэффициентами усиления двух НР, спроектированных для разных ситуаций управления.

Следует отметить принципиальную особенность процесса формирования и проектирования нового вида робастных коэффициентов усиления нечёткого ПИД-регулятора за счёт применения квантового оператора суперпозиции. Новые типы и виды квантовой корреляции позволяют осуществить координационное управление коэффициентами усиления только за счёт физических ресурсов используемого вида корреляции. Это приводит к сжатию и устранению (редукции) избыточности информации в независимых законах управления коэффициентами усиления, извлечению наиболее ценной информации, и, как следствие, к повышению уровня робастности новой спроектированной БЗ за счет нового вида координации. Применение запутанных состояний в трёх типах корреляции даёт возможность повысить уровень робастности спроектированной БЗ (с помощью физических свойств запутанных состояний), используя эффект обмена информацией между квантовыми состояниями в сформированной суперпозиции (см. рис.1). Такой подход к проектированию робастных БЗ не имеет классических аналогов и отличается чисто квантовой природой получаемых эффектов проектирования.

Примечание. Напомним, что квадрат амплитуды вероятностей состояния в квантовой механике равен классической вероятности нахождения квантовой системы в данном состоянии (постулат Бора, который имеет несколько вариантов строгого обоснования [7]).

С точки зрения квантовой теории информации чистое квантовое состояние характеризуется, как известно, нулевым значением энтропии фон Неймана. Следовательно, «интеллектуальное квантовое состояние» в рассматриваемом КА имеет место для минимума информационной энтропии квантового состояния Шеннона. Искомый минимум достигается, в свою очередь, при максимуме вероятности состояния (по определению информационной энтропии квантового состояния Шеннона $H^{Sh} = -\sum_i P_i \ln P_i$, т.е. глобальный минимум наблюдается при максимуме вероятности P_i). Так как P_i по определению есть квадрат соответствующей амплитуды вероятностей, то принцип

максимума амплитуды вероятностей при коррелированном состоянии может быть принят за критерий отбора приоритетного «интеллектуального» корреляционного (когерентного) состояния в суперпозиции возможных кандидатов [5, 6].

Таким образом, вычислением амплитуд квантовых состояний в суперпозиции состояний со смешанными видами квантовой корреляции (блок 5 на рис. 1) и выбором среди них максимальной реализуется модель квантового оракула, обладающего (по определению понятия квантового оракула) необходимой информацией об искомом решении.

Используя стандартную процедуру декодирования (внутреннего произведения векторов в Гильбертовом пространстве) и выбирая коэффициенты шкалирования для выходных значений проектируемых коэффициентов усиления (рис. 1, блок 6), осуществляется итерационная работа КА КНВ. Возможность дистанционного подключения ОУ к стационарной вычислительной системы открывает возможность удаленной настройки, формированию и самоорганизации БЗ НР в режиме реального времени.

Приведенная модель КА для КНВ позволяет решать классические проблемы проектирования робастных БЗ НР в структурах ИСУ, не имеющих аналогов решений среди семейства рандомизированных классических алгоритмов, и отличается полиномиальной вычислительной сложностью (BQP – класс вычислительной сложности) [8].

Квантовые вычисления на классическом процессоре: применение в робастном управлении неустойчивым ОУ

В качестве динамически неустойчивого объекта управления выступает робот. Устройство робота представлено на рис. 6, структура управления представлена на рис. 7.

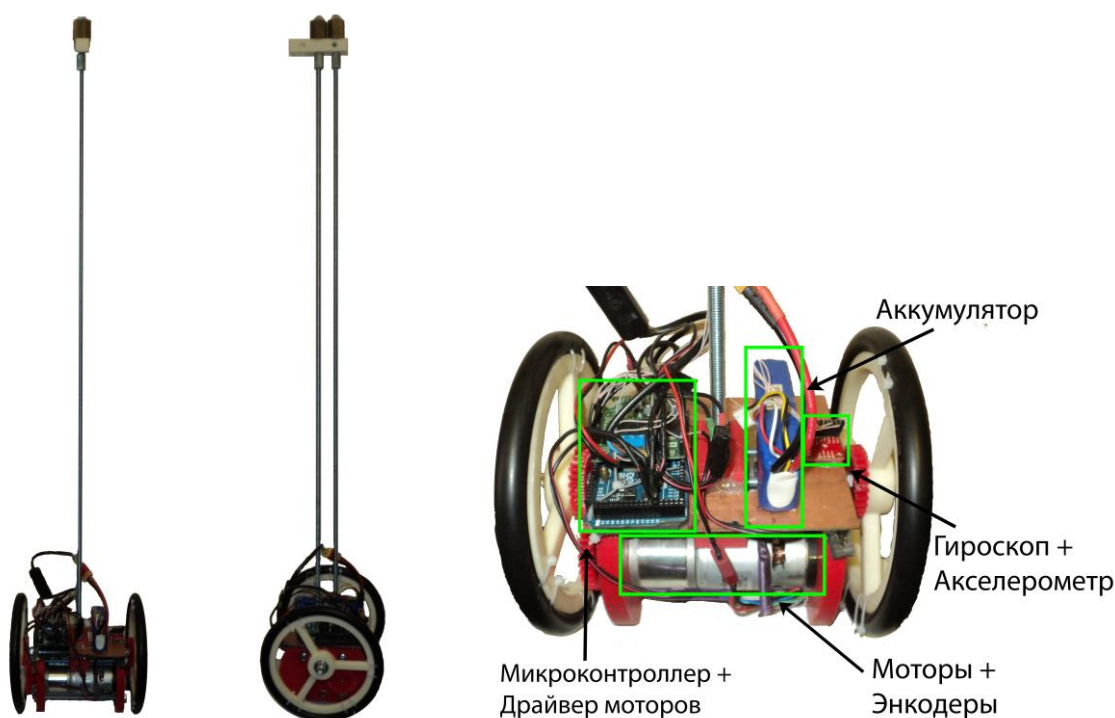


Рис. 6. Внешний вид и устройство робота

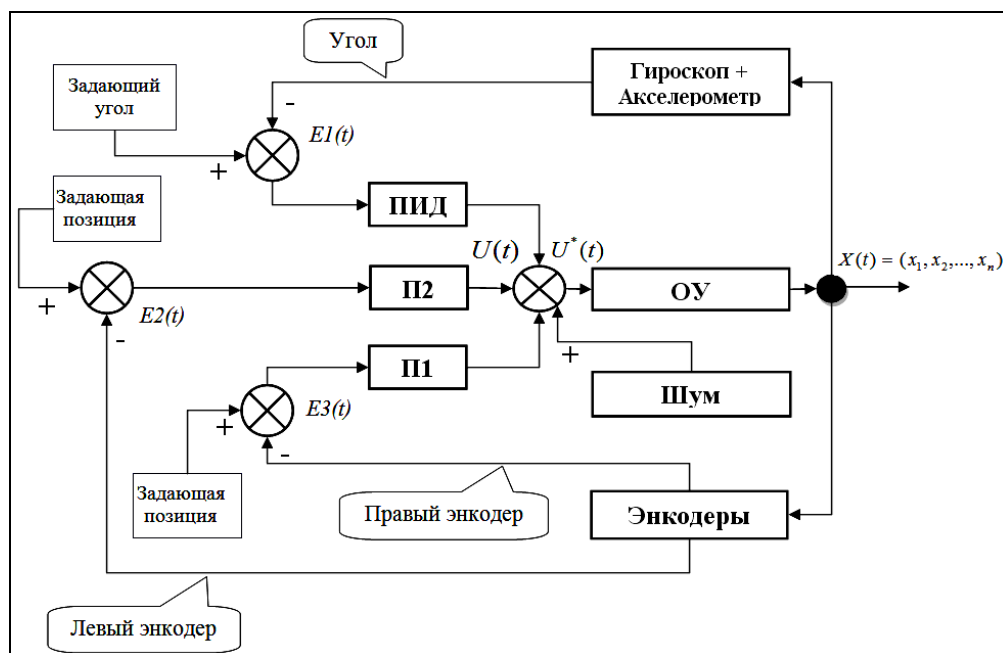


Рис. 7. Структура системы управления

В качестве управляющего воздействия используется сумма ПИД-регулятора угла отклонения и П-регулятора на ошибку отъезда каждого колеса. Для выработки силы управления на каждый мотор используются следующие выражения:

$$u_{Right} = k_p e + k_i \int_0^t e dt + k_d \dot{e} + k_R \cdot z_R;$$

$$u_{Left} = k_p e + k_i \int_0^t e dt + k_d \dot{e} + k_L \cdot z_L;$$

где k_R – пропорциональный коэффициент на отъезд правого колеса,

k_L – пропорциональный коэффициент на отъезд левого колеса,

z_R – отъезд от точки запуска правого колеса,

z_L – отъезд от точки запуска левого колеса.

Проектирование системы управления на основе КНВ осуществляется с использованием разработанного программного инструментария «Квантовый оптимизатор» [1, 4]. Технология применения КНВ позволяет объединять в единую систему управления несколько БЗ, и таким образом, позволяя нечетким нейронным сетям работать параллельно. Структура квантового нечеткого регулятора представлена на рис. 8. Отметим, что в данной работе на выходе КНВ используются 5 коэффициентов вместо трех.

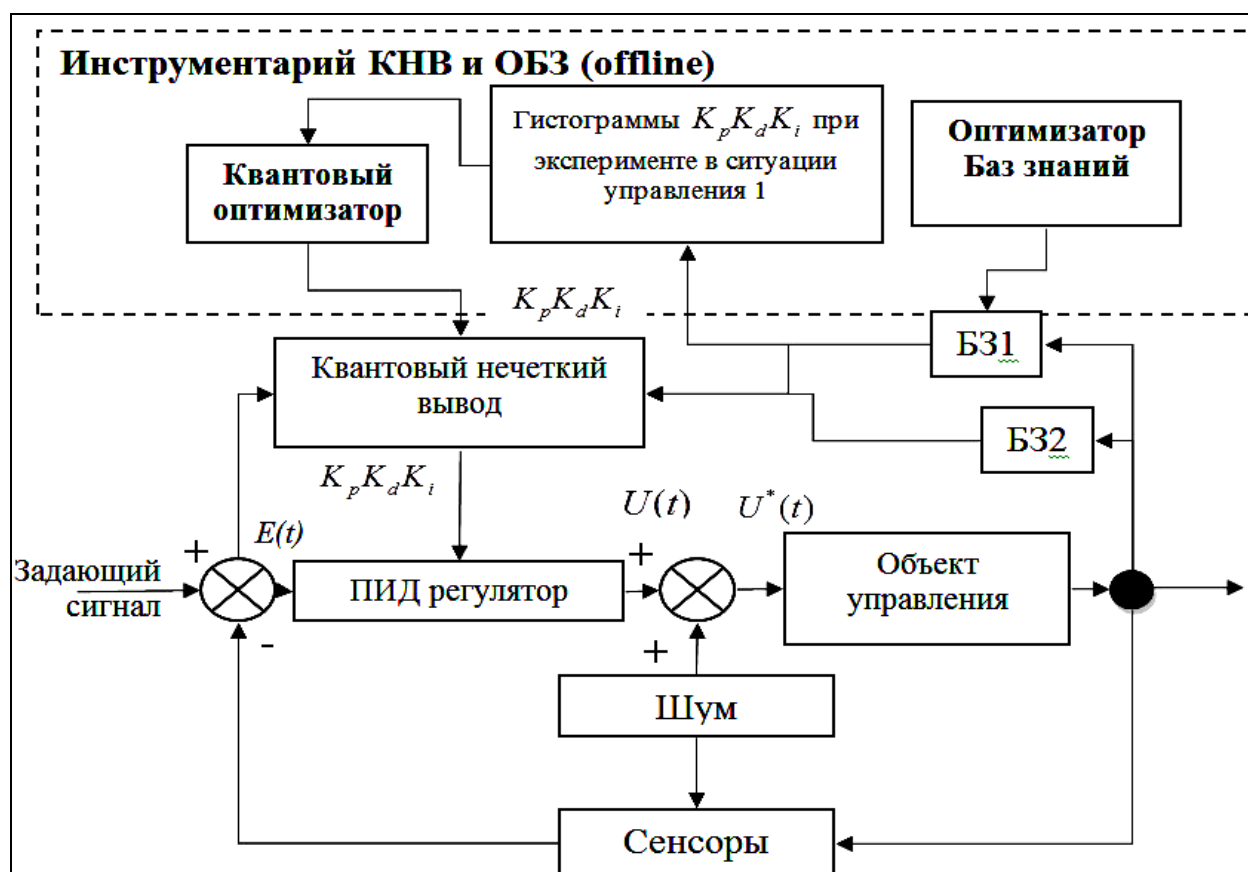


Рис. 8. Структура квантового нечеткого регулятора

Для формирования КНВ мы используем объединение двух баз НР, полученных в предыдущей части статьи. В таблице 1 приведено сравнение БЗ, используемых для формирования КНВ.

Таблица 1. Сравнение БЗ

База	Количество правил	Кол-во ф-ций принадлежности	Способ оптимизации	Условия оптимизации
БЗ1 (FC1)	72	3x3x3x2x2	Дистанционная настройка	Ситуация С1
БЗ2(FC4)	72	3x3x3x2x2	Дистанционная настройка	Ситуация С2

Перед тем как приступить к созданию квантового НР, необходимо получить гистограммы распределения выходных сигналов (коэффициентов усиления) нечетких регуляторов (рис. 9). Для этого проводится серия экспериментов в типовой ситуации управления. Используя полученные значения коэффициентов усиления формируется массив данных для построения гистограмм коэффициентов ПИД регулятора (рис. 9).

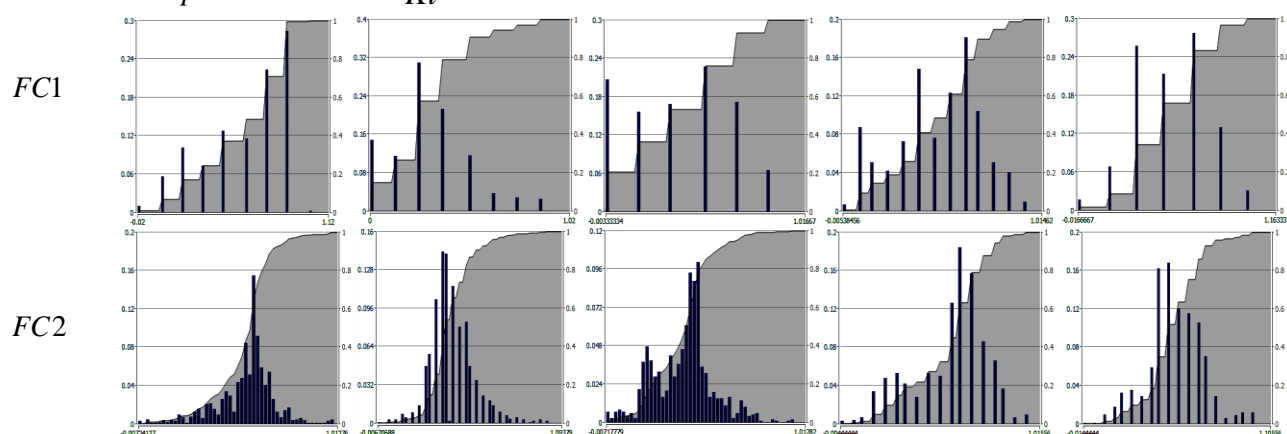


Рис. 9. Гистограммы выходных значений нечетких регуляторов

Построение гистограмм происходит автоматически при загрузке данных в квантовый оптимизатор. В дальнейшем они используются в алгоритме КНВ для формирования виртуальных состояний. Гистограммы коэффициентов усиления, полученные экспериментально, используются в формировании КНВ для робота (в физическом эксперименте), гистограмм коэффициентов усиления, полученные с использованием математической модели, применяются в формировании КНВ для моделирования. После загрузки данных, выбирается вид квантовой корреляции между коэффициентами усиления. Формирование запутанных состояний осуществляется на основе выбранной корреляционной матрицы, которая устанавливается в рабочем окне оптимизатора.

На следующем шаге, устанавливаются соответствующие максимальные и минимальные значения для входных и выходных сигналов КНВ и осуществляется настройка шкалирующих коэффициентов (блок 6, рис.1).

Использование дистанционного подключения к объекту управления, подразумевает дополнительное оборудование для приема-передачи данных, например, радиоканал Bluetooth, WiFi или подключение по кабелю, например USB. Реализуется обмен информацией между ОУ и квантовым оптимизатором (КО), для поиска шкалирующих коэффициентов (рис. 1) квантового регулятора.

Подключение к квантовому оптимизатору осуществляется через разработанный плагин, устанавливается СОМ-порт подключаемого робота и время проверки каждого решения. Окно плагина представлено на рис. 10.

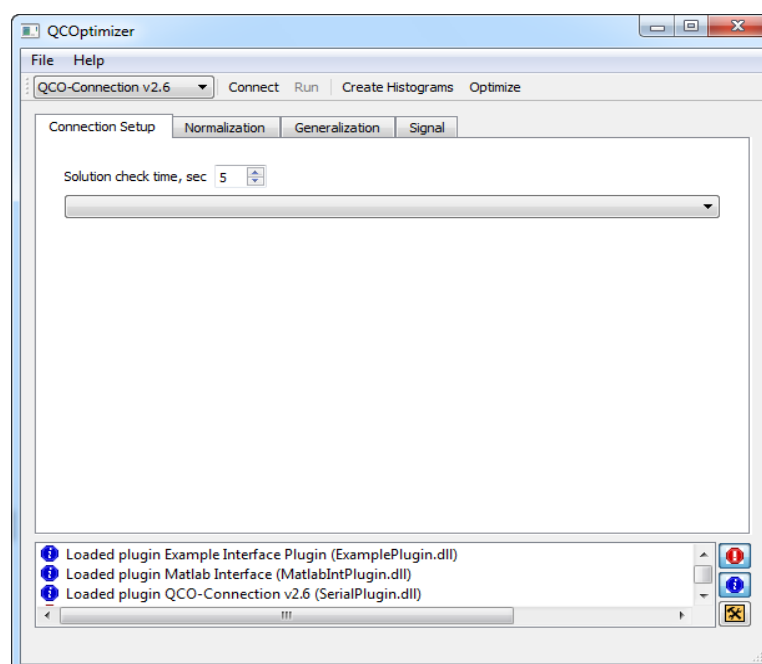


Рис. 10. Окно плагина дистанционной настройки оптимизатора на квантовых вычислениях

Результатом проектирования КНВ является экспортируемый файл с расширением «*.с», который добавляется в программу робота.

Эксперимент

Проведем эксперимент в типовой ситуации управления (С1), для сравнения ПИД-регулятора, нечетких регуляторов (FC1, FC2), и квантовых нечетких регуляторов с пространственно-временной (Q-S-T), пространственной (Q-S), и временной (Q-T) корреляцией. Отметим, что для FC2 ситуация С1 является нештатная.

На рис. 11 и 12 показан угол отклонения при работе сравниваемых регуляторов.

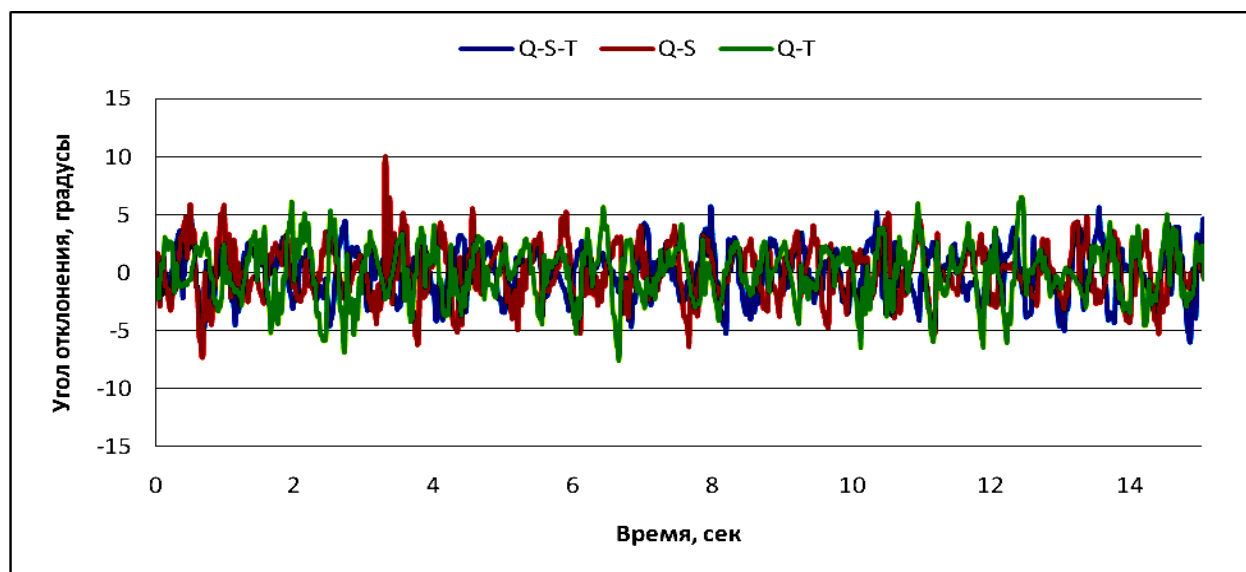


Рис. 11. Угол отклонения. Квантовые нечеткие регуляторы

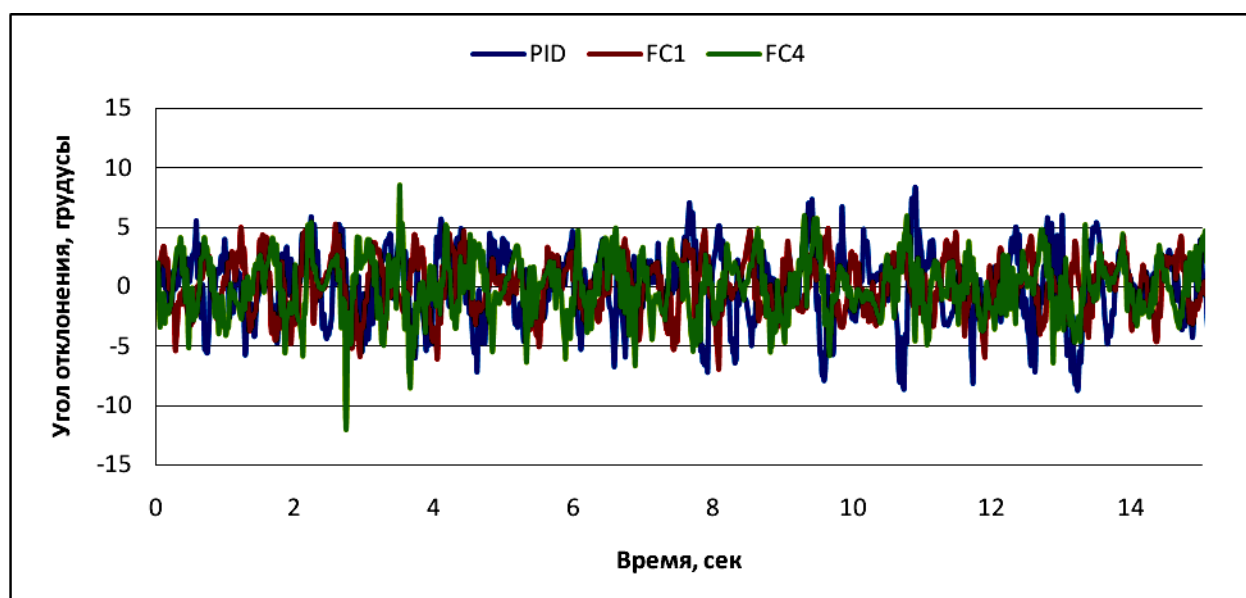


Рис. 12. Угол отклонения. Нечеткие регуляторы и ПИД-регулятор

Интеграл квадратичной ошибки сравниваемых регуляторов представлен на рис. 13. Рис. 11-13 показывают, что квантовые регуляторы работают стабильнее.

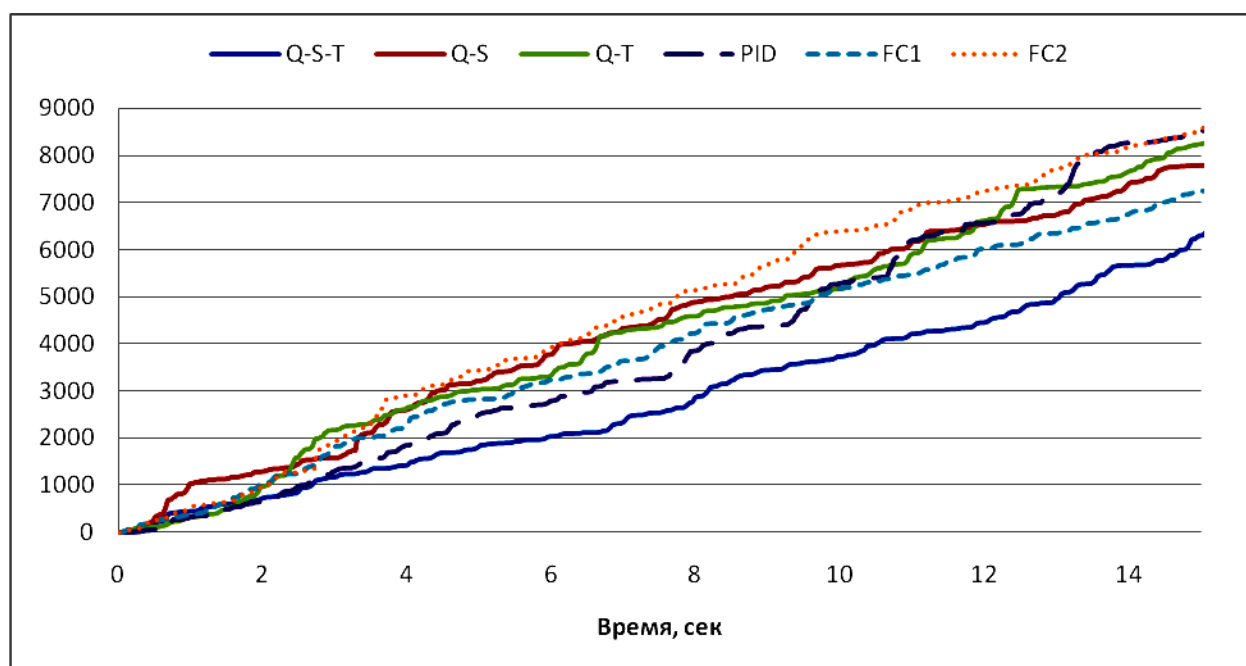


Рис. 13. Интеграл квадратичной ошибки угла отклонения

Рассмотрим поведение регуляторов с точки зрения отъезда робота от точки запуска.

На рис. 14, 15 показан отъезд правого и левого колеса от точки запуска для сравниваемых регуляторов.

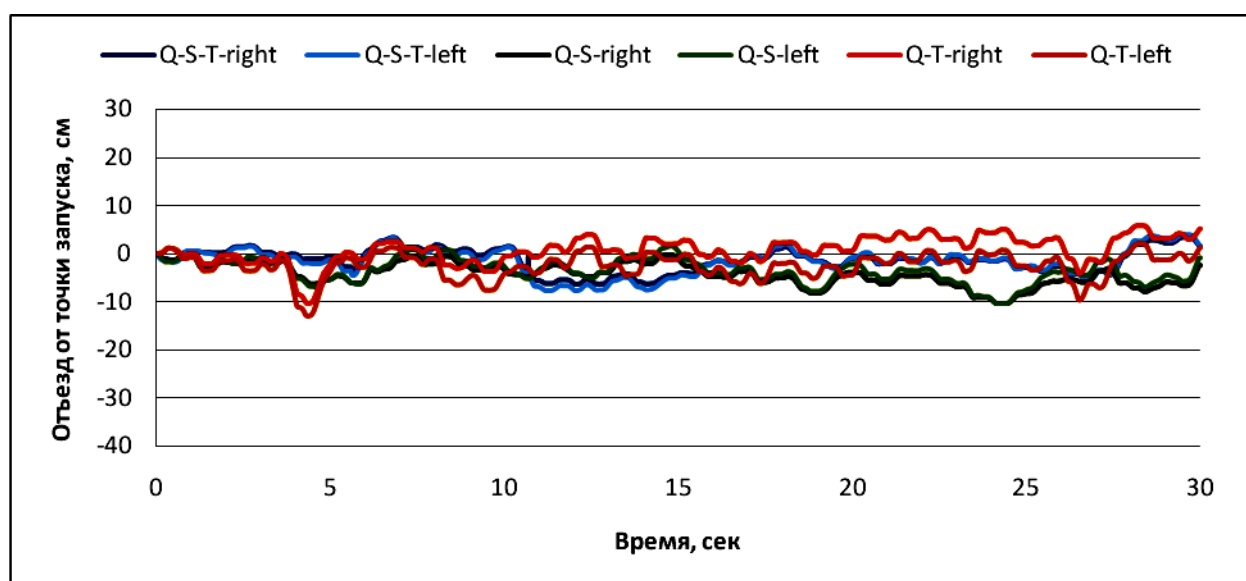


Рис. 14. Величина отъезда правого и левого колеса от точки запуска для квантовых нечетких регуляторов

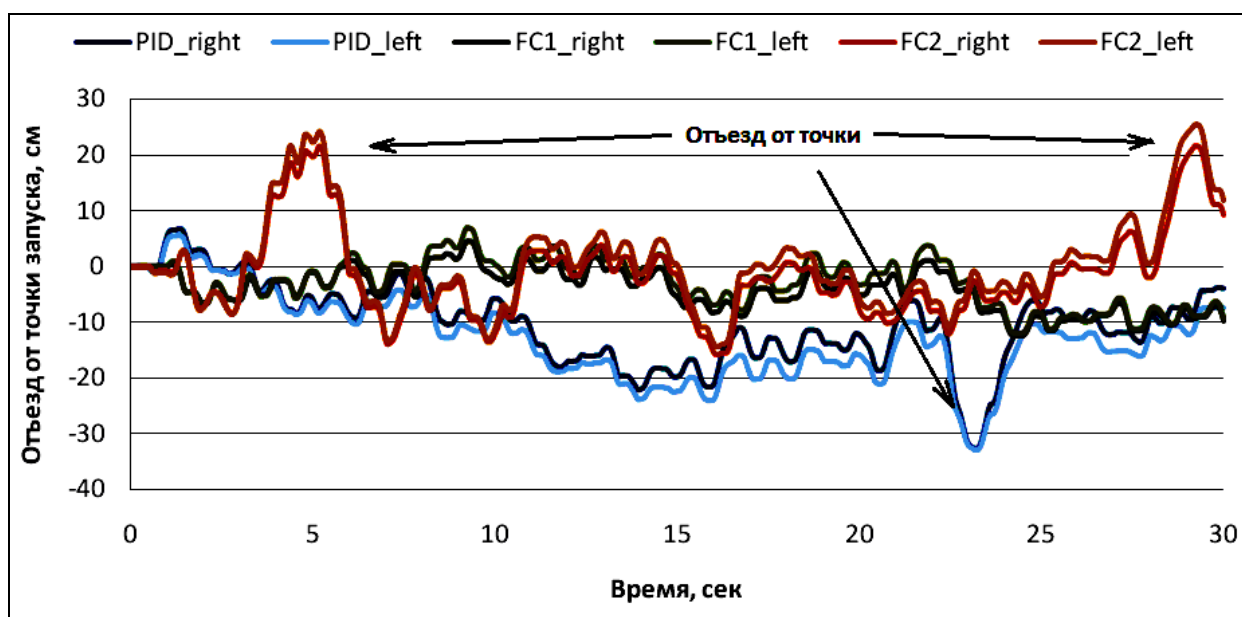


Рис. 15. Величина отъезда правого и левого колеса от точки запуска для нечетких регуляторов и ПИД-регулятора

На рис. 16 показана сумма интегралов квадратичных ошибок отъезда колеса сравниваемых регуляторов.

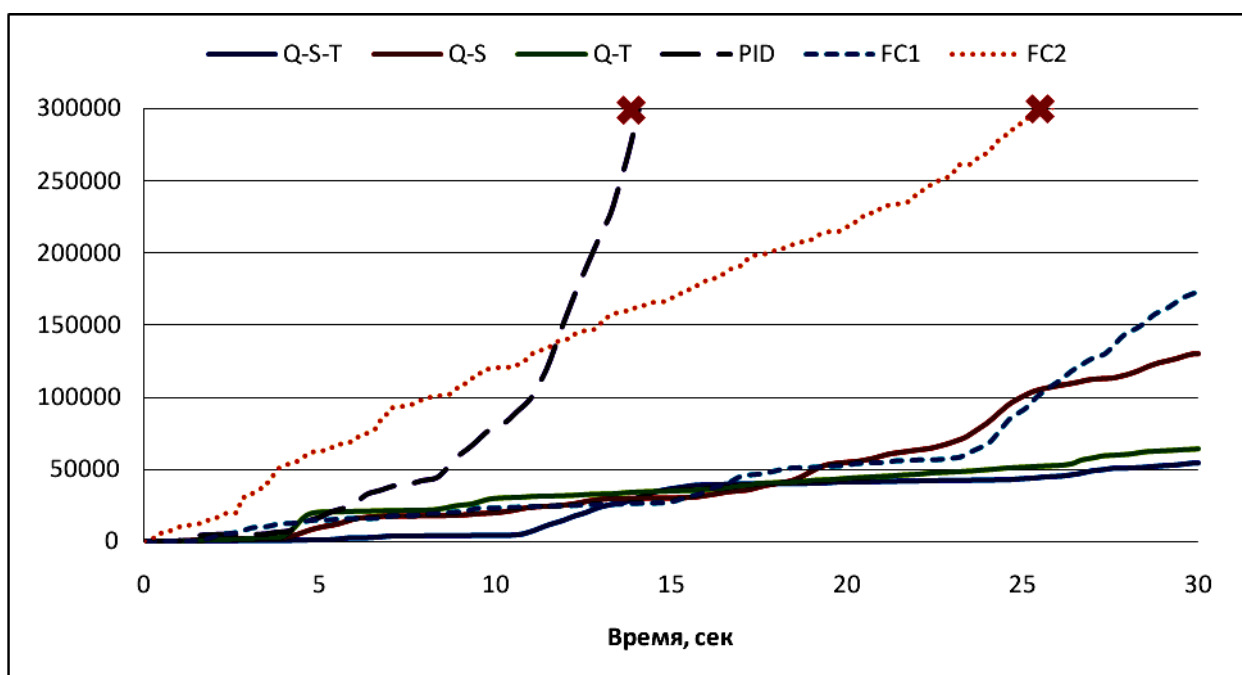


Рис. 16. Интеграл квадратичной ошибки отъезда правого и левого колеса

Графики отъезда от точки запуска показывают, что ПИД-регулятор не показывает приемлемый уровень управления с точки зрения удержания робота от «дрейфа». Также с этой задачей не справился и регулятор FC2, разработанный для другой ситуации управления.

На рис 17, 18 приведены общие диаграммы ошибок для каждого из регуляторов.

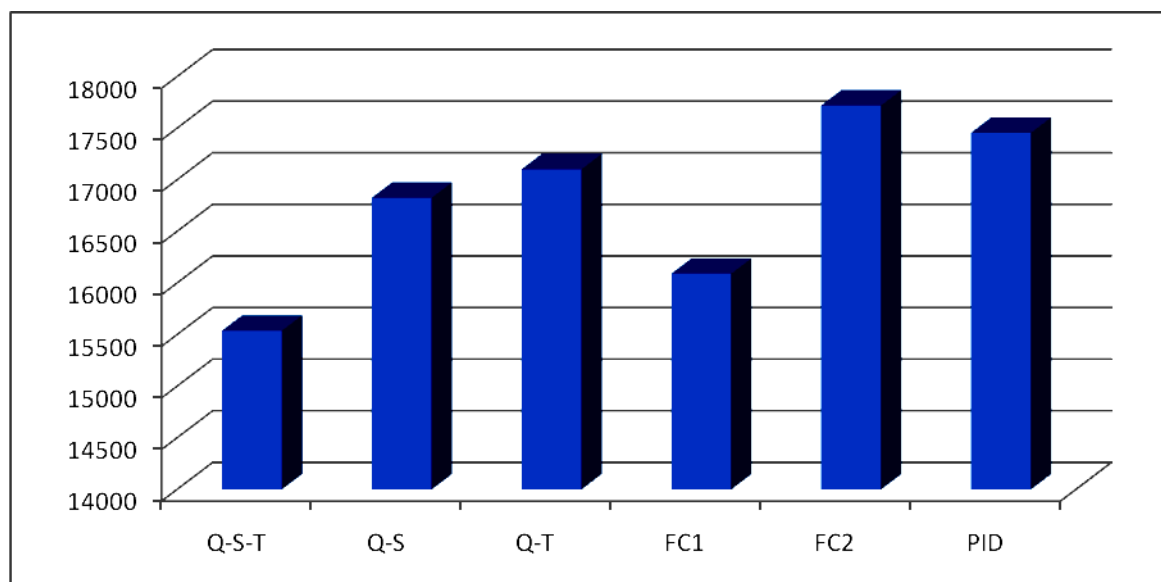


Рис. 17. Интеграл квадратичной ошибки угла отклонения

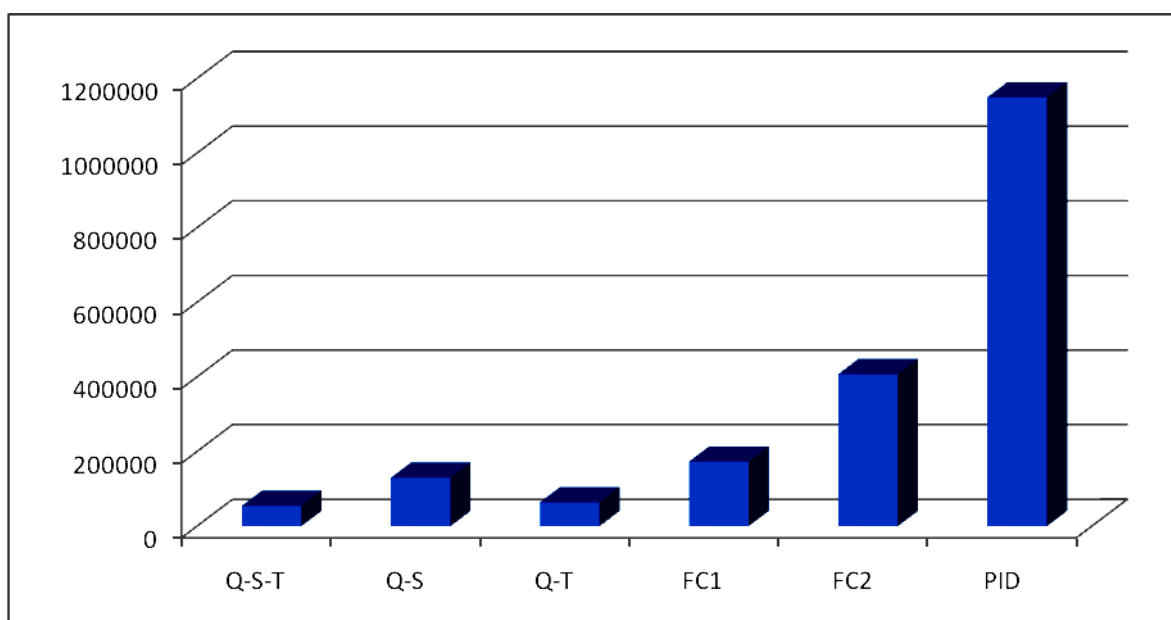


Рис. 18. Сумма интегралов квадратичных ошибок отъезда правого и левого колеса

Рис. 18 показывает, что квантовые нечеткие регуляторы справляются с задачей управления роботом с двумя обратными связями лучше нечетких регуляторов и ПИД-регулятора. Особенно хорошие результаты показал квантовый НР с пространственно-временной корреляцией (Q-S-T).

Выводы

Технология квантового оптимизатора, обеспечивает систему дополнительным свойством робастности только за счет использования программно-алгоритмического обеспечения. Проведенные эксперименты показали, что интеллектуальное управление позволяет выполнять настройку даже сложных объектов управления с несколькими контурами обратной связи. Продемонстрировано: что квантовый нечеткий регулятор справляется с задачей управления сложным ОУ на достаточно высоком уровне, где классический регулятор и нечеткие регуляторы не обладают требуемым качеством управления.

Установленный эффект подтверждает реализацию принципа самоорганизации БЗ за счет использования алгоритма КНВ. Показано применение квантовых вычислений на классическом

процессоре в режиме реального времени. Результаты моделирования и экспериментов подтверждают полезность и эффективность использования скрытой квантовой информации, извлекаемой из классических состояний коэффициентов усиления, в процессах управления. Таким образом показана эффективность и необходимость применения квантовых вычислений и алгоритмов управления не только для квантовых систем, но и для классических ОУ.

Список литературы

1. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V. Design of self-organized intelligent control system based on quantum fuzzy inference: Intelligent system of systems engineering approach, Proc. of IEEE Internat // Conf. on System, Man and Cybernetics (SMC'2005). – Hawaii, USA, 2005. – Vol. 4.
2. Ulyanov S.V., Kurawaki I., Yazenin A.V. et all. Information analysis of quantum gates for simulation of quantum algorithms on classical computers, Proceedings of Intern // Conf. on Quantum Communication, Measurements and Computing (QCM&C'2000). – Capri. Italy, 2000. KluwerAcad. PlenumPubl. – 2001. – Pp. 207-214.
3. Решетников А.Г., Ульянов С.В. Метод извлечения знаний из физически измеряемого сигнала обучения: проектирование баз знаний нечеткого регулятора // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2013. – № 1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/27>.
4. Решетников А.Г., Ульянов С.В., Шоланов К.С. Робастное интеллектуальное управление физическим динамически неустойчивым объектом «каретка-перевернутый маятник». Ч. 2: Технологии квантовых вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2013. – № 1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/27>.
5. Гольденблат И.И., Ульянов С.В. Введение в теорию относительности и её приложения к новой технике. – М.: Физматгиз, 1979.
6. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. и др. Проблемы управления релятивистскими и квантовыми динамическими системами. – М.: Наука, 1982.
7. Zurek W.H. Probabilities from entanglement, Born's rule $p_k = |\psi_k|^2$ from envariance // Phys. Review. – 2005. – Vol. A71. – № 5.
8. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // IEEE Control Syst. Mag. – 2006. – Vol. 26. – № 1. – P. 42-54.
9. Khan H. PID controller: Comparative analysis and design diverse realizations (Moving towards efficient control in robotics and industries). – Lambert Academic Publishing House, 2012.
10. Choi D., Oh J.-H. Human-friendly motion control of a wheeled inverted pendulum by reduced-order disturbance observer // IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008. – Pp. 2521-2526.
11. Nawawi S. W., Ahmad M. N. and Osman J. H. S., Real-time control system for a two-wheeled inverted pendulum mobile – robot // Advanced Knowledge Application in Practice / I. Fuerstner (Ed). – InTech, 2010. – Pp. 299-312.
12. Gocmen A. Design of two wheeled electric vehicle. – Master Sci. Thesis. – AtilimUniversity, Temmuz.– 2011.
13. Moghaddas M., RezaDastranj M., Changizi N., and Khoori N., Design of Optimal PID Controller for Inverted Pendulum Using Genetic Algorithm // International Journal of Innovation, Management and Technology. – August 2012. – Vol. 3. – № 4.
14. Kumar P., Mehrotra O.N., Mahto J., Tuning of PID controller of inverted pendulum using genetic algorithm // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2012. – Vol_01_Iss_03. – [Электронный ресурс]. URL: http://ijret.org/volumes/2012_11_Vol_01_Iss_03/P2012_01_03_029.pdf.