

РОБАСТНОЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМ ДИНАМИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВЫМ ОБЪЕКТОМ «КАРЕТКА – ПЕРЕВЕРНУТЫЙ МАЯТНИК». Ч. 2: ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

**Решетников Андрей Геннадьевич¹, Ульянов Сергей Викторович²,
Шоланов Корганбай Сагнаевич³**

¹Аспирант;

ГБОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: reshetnikovag@pochta.ru <mailto:nefnukem@gmail.com>.

²Доктор физико-математических наук, профессор;

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

³Доктор технических наук, профессор;

Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева,
кафедра Робототехника и технические средства автоматизации;
Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22А;
e-mail: sholkor@rambler.ru.

В статье рассматривается технология проектирования интеллектуальной системы управления на основе квантового нечеткого вывода. Проводится сравнение результатов моделирования и физического эксперимента. Использование разработанной методологии проектирования основано на самоорганизации знаний и приводит к повышению уровня робастности интеллектуальных систем управления в непредвиденных ситуациях.

Ключевые слова: Интеллектуальное управление, квантовый алгоритм, самоорганизация, база знаний, квантовая информация, квантовый нечеткий вывод.

ROBUST INTELLIGENT CONTROL OF PHYSICAL DYNAMIC UNSTABLE OBJECT «CART – POLE». PT. 2: QUANTUM COMPUTING TECHNOLOGY

Reshetnikov Andrey¹, Ulyanov Sergey², Sholanov Korganbai³

¹PhD student;

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

²Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

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

³Doctor of Science in Engineering, professor;

Kazakhstan National technical university of K.I. Satpaev,
Robotics and automatic technical devices;
Kazakhstan, Almaty, Satpaev str., 22A;
e-mail: sholkor@rambler.ru.

The article deals with the design technology of robust intelligent control system based on quantum fuzzy inference. The robustness of control systems in unforeseen situation is improved using the design methodology of self-organization knowledge base.

Ключевые слова: intelligent control, quantum algorithm, self-organization, knowledge base, quantum information, quantum fuzzy inference.

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). С самого момента своего появления (1974г.) 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.

Как показала практика и результаты моделирования, в перечисленных ситуациях управления традиционный (использующий принцип глобальной отрицательной обратной связи) ПИД-регулятор часто не справляется с поставленной задачей управления. Однако решение задачи о глобальной робастности до настоящего времени ПИД-регулятора неизвестно, несмотря на актуальность данной проблемы.

Согласно [1-3], в качестве нижнего исполнительного уровня традиционный ПИД-регулятор и его модификации используются в более чем 85% в контурах управления промышленных и непромышленных структур САУ, включая объекты с повышенной социально-экономической ответственностью. Поэтому одной из важных конкретных (теоретических и практических) проблем в создании ИСУ является разработка методов и алгоритмов повышения надежности и качества управления исполнительского (нижнего) уровня САУ, основанного, в первую очередь, на традиционном ПИД-регуляторе.

При этом, следуя [4, 5], должен выполняться принцип «не разрушения исполнительского уровня», что приводит к эффективному использованию существующих отлаженных промышленных технологических процессов и повышенному экономическому эффекту.

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) [6].

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 [4-7]. 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 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 в процесс проектирования БЗ НР, который реализуется и программно поддерживается разработанной моделью КНВ с применением методологии квантовых мягких вычислений и системной инженерией – System of System Engineering (синергетический принцип самоорганизации) [8-14].

Одним из основных назначений и преимуществ эффективного применения ИСУ является возможность гарантированного достижения цели управления с максимальным качеством управления на верхнем уровне и минимальным расходом полезного ресурса системы «*объект управления (ОУ) + регулятор*» на нижнем (исполнительском) уровне иерархической системы автоматического управления.

На содержательном уровне данная возможность отражает назначение целенаправленной деятельности ИСУ в общем случае непредвиденных ситуаций управления. При этом эффективность применения ИСУ зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы (формы, вида и

глубинного представления знаний). Важную роль при формировании уровня интеллектуальности САУ играет выбор используемого инструментария технологии ИВ для проектирования соответствующей БЗ при заданной цели управления.

Отметим особенности выбора и применения на практике технологии и методов ИВ.

1. *Особенности технологии ИВ и принципы ИСУ.* Из многочисленных моделей ИВ в данной работе выбраны технологии мягких, дробных и квантовых вычислений, не случайно. Данные инновационные технологии вычислений составляют программно-алгоритмическую основу ИТ проектирования самоорганизующихся робастных ИСУ, способных функционировать и гарантировать достижение цели управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций и информационного риска.

Именно задача разработки самоорганизующихся ИСУ слабо структурированными объектами управления (ОУ), способных функционировать и гарантировать достижение цели управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций и информационного риска, является наиболее актуальной (и трудно решаемой) в теории и систем управления.

Одним из предметов статьи является решение указанной задачи.

2. *Проблемы разработки ИСУ.* Трудности поиска решения такой задачи связаны с необходимостью реализации ряда физических и информационно-термодинамических принципов робастного интеллектуального управления: (1) *принцип компенсации информационной неполноты описания модели* (слабоструктурированных) ОУ выбором соответствующего уровня ИВ; (2) *принцип соответствия алгоритма интеллектуального управления* уровню сложности и неполноты представления знаний о внешней среде функционирования ОУ (связь информационной энтропии с мерой алгоритмической сложности Колмогорова); (3) *принцип минимума потерь полезного ресурса* (минимум обобщенной энтропии – физический закон оптимального управления) в системе «*объект управления + регулятор*»; и (4) *принцип не разрушения и повышения эффективности нижнего исполнительского уровня* системы автоматического управления за счет самоорганизации БЗ интеллектуального регулятора.

Перечисленные принципы рассмотрены в данной статье с позиции проектирования робастных интеллектуальных нечетких регуляторов.

3. *Базис реализации ИТ проектирования ИСУ и парадоксы ИВ.* Выполнение и реализация новых физических (информационно-термодинамических) принципов интеллектуального робастного управления осуществляются на основе решения следующих трех принципиальных проблем.

А. В первом случае, в отличие от прямой задачи (описания знаний количественными характеристиками), рассматривается решение обратной задачи теории искусственного интеллекта: извлечение, обработка и формирование знаний из количественных данных эксперимента. В этом случае разработанная технология проектирования объективных БЗ на основе оптимизаторов БЗ на мягких и квантовых вычислениях исключает субъективизм экспертных оценок, обеспечивает достижение требуемого уровня робастности ИСУ.

Б. Во втором случае рассматривается проблема разработки и физического обоснования математической модели квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний для формирования робастных БЗ в реальном времени. Показана роль прямых аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения качества управления на основе технологии квантовых, мягких и дробных вычислений.

При этом основное внимание уделяется описанию и интерпретации качественных особенностей биологически воспроизводимой (био-инспирированной) эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют физическое содержание разработанной модели квантового алгоритма управления процессом самоорганизации.

Рассматривается задача робастного управления в непредвиденных ситуациях на основе квантовых стратегий принятия решений в виде программного инструментария квантового нечеткого вывода как частного случая разработанного квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний.

В. Решение третьей проблемы демонстрирует результаты применения ИТ проектирования робастных БЗ непосредственно в структуре ИСУ. Показаны особенности проектирования робастных БЗ

для непредвиденных ситуаций управления и в условиях информационного риска для ИСУ, включающих в свою структуру оптимизаторы БЗ.

4. *Роль синергизма информации в разработке самоорганизации БЗ.* Синергизм неточной (imperfect) информации и синергетический эффект квантовой самоорганизации БЗ в условиях непредвиденных ситуаций основан на технологии извлечения скрытой в классических состояниях (неизмеримой в общем виде классическими приборами) квантовой информации (дополнительный информационный ресурс).

В качестве классических состояний рассматриваются законы управления изменениями во времени коэффициентов усиления исполнительных автоматических устройств, которые формируют оптимальную управляющую силу (с минимальными потерями полезного ресурса в системе «*объект управления + регулятор*»).

Разработанная ИТ проектирования позволяет использовать данный дополнительный информационный ресурс для повышения уровня робастности ИСУ. Показано, что само свойство робастности является следствием самоорганизации БЗ нечетких регуляторов (нижний исполнительский уровень управления).

Синергетический эффект физически наблюдается при коллективном обмене информацией между элементами БЗ и извлечении скрытых в классических состояниях системы новых знаний. В этом случае могут быть спроектированы условия формирования интеллектуального управления искусственной самоорганизации за счет проектирования новых видов (*квантовой или смешанной*) корреляции и кооперативного обмена информацией между элементами выходных сигналов БЗ.

Под алгоритмическим процессом самоорганизации робастных БЗ понимается процесс проектирования в реальном времени (on line) робастных сигналов адаптивного управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств системы управления. Процесс проектирования осуществляется в условиях неопределенности (неточности) новой исходной информации об изменении цели управления, в условиях информационного риска или непредвиденных ситуаций управления.

Исполнительные устройства с помощью квантового нечеткого вывода (КНВ) формируют оптимальную управляющую силу на ОУ на основе реакции продукционных правил ранее спроектированных (на ограниченное количество заданных ситуаций управления) робастных БЗ (например, нечетких ПИД-регуляторов).

При этом сами ранее спроектированные БЗ могут терять свойство робастности при новой ошибке управления, в которой содержится неточная информация о новой непредвиденной ситуации управления.

Процесс самоорганизации БЗ реализуется в реальном времени.

Таким образом, в основе квантовой самоорганизации лежит синергетический эффект: обнаружение и извлечение (в процессе обработки алгоритмом КНВ) *дополнительной квантовой информации*, скрытой в классических состояниях процесса управления.

Сам синергетический эффект возникает за счет корреляций между информационно взаимодействующими элементами частных БЗ и осуществляется формирование дополнительного количества информации, которое отсутствует во взаимодействующих БЗ.

При этом осуществляется *редукция избыточной информации*, содержащейся в классических состояниях процесса управления, что позволяет проектировать необходимый (требуемый) уровень робастности БЗ.

Следовательно, рассматриваемый *синергетический* эффект квантовой самоорганизации знаний при формировании робастных БЗ осуществляется в *информационном пространстве* состояний системы управления в отличие от *физического пространства*, в котором реализуется самоорганизация диссипативных физических структур.

Данный факт имеет принципиальное значение при разработке процессов проектирования робастных ИСУ. При этом установлен новый (для классической логики управления) квантовый «парадокс» самоорганизации знаний: две БЗ, спроектированные для двух разных ситуаций управления, и

не робастные в новой непредвиденной ситуации управления, с помощью КНВ дают возможность спроектировать в реальном времени робастную БЗ.

Спроектированная робастная БЗ позволяет ОУ гарантированно достичь поставленной цели управления в условиях информационного риска и непредвиденных ситуаций управления.

5. *Особенности разработанного подхода к структурному проектированию моделей интеллектуального управления.* Выделим некоторые особенности разработанного подхода к структурному проектированию моделей интеллектуального управления и его отличия от известных работ по разработке ИСУ.

- Применение квантового алгоритма самоорганизации БЗ позволяет в реальном времени достичь цели управления в непредвиденных ситуациях за счет повышения робастности ИСУ в проблемно-ориентированной области. Вычислительным базисом отмеченных направлений разработок является технология квантовых, дробных и мягких вычислений.
- Важным для системной инженерии результатом применения ИТ проектирования ИСУ является показанная возможность реализации квантовых алгоритмов и квантовых вычислений на *миповом* (а не на гибридном квантовом процессоре типа D-Wave и др.) процессоре в стандартной конфигурации аппаратной поддержки роботов-манипуляторов и автономных роботов.

В частности, реализация процесса самоорганизации робастных БЗ при таком подходе осуществляется за счет обобщении стратегии нечеткого логического вывода в виде КНВ. Модель разработанного КНВ рассматривается как новый вид поискового квантового алгоритма на обобщенном пространстве БЗ НР. Как результат применения КНВ проектируется обобщенный робастный сигнал управления.

Предлагаемая модель КНВ использует частные индивидуальные БЗ НР, каждая из которых получается с помощью ОБЗ 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 и подробно рассмотрен в [12-14].

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 [13].



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 « $\max K$ » совместно с блоком 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 (блоки P и 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 $P(|0\rangle) + P(|1\rangle) = 1$, где $P(|0\rangle)$ и $P(|1\rangle)$ – 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:

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

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.

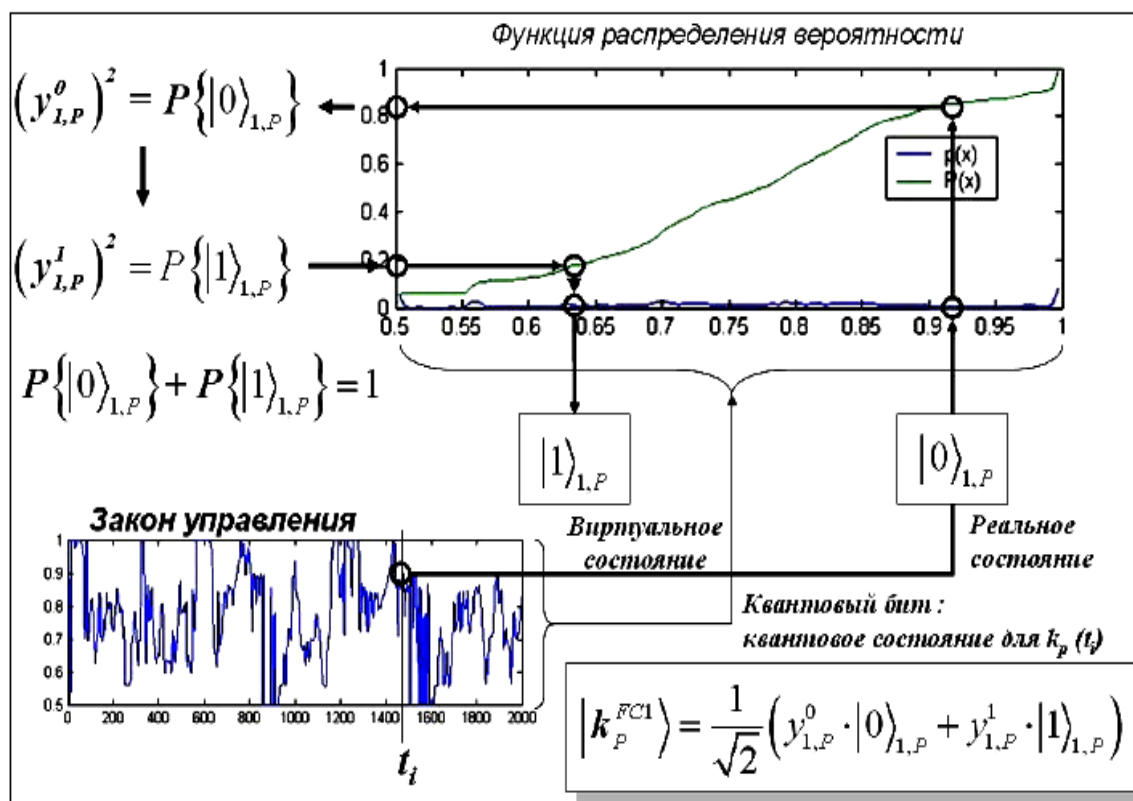


Рис. 2. Процесс формирования квантовых битов (блок 2)

Далее осуществляется выбор типа квантовой корреляции (рис. 1, блок 3) и 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*.

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

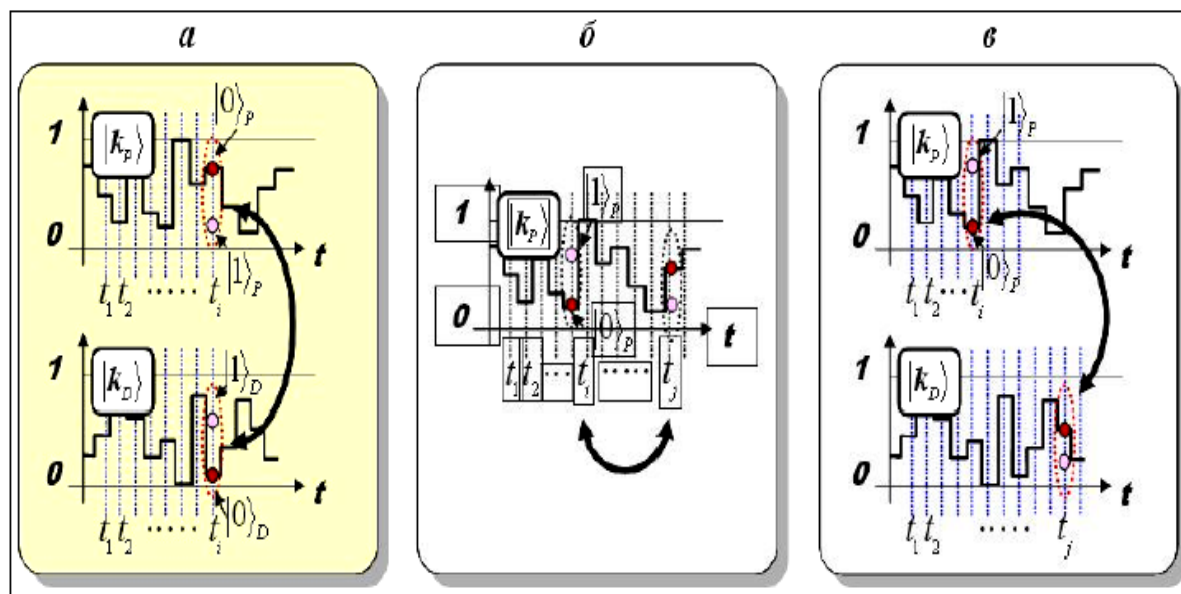


Рис. 3. Типы квантовых корреляций в законах управления коэффициентами усиления нечёткого ПИД-регулятора в процессе реального времени: а – пространственная, б – временная, в – пространственно-временная

Принципиальной отличительной чертой, характеризующей отношение между классической и квантовой типами корреляции, является наличие следующего факта. В квантовом варианте присутствует взаимная (смешанная) корреляция между *реальным* и *виртуальным* состояниями нормированного сигнала управления. Классическая корреляция в этом случае выступает частным случаем полной квантовой корреляции. Следовательно, полная корреляция состоит из следующих частей: классическая (между реальными значениями нормированного сигнала управления); квантовая (между виртуальными значениями нормированного сигнала управления) и смешанная (между реальными и виртуальными значениями нормированного сигнала управления). Первые два типа корреляций исследуются в корреляционной теории случайных (классических и квантовых) процессов. Третий тип является новым в теории квантовых случайных процессов и отражает эффект интерференции классической и квантовой корреляций. Такой тип полной корреляции содержит скрытую классическую корреляцию в сформированной суперпозиции квантовых битов и служит информационным ресурсом для извлечения дополнительной (ненаблюдаемой) ценной квантовой информации.

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.

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). Более подробное описание обозначений на рис. 4 дано ниже.

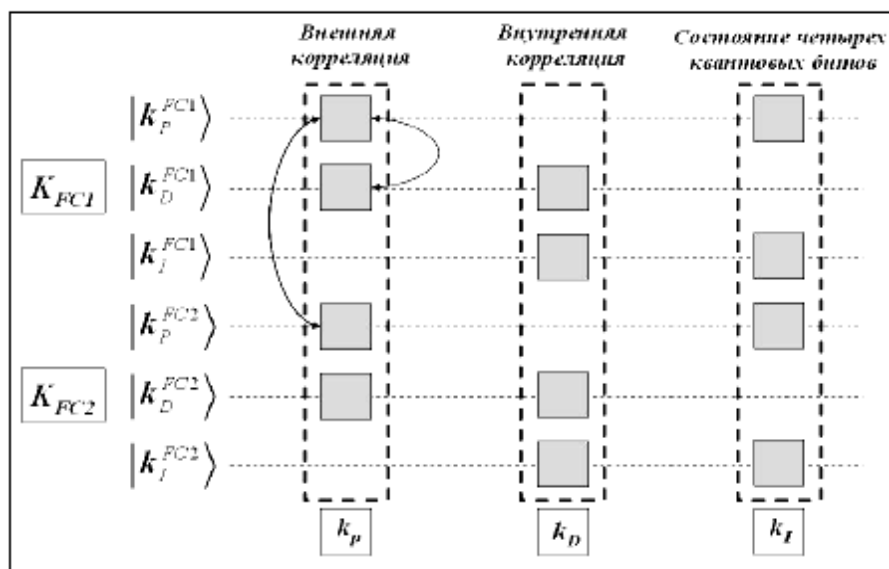


Рис. 4. Процесс формирования внутренней и внешней пространственной корреляции для новых коэффициентов усиления k_p, k_i, k_d

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 $\{k_p^{FC1}, k_p^{FC2}, k_d^{FC1}, k_d^{FC2}\}$.

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

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 нечеткого ПИД-регулятора за счёт применения квантового оператора суперпозиции. Операция суперпозиции позволяет осуществить логическое объединение различных БЗ и выделить приоритет корреляции отдельных состояний в суперпозиции БЗ с применением разнообразных критериев оптимизации. При использовании ОБЗ на мягких вычислениях формирование БЗ осуществляется путем случайного поиска в ГА на фиксированном пространстве поиска. При этом случайный поиск ведется независимо для трех коэффициентов усиления в нечетком ПИД-регуляторе. Это означает, что могут существовать другие наборы коэффициентов усиления, имеющие эквивалентный суммарный эффект управления.

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 перепутанных 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.

Выбор приоритетного в суперпозиции квантового состояния при фиксированном типе корреляции (в данном случае пространственном) осуществляется в блоке 5 на рис. 1. Рассмотрим возможный подход к выбору критерия оптимизации извлечения приоритетного состояния из сформированной (блоке 4 на рис. 1) суперпозиции закодированных возможных состояний коэффициентов усиления нечёткого ПИД-регулятора.

Для этой цели используется понятие «интеллектуального квантового состояния», введенное в квантовую теорию измерений как состояния с минимальной неопределенностью (в смысле минимума неравенства неопределенности Гейзенберга) [13, 15]. Данное понятие связывают также с решениями квантовых волновых уравнений (типа Шредингера и др.), для которых волновой пакет состояния квантовой системы является когерентным состоянием. На нем соотношение неопределенности достигает глобального минимума. Определение и вычисление состояния в КА дано в работе [12, 13] на основе определения энтропии фон Неймана и информационной энтропии Шеннона в данном квантовом состоянии. Согласно [15], «интеллектуальное квантовое состояние» в КА есть минимум разности между информационной энтропией квантового состояния Шеннона и физической энтропией квантового состояния фон Неймана:

$$I(|\text{квантовое состояние}\rangle) = \min(H^{\text{Sh}} - S^{\text{vN}}), \quad (1)$$

где H^{Sh} и S^{vN} – энтропии Шеннона и фон Неймана соответственно.

Согласно законам квантовой теории информации, имеем следующее неравенство:

$$H^{\text{Sh}} \geq S^{\text{vN}} \text{ т.е., } I(|\text{квантовое состояние}\rangle) \geq 0.$$

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 [16]).

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 $H^{\text{Sh}} = -\sum_i P_i \ln P_i$, 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 [17, 18].

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.

Схематично данный алгоритм показан на рис. 6.

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.

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 (VQP – класс вычислительной сложности) [19].

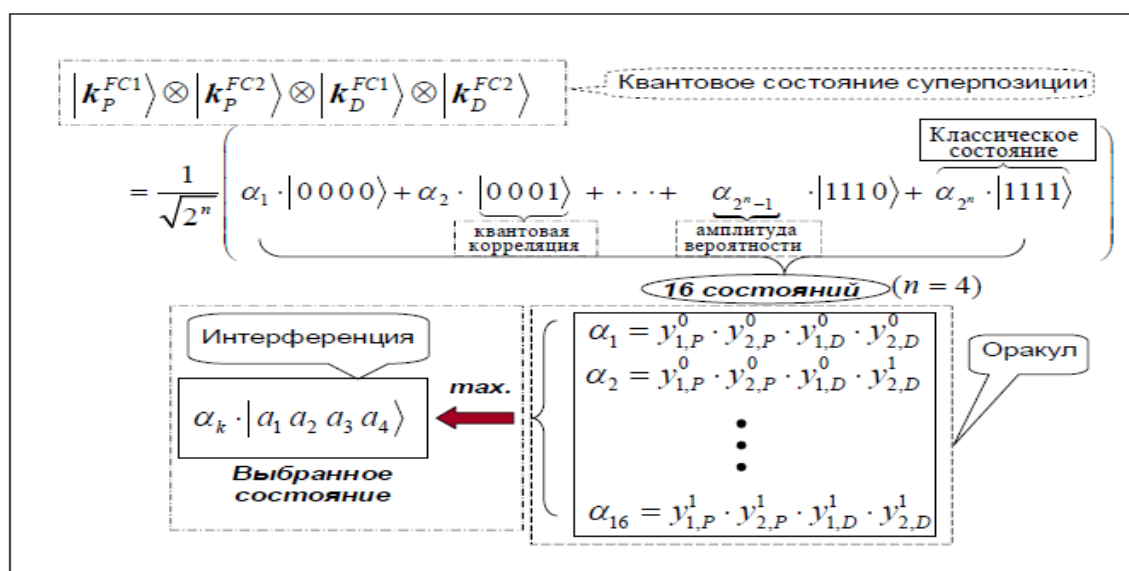


Рис. 6. Выбор квантового состояния по принципу максимума амплитуды вероятностей (минимума информационной энтропии Шеннона)

Квантовые вычисления на классическом процессоре с применением в робастном управлении неустойчивым ОУ

Создания системы управления на основе КНВ осуществляется с использованием разработанного программного инструментария «Квантовый оптимизатор».

Рабочее окно этого продукта представлено на рис. 7.

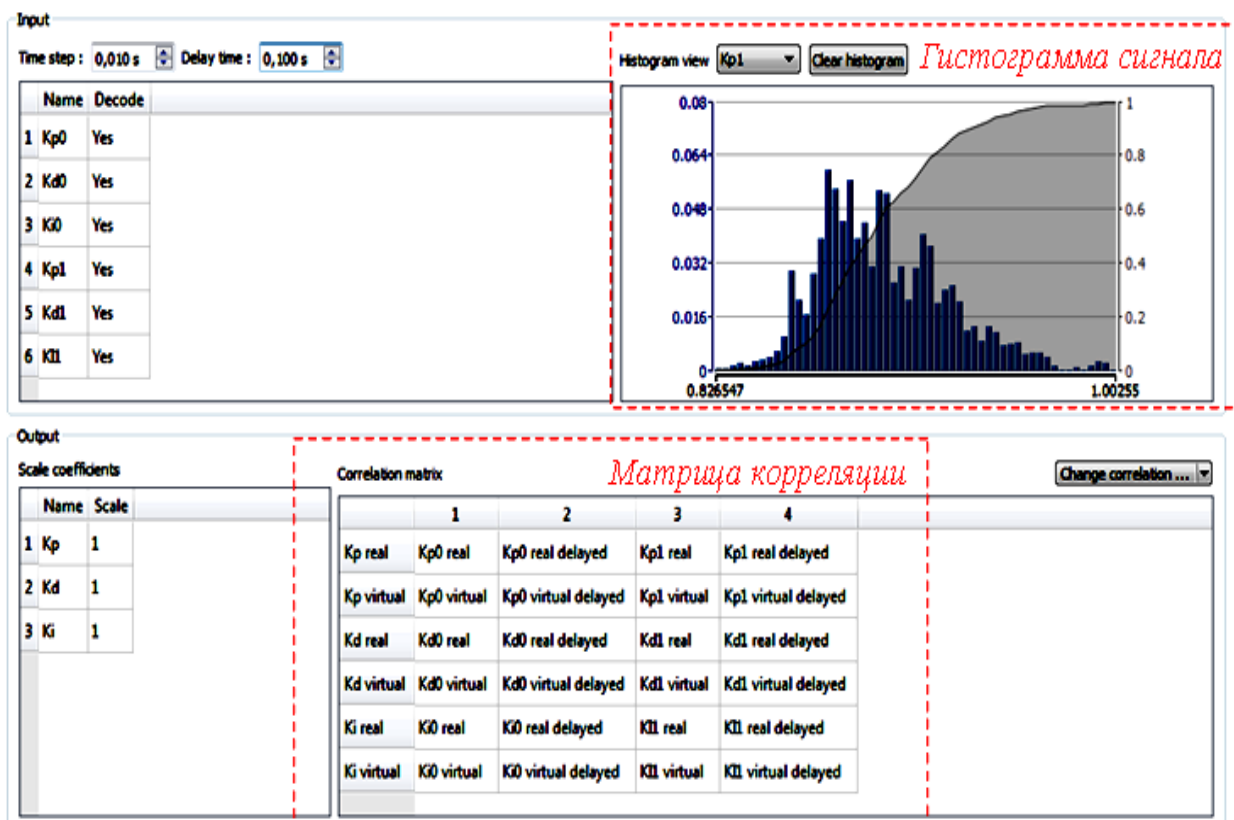


Рис. 7. Рабочее окно квантового оптимизатора

Примечание. Снизу на рис. 7 отображена матрица временной корреляцией для формирования запутанного состояния; сверху изображена 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. Рассмотрим возможность применения КНВ для объединения БЗ, полученных на основе обучающего сигнала с физического объекта (ГА-ПИД регулятор) и верифицированной математической модели [20] (рис. 8).

В таком контексте возможно сформировать три типа квантового НР на основе:

- двух БЗ с модели (FC1 и FC2 [20]);
- БЗ с модели и БЗ с макета (FC1 и FC3 [20]);
- двух БЗ с макета (FC3 и FC4 [20]).

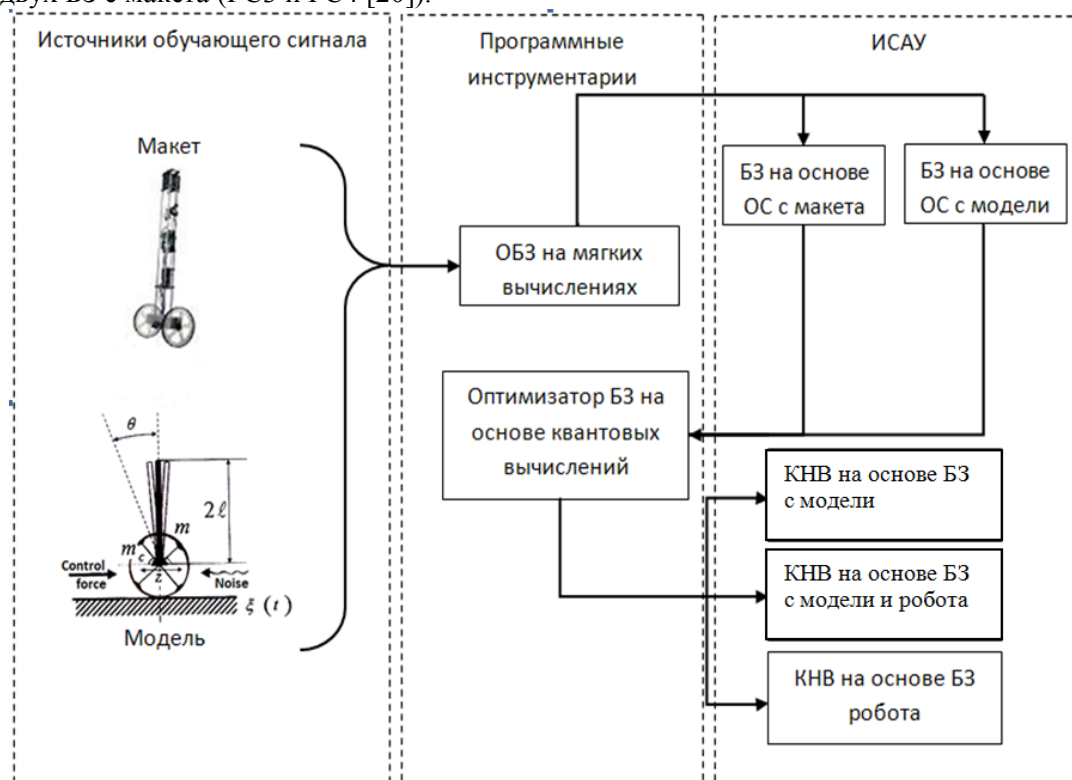


Рис. 8. Технология применения КНВ для проектирования робастных БЗ

В таблице 1 приведено сравнение БЗ используемых для формирования КНВ.

Таблица 1. Сравнение БЗ

База №	Количество правил	Кол-во ф-ций принадлежности	Способ оптимизации
БЗ 1 Модель (FC1)	245	8x6x6	Моделирование
БЗ 2 Модель	276	8x9x6	Моделирование
БЗ 3 Макет (FC2)	288	9x9x6	Аппроксимация ОС (ГА2)
БЗ 4 Макет	270	5x8x8	Аппроксимация ОС (ГА2)

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 и моделирования, в типовой ситуации управления. Используя полученные значения коэффициентов усиления при работе модели и макета, формируется массив данных

для построения гистограмм коэффициентов усиления ПИД регуляторов (рис. 10). Построение гистограмм происходит автоматически при загрузке данных в квантовый оптимизатор. В дальнейшем эти гистограммы используются в алгоритме КНВ для формирования виртуальных состояний.

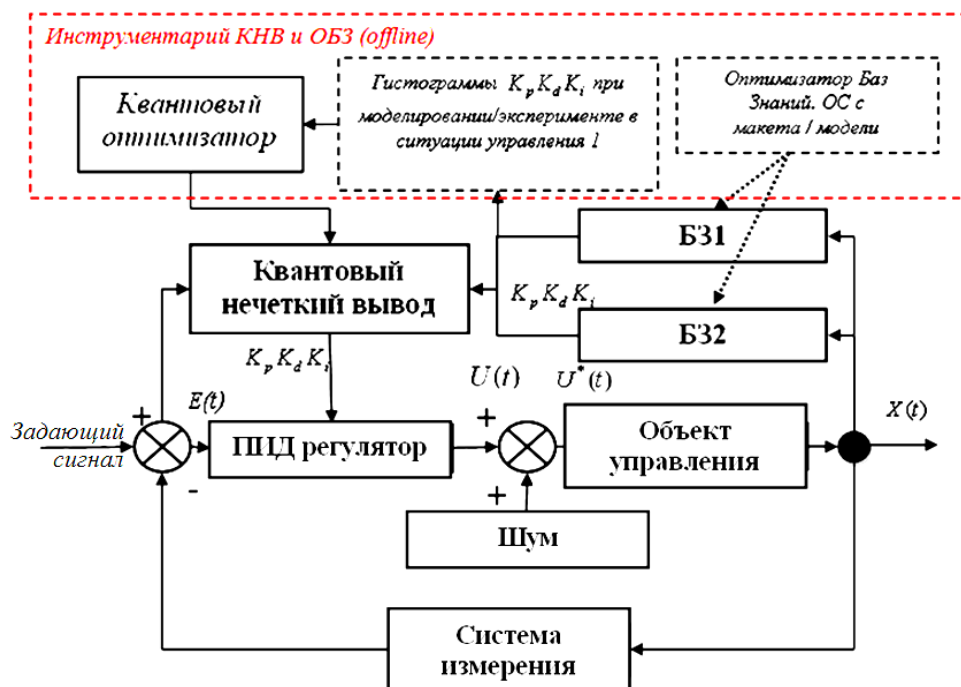


Рис. 9. Структура квантового нечеткого регулятора

Гистограммы коэффициентов усиления полученные экспериментально используются в формировании КНВ для робота (в физическом эксперименте), гистограмм коэффициентов усиления, полученных с использованием математической модели, и применяются в формировании КНВ для моделирования робастного интеллектуального управления роботом.

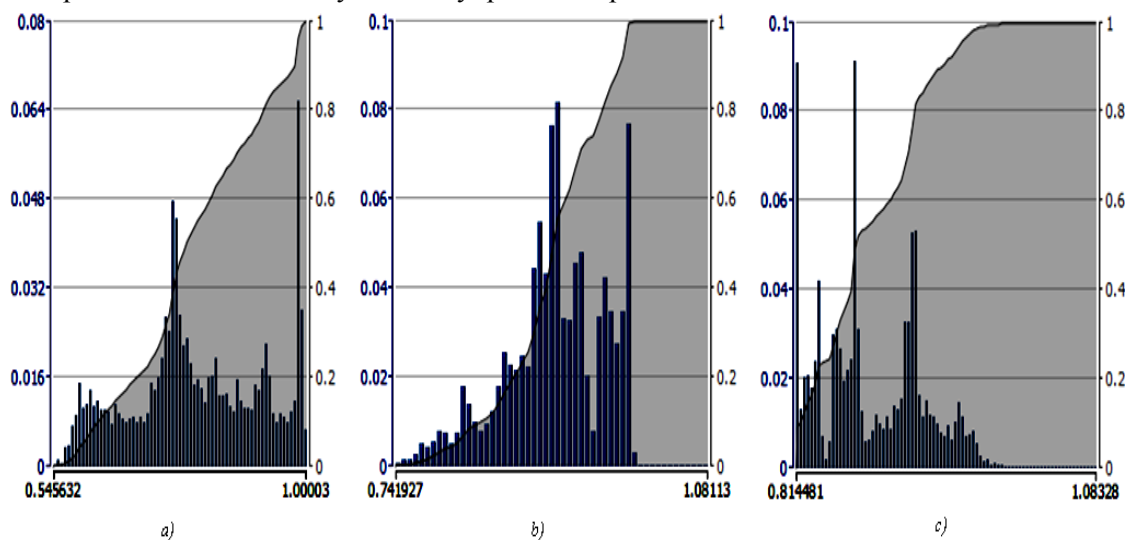


Рис. 10. Гистограммы выходов нечетких регуляторов

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 (рис. 7). В квантовом оптимизаторе используются корреляции трех видов: пространственная, пространственно – временная и временная (рис. 3).

На следующем и заключительном шаге, устанавливаются соответствующие максимальные и минимальные значения для входных и выходных сигналов КНВ в специальном окне программы (рис. 11).

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	KI1	16.6667	0.31	0.37	0.31	No
Normalization equation is Internal=(External-Offset)*Scale						
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. 11. Окно КНВ. Нормализация и денормализация сигнала с макета

В результате проектирования выходной сигнал из блока КНВ применяется для управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора в случае моделирования математической модели, а для робота в физическом эксперименте применяется экспортируемый файл с расширением «*.c».

Моделирование и эксперимент

Рассмотрим практическое применение разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора. Математическое моделирование и физический эксперимент проводились для двух ситуаций управления:

- в первой (типовой) ситуации (C1) задержка управляющего сигнала стандартная – 0.01 сек;
- во второй непредвиденной ситуации (C2) задержка управляющего сигнала – 0.04 сек (увеличенная в четыре раза).

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

Таблица 2. Ситуации управления и параметры математических моделей

	Типовая ситуация (C1)	Непредвиденная (C2)
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	0.01	0.05

На рис. 12 представлена структура системы моделирования.

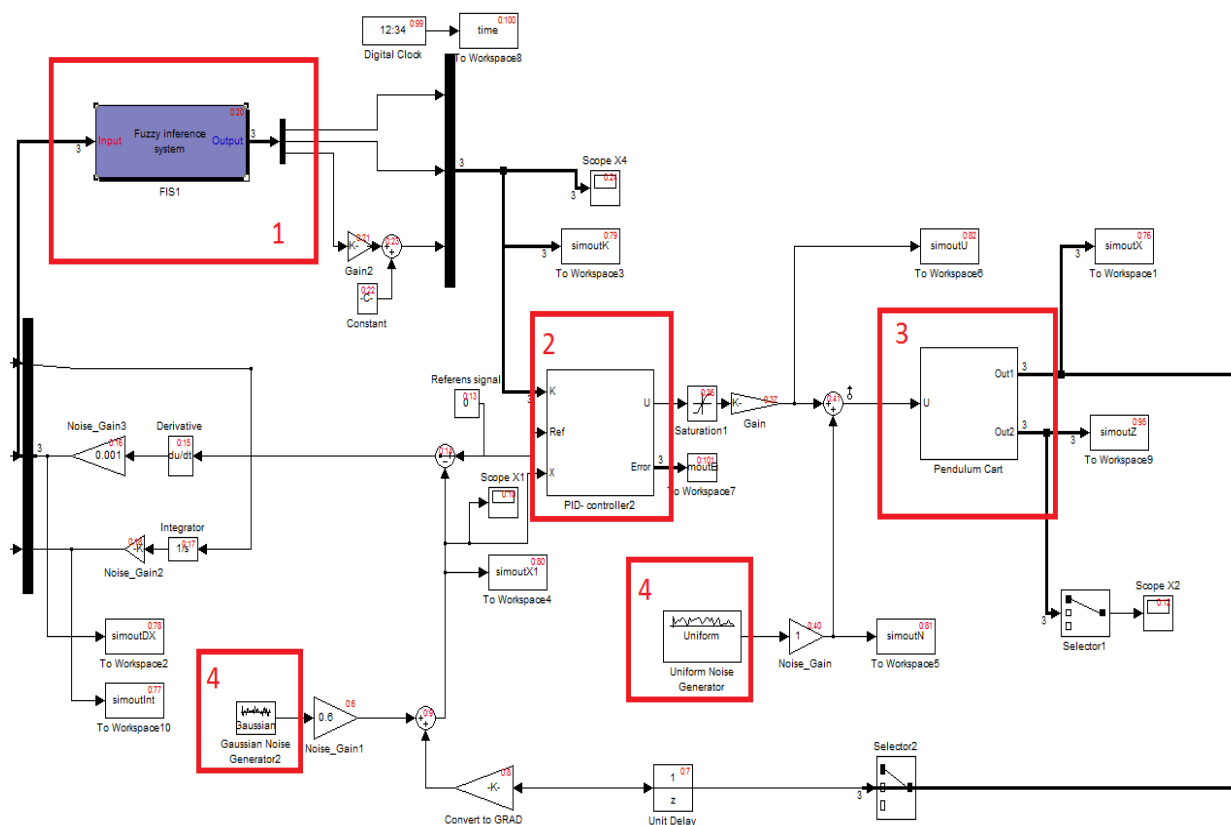


Рис. 12. Структура системы моделирования в среде MatLab/Simulink. На схеме обозначены: 1. – Блок КНВ; 2. – ПИД-регулятор; 3. – Объект управления; 4. – Генераторы шумов

На рис. 13-18 представлены результаты моделирования нечетких регуляторов и КНВ на основе этих регуляторов с различными видами корреляций.

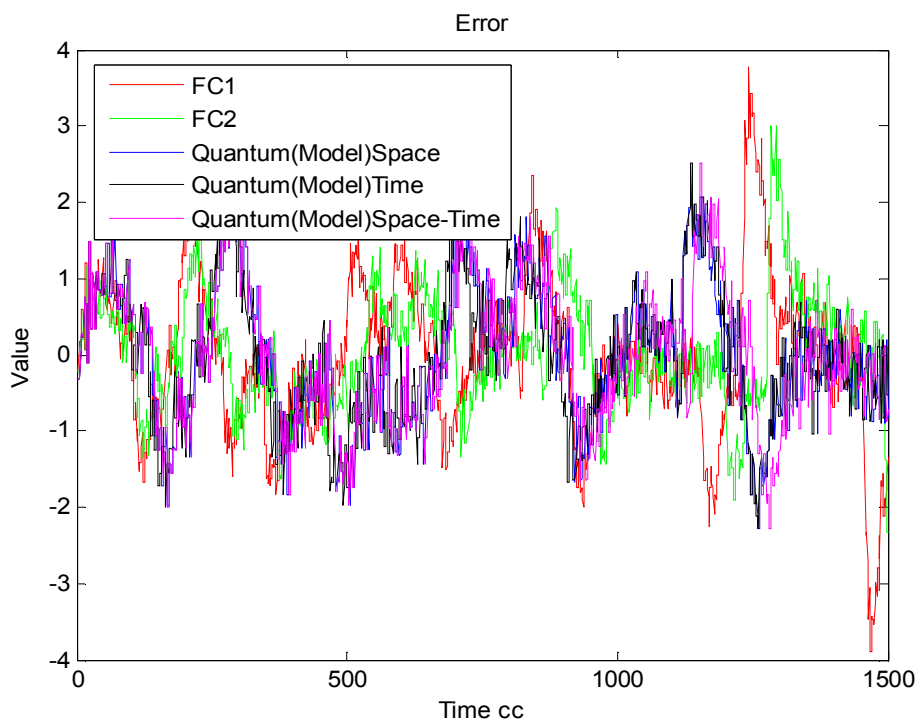


Рис. 13. Угол отклонения математической модели. Типовая ситуация управления СИ НР на основе ОС с модели и КНВ на основе этих регуляторов

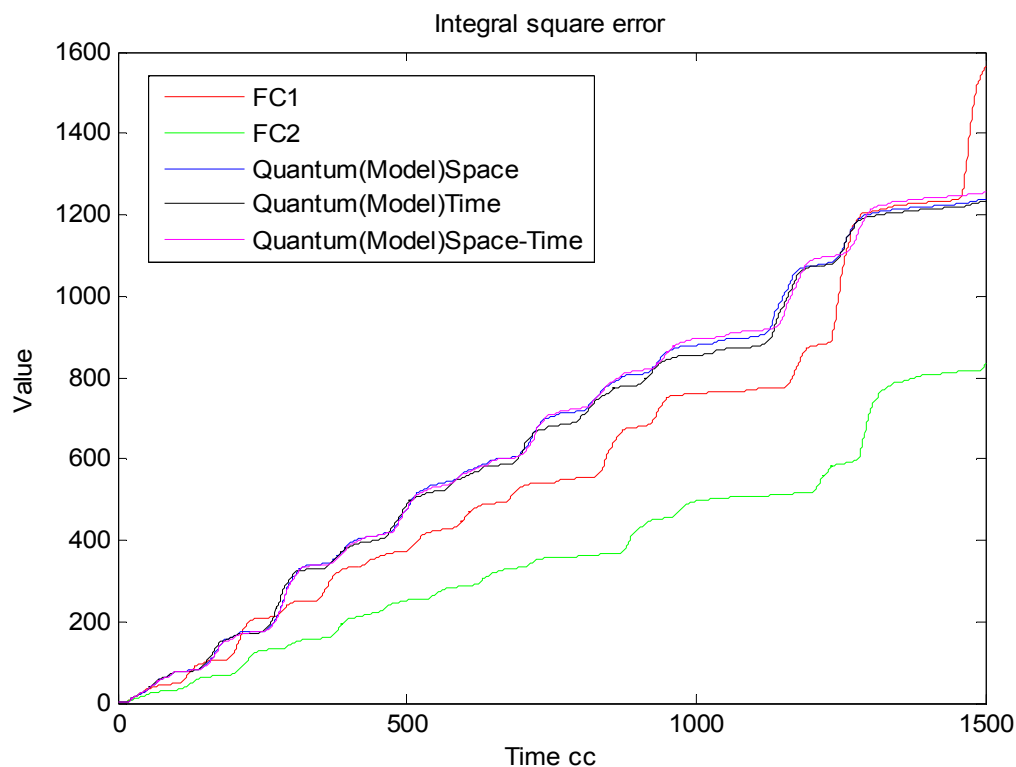


Рис. 14. Интеграл квадратичной ошибки. Моделирование. Типовая ситуация управления. НР на основе ОС с модели и КНВ на основе этих регуляторов

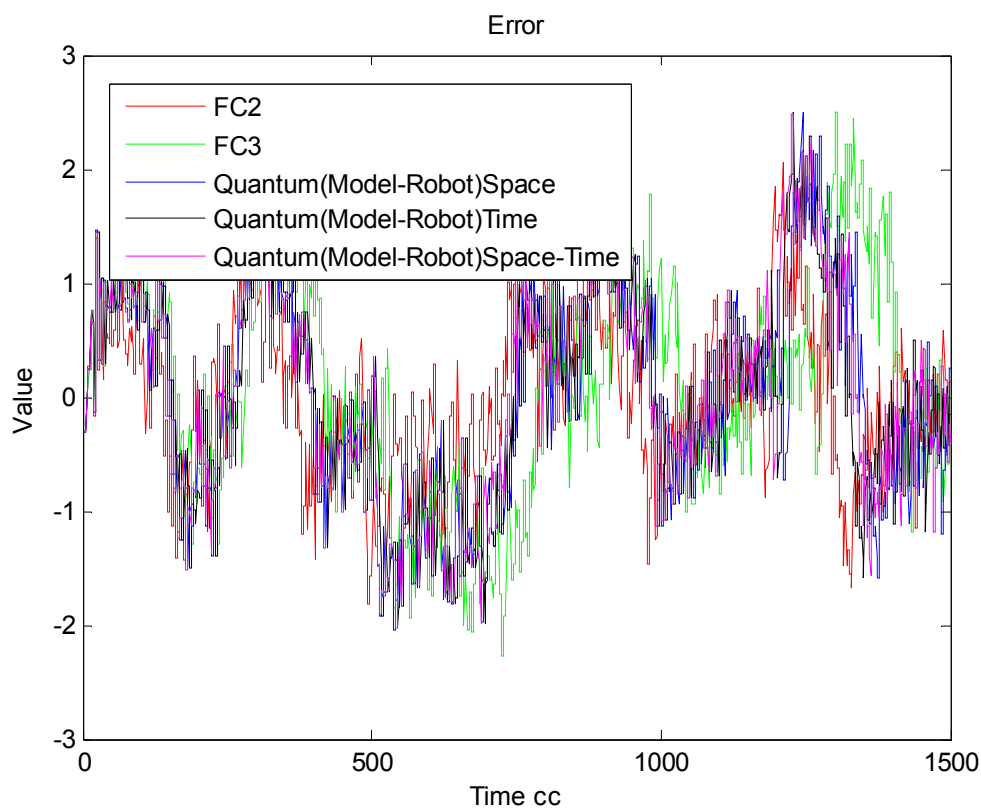


Рис. 15. Угол отклонения математической модели. Типовая ситуация управления. НР на основе ОС с модели и макета, и КНВ на основе этих регуляторов

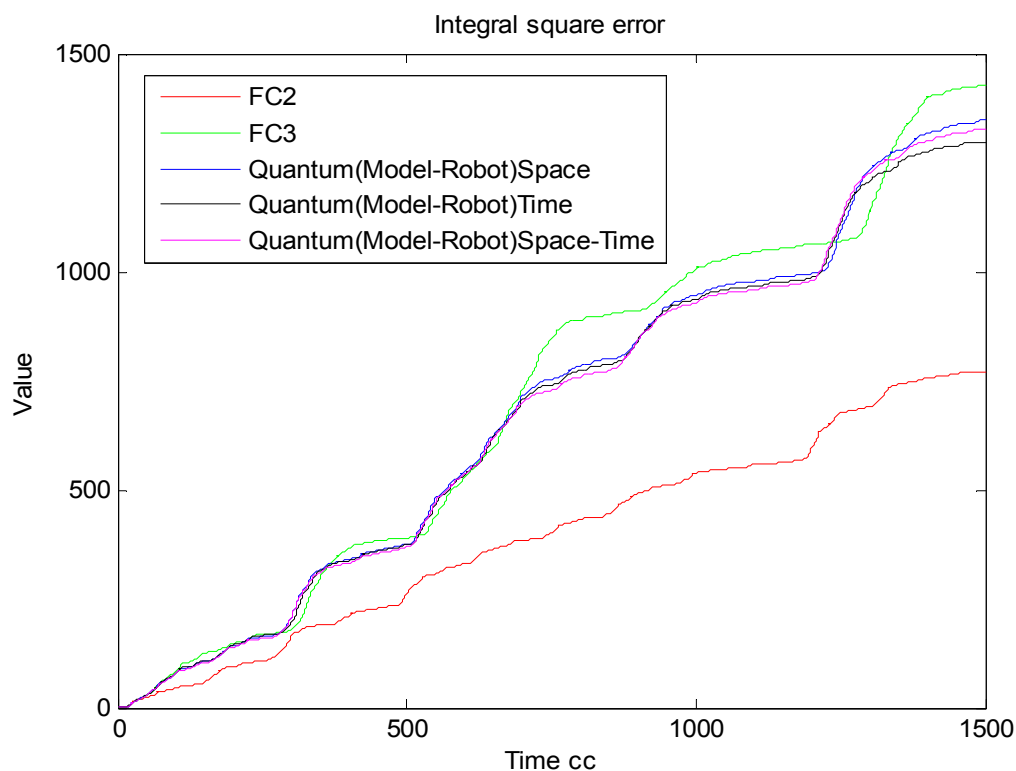


Рис. 16. Интеграл квадратичной ошибки. Моделирование. Типовая ситуация управления. НР на основе ОС с модели и макета, и КНВ на основе этих регуляторов

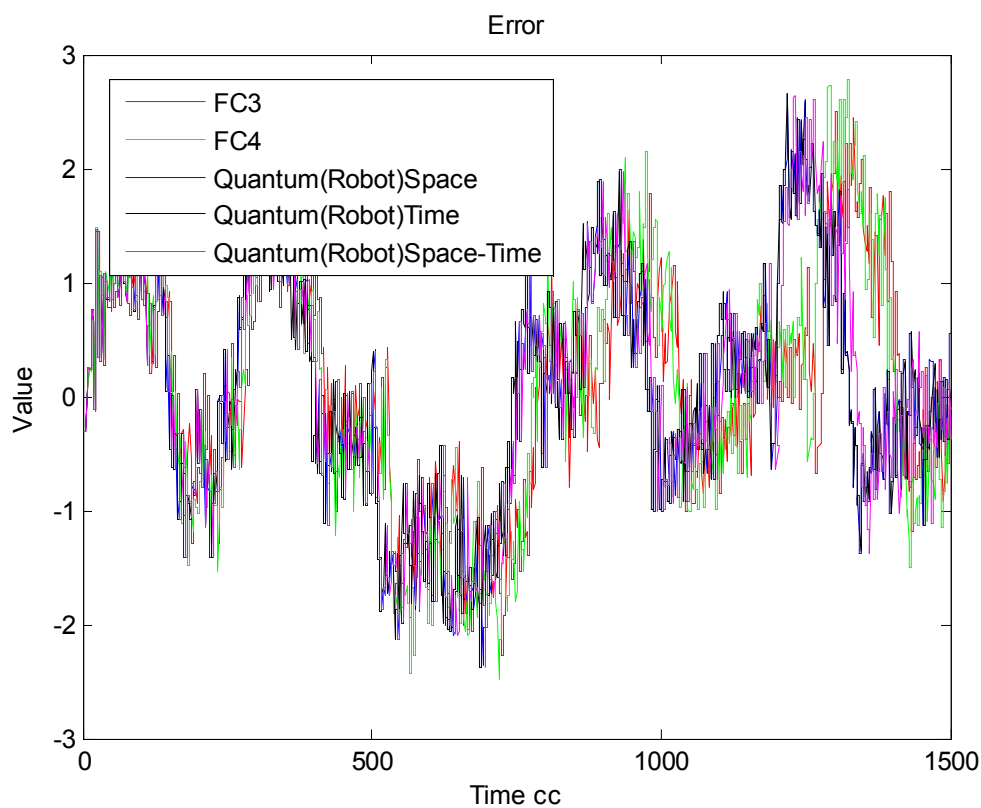


Рис. 17. Угол отклонения математической модели. Типовая ситуация управления. НР на основе ОС с макета и КНВ на основе этих регуляторов

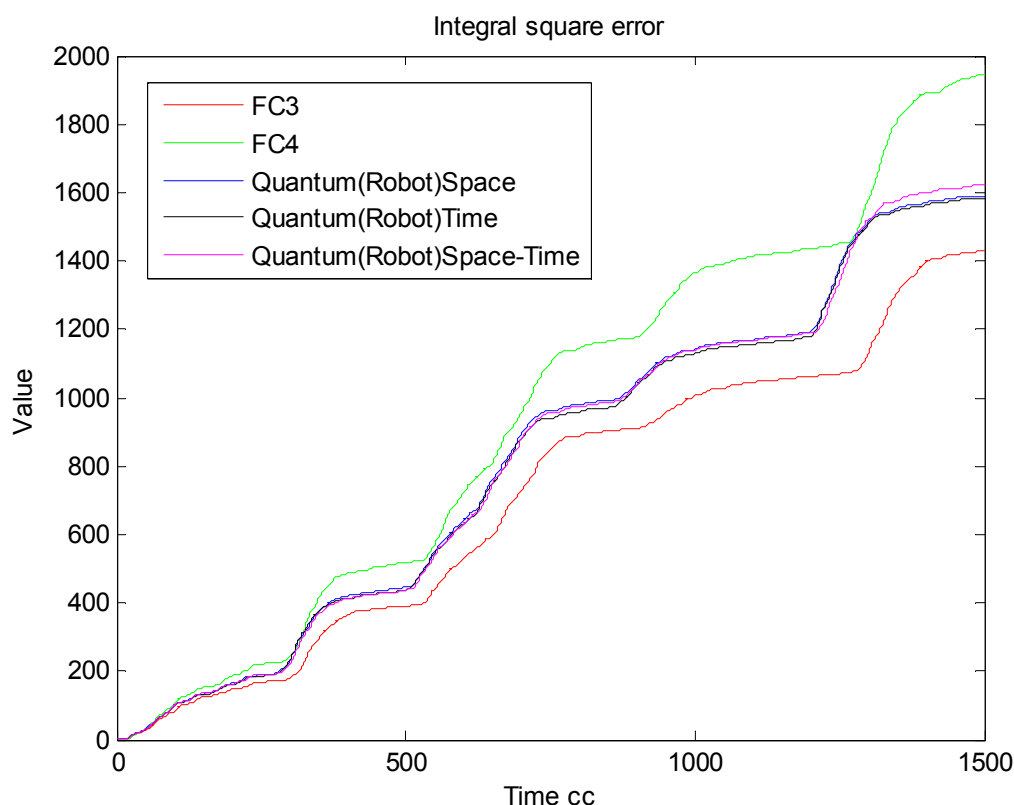


Рис. 18. Интеграл квадратичной ошибки. Моделирование. Типовая ситуация управления.
НР на основе ОС с макета и КНВ на основе этих регуляторов

Рассмотри связь между входными и выходными значениями КНВ на основе БЗ с физического макета робота и БЗ с математической модели, на примере пропорционального коэффициента усиления.

На рис. 19, 26, 36 и 40а представлены входные значения КНВ (коэффициенты усиления НР) и выходное значение пропорционального коэффициента КНВ на основе БЗ с физического макета робота и БЗ с математической модели при временной корреляции.

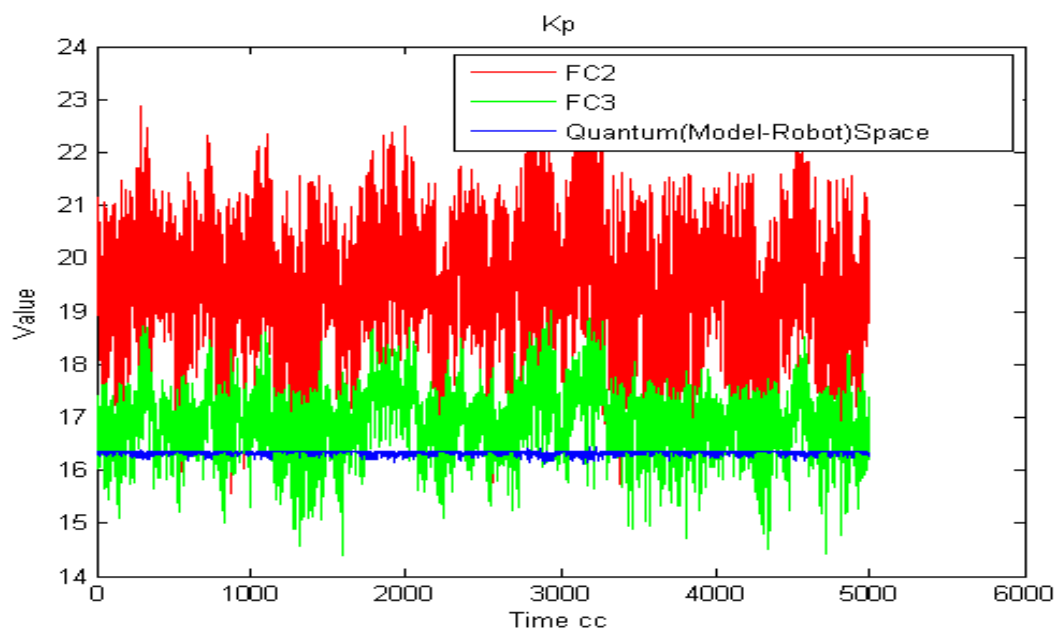


Рис. 19. Коэффициент усиления K_p . Входные и выходные значения КНВ.
Моделирования в типовой ситуации управления

Далее на рис. 20-25 представлены результаты моделирования в непредвиденной ситуации управления.

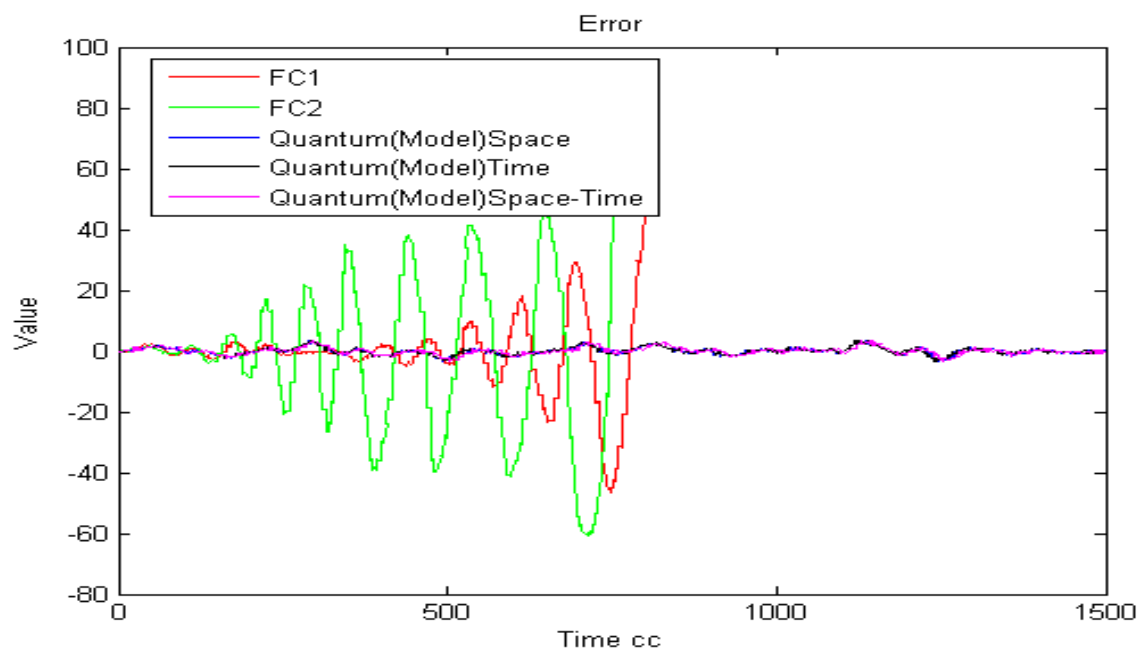


Рис. 20. Угол отклонения математической модели. Непредвиденная ситуация управления. Нечеткие регуляторы на основе ОС с модели и КНВ на основе этих регуляторов

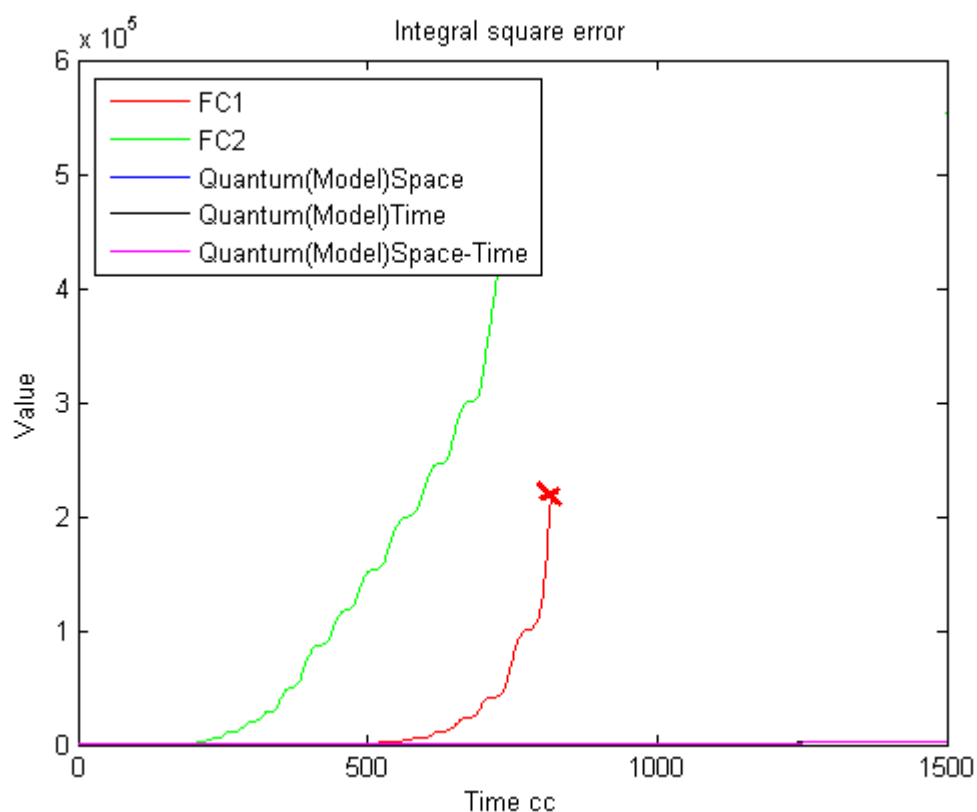


Рис. 21. Интеграл квадратичной ошибки. Моделирование. Типовая ситуация управления. НР на основе ОС с модели, и КНВ на основе этих регуляторов

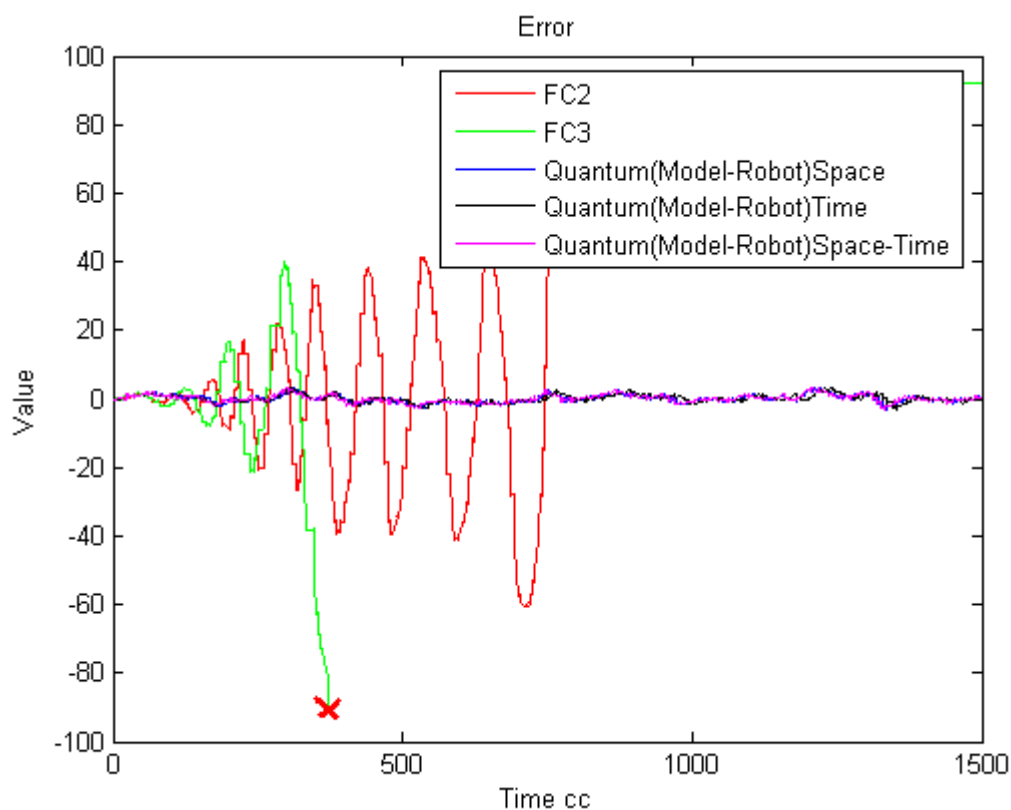


Рис. 22. Угол отклонения математической модели. Непредвиденная ситуация управления. НР на основе ОС с модели и макета, и КНВ на основе этих регуляторов

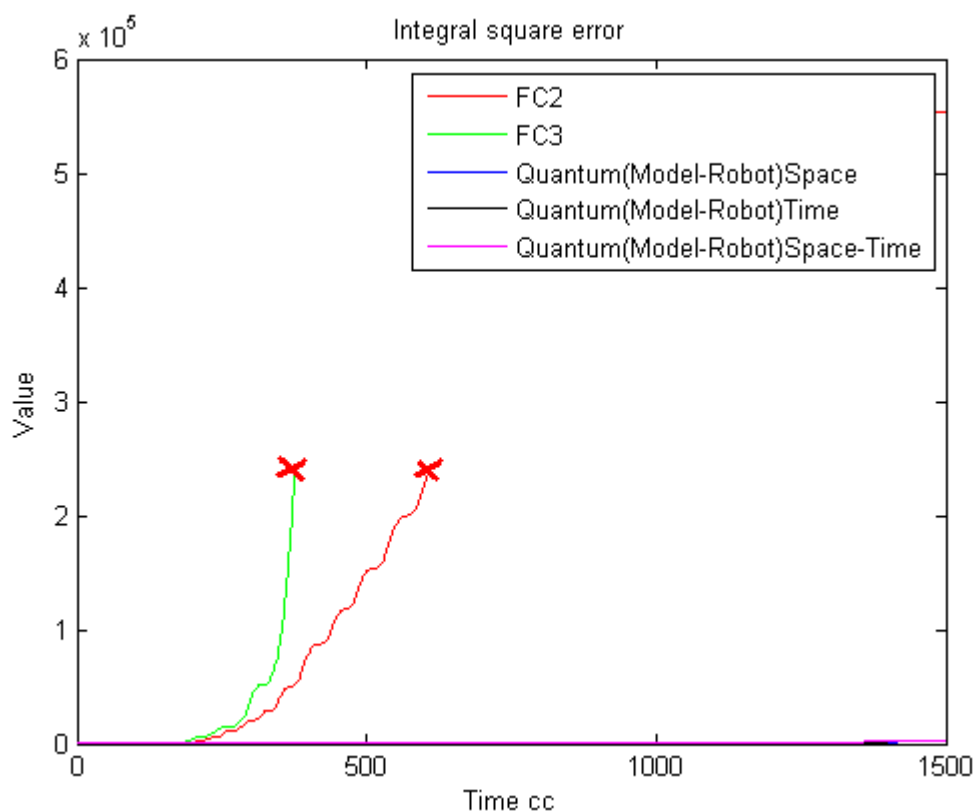


Рис. 23. Интеграл квадратичной ошибки. Моделирование. Типовая ситуация управления. НР на основе ОС с модели и макета, и КНВ на основе этих регуляторов

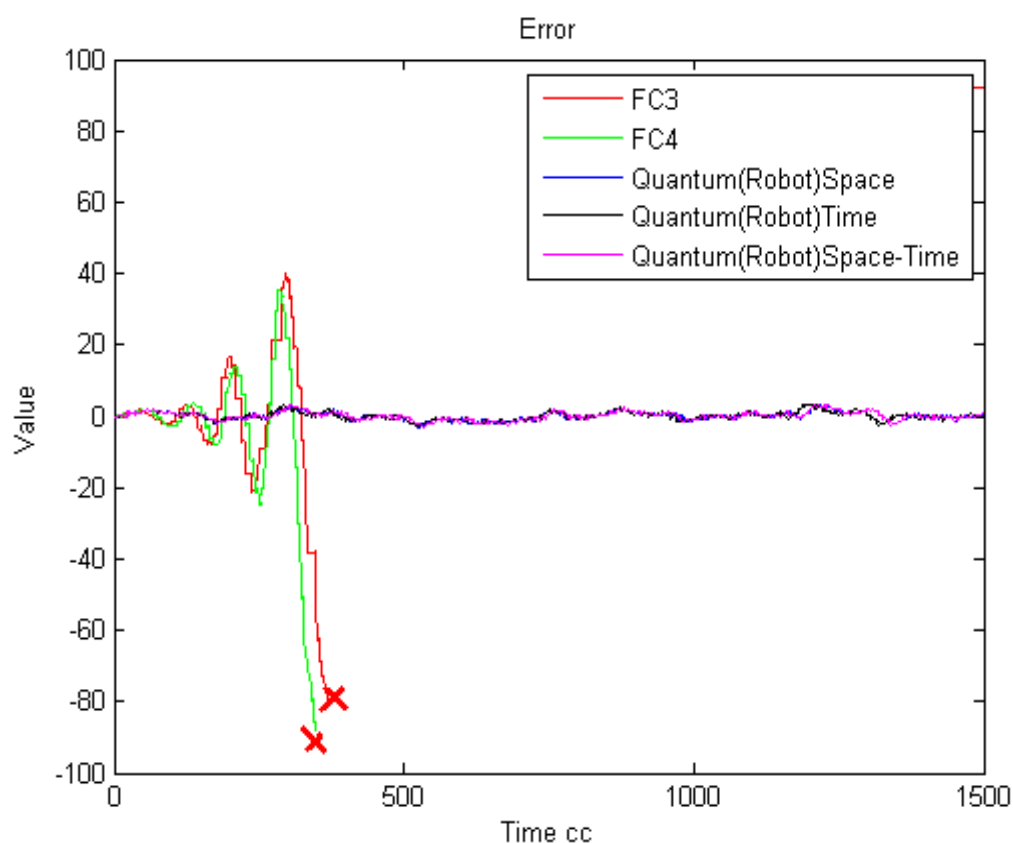


Рис. 24. Угол отклонения математической модели. Непредвиденная ситуация управления. НР на основе ОС с макета и КНВ на основе этих регуляторов

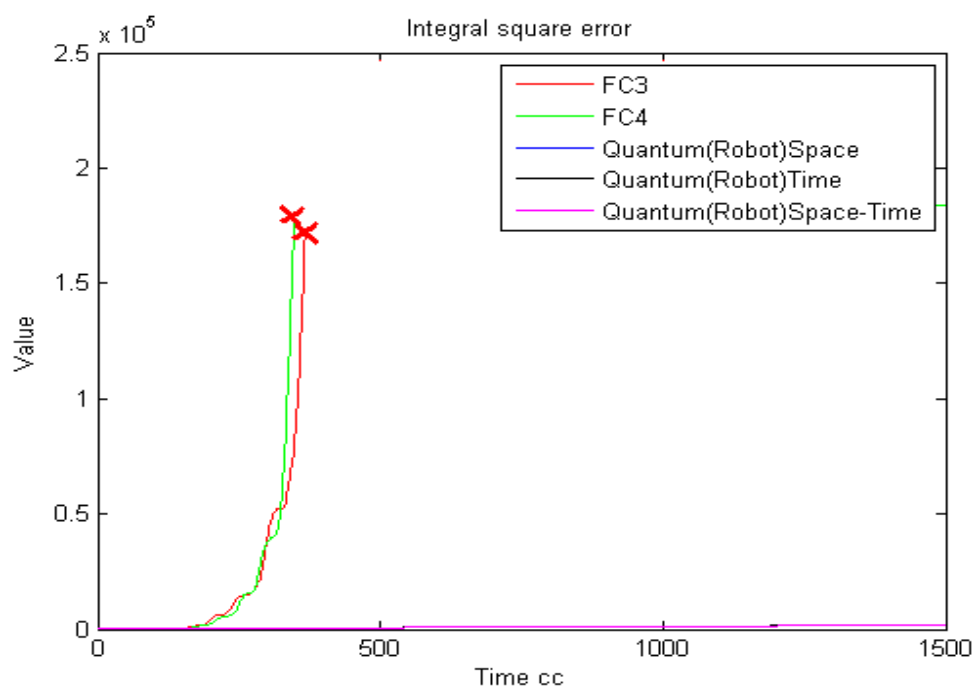


Рис. 25. Интеграл квадратичной ошибки. Моделирование. Типовая ситуация управления. НР на основе ОС с макета и КНВ на основе этих регуляторов

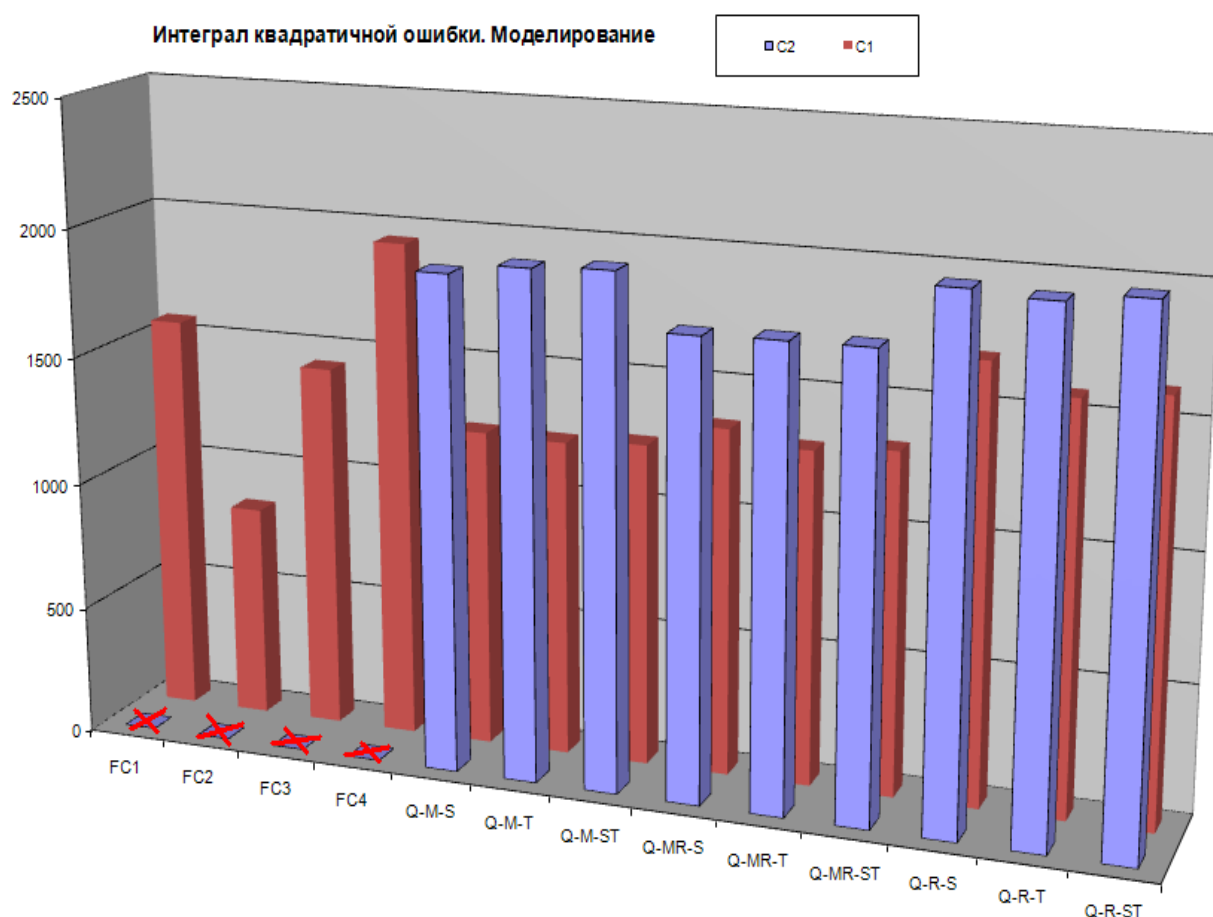


Рис. 26. Интеграл квадратичной ошибки. Непредвиденная и типовая ситуации управления. FC1-FC4 – нечеткие регуляторы, сокращения Q-quantum, M(Model)-две базы с модели, MR(ModelRobot)-база с макета и база с модели, R(Robot)-две базы с робота, виды корреляций S(Space) – пространственная, T(Time) – временная, ST(SpaceTime) – пространственно временная

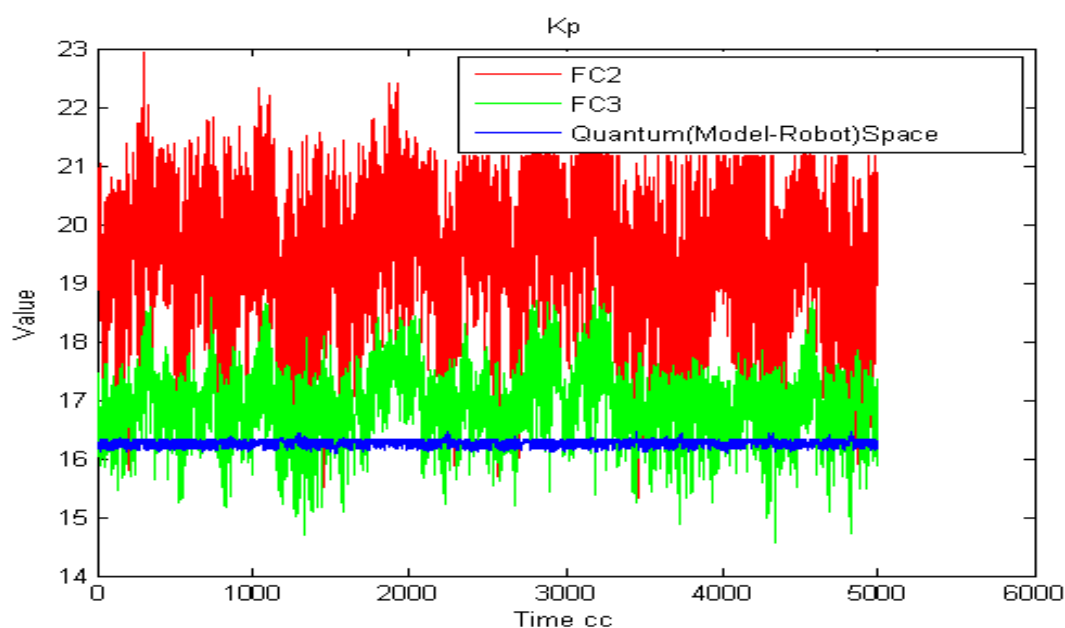


Рис. 27. Коэффициенты моделирование в непредвиденной ситуации

Квантовые регуляторы на основе различных корреляций функционируют примерно с одинаковой интегральной ошибкой. На рис. 26 можно заметить, что значение интегральной ошибки располагается между контроллерами образовавшими КНВ. Моделирование показало, что лучшая корреляция для данного типа ОУ это временная корреляция.

В дальнейшем для эксперимента и анализа регуляторов будет использовать квантовые регуляторы на основе временной корреляции и нечеткие регуляторы FC2 и FC3, так как именно эти регуляторы показали низкий уровень интегральной квадратичной ошибки управления.

Для проведения экспериментов использовался робот (рис. 28) на основе микроконтроллера Microchip® PIC32MX320F128 [20]. Алгоритм работы микроконтроллера представлен на рис 29.

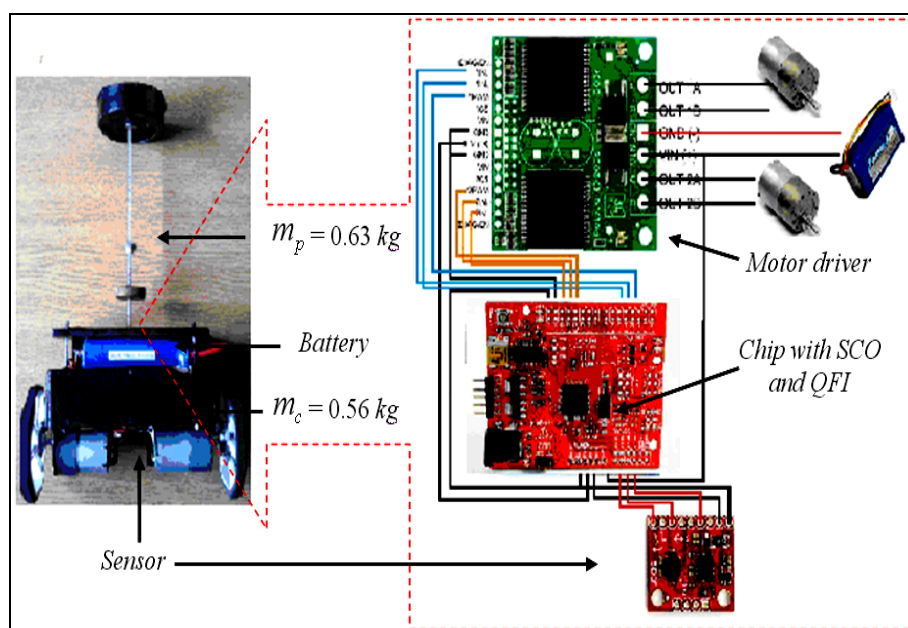


Рис. 28. Макет робота (слева) и элементы платы управления робота (справа)

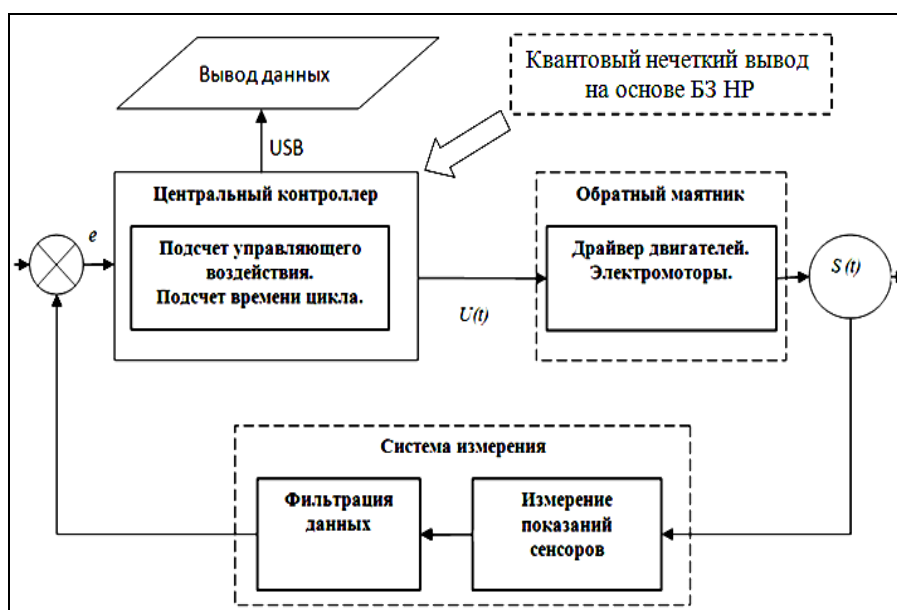


Рис. 29. Алгоритм работы робота

Рассмотрим поведение НР и квантовых регуляторов, основанных на различных источниках ОС, в типичной ситуации управления.

На рис. 30-36 представлены результаты экспериментов в типичной ситуации управления.

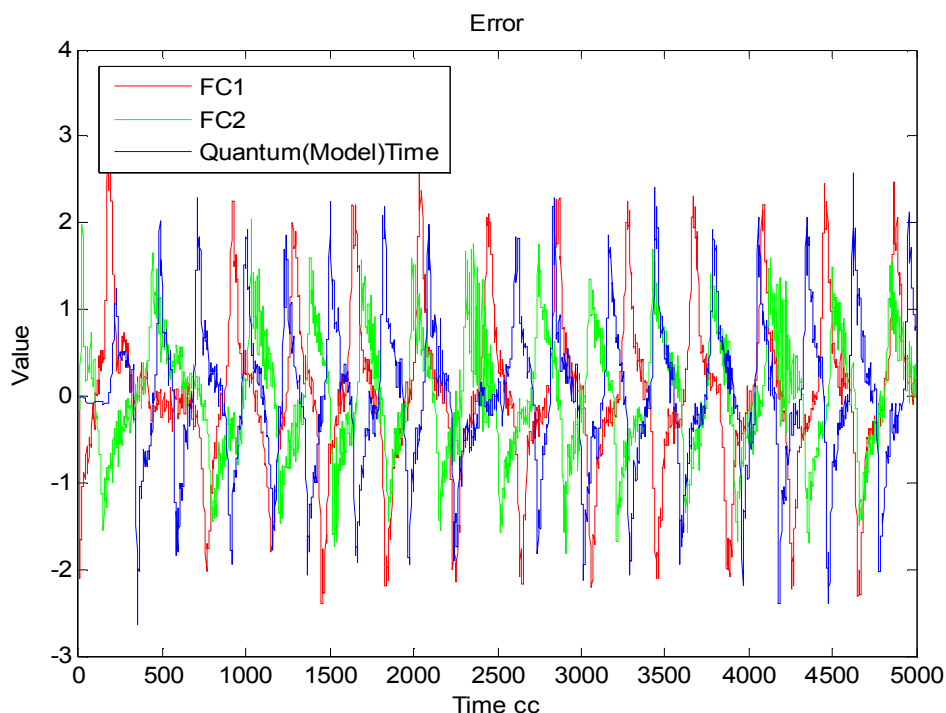


Рис. 30. Угол отклонения макета. Типовая ситуация управления.
НР на основе ОС с модели и КНВ на основе этих регуляторов

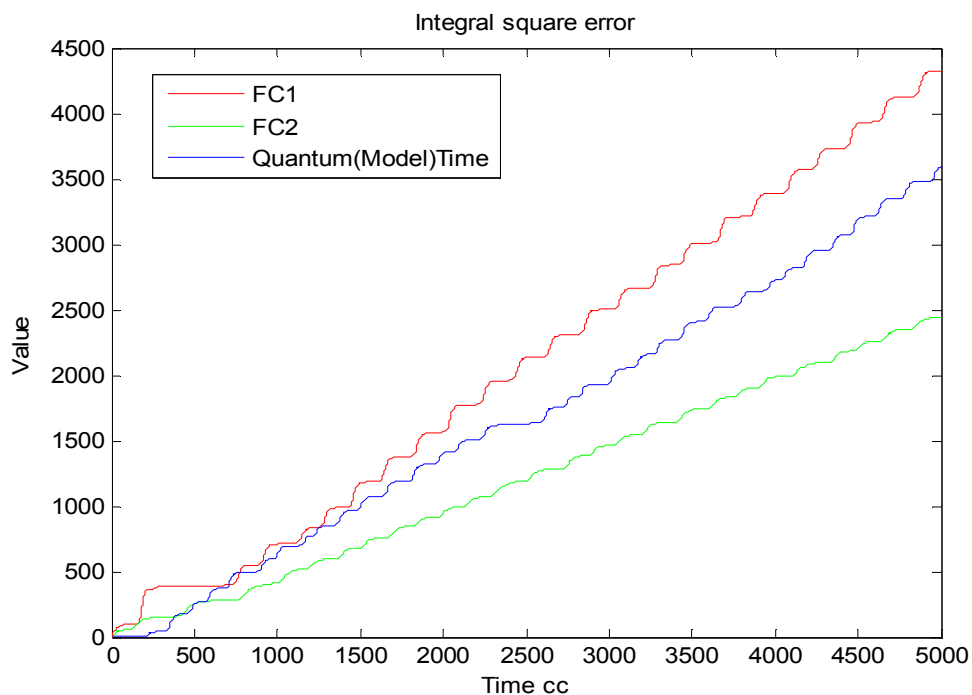


Рис. 31. Интеграл квадратичной ошибки. Эксперимент в типовой ситуации управления.
НР на основе ОС с модели и КНВ на основе этих регуляторов

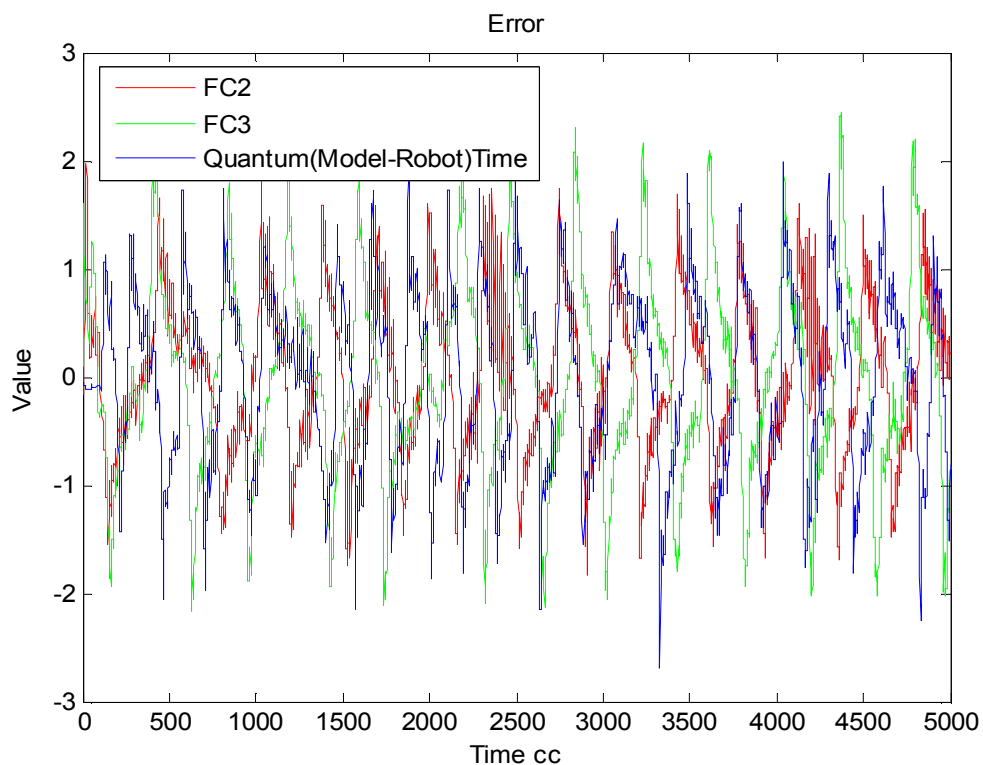


Рис. 32. Угол отклонения макета. Эксперимент в типовой ситуации управления НР на основе ОС с модели и макета, и КНВ на основе этих регуляторов

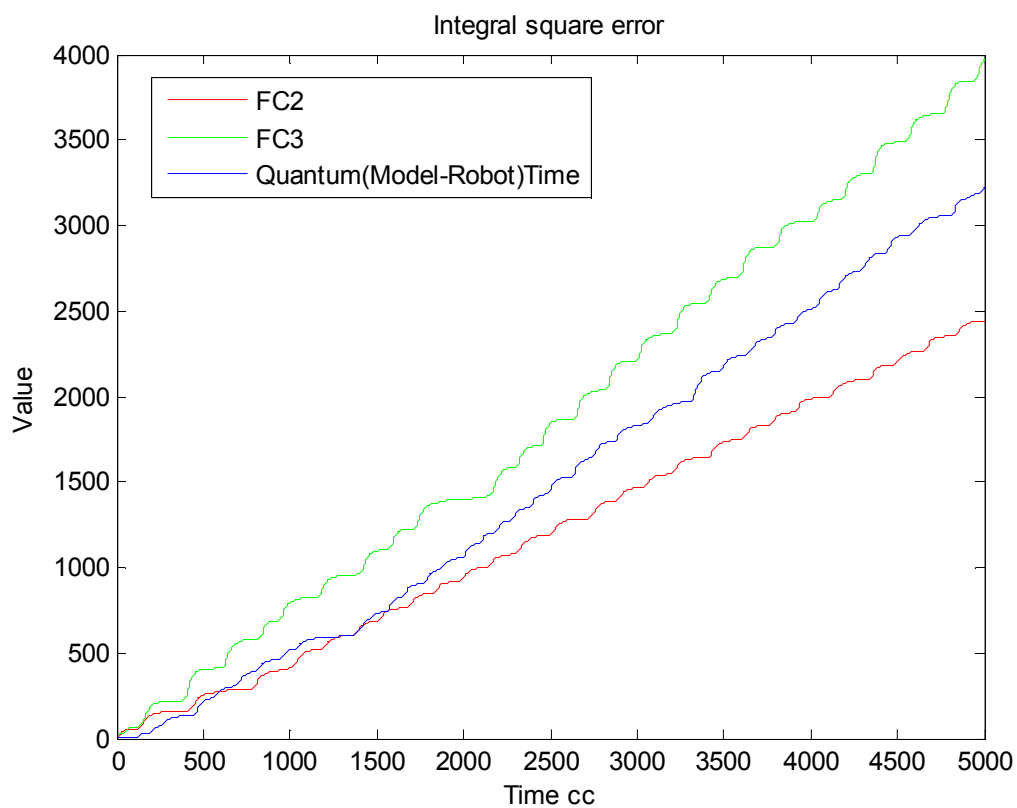


Рис. 33. Интеграл квадратичной ошибки. Эксперимент в типовой ситуации управления. НР на основе ОС с модели и макета, и КНВ на основе этих регуляторов

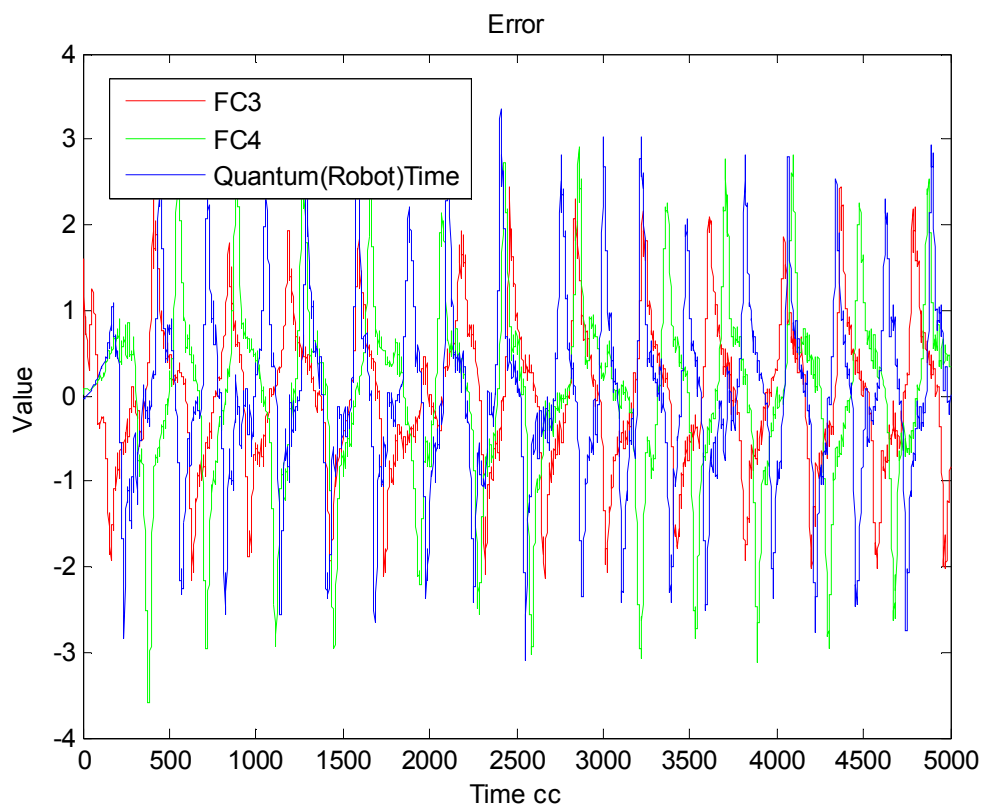


Рис. 34. Угол отклонения макета. Эксперимент в типовой ситуации управления.
НР на основе ОС с макета и КНВ на основе этих регуляторов

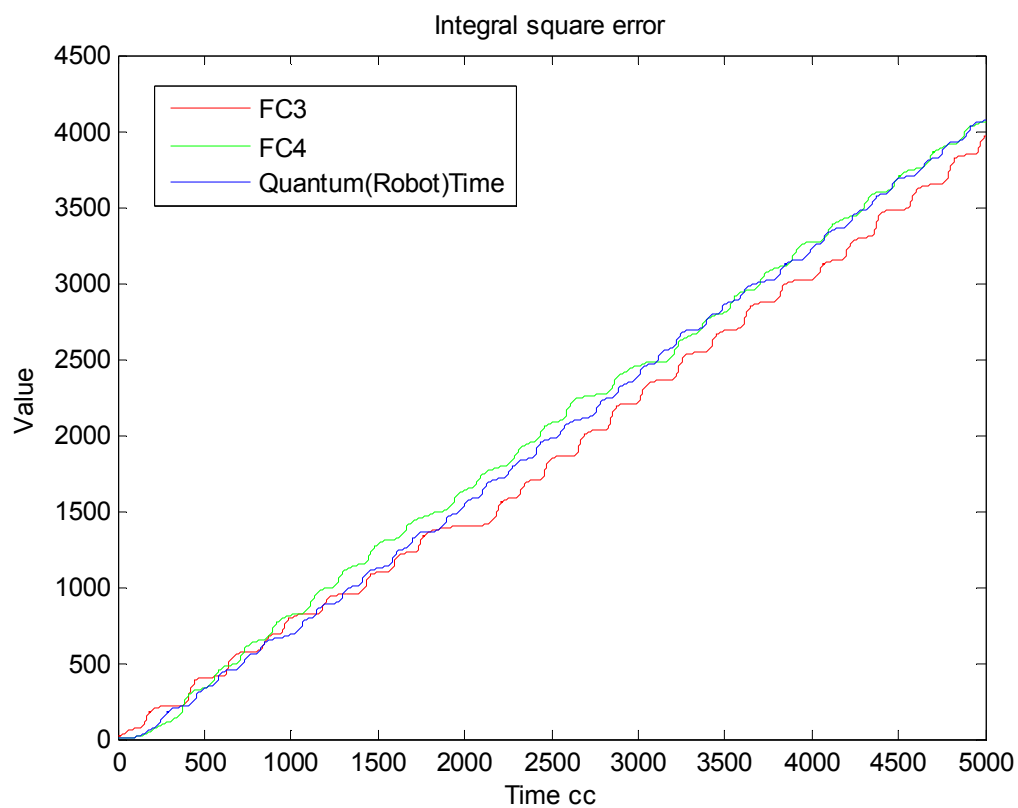


Рис. 35. Интеграл квадратичной ошибки. Эксперимент в типовой ситуации управления.
НР на основе ОС с макета и КНВ на основе этих регуляторов

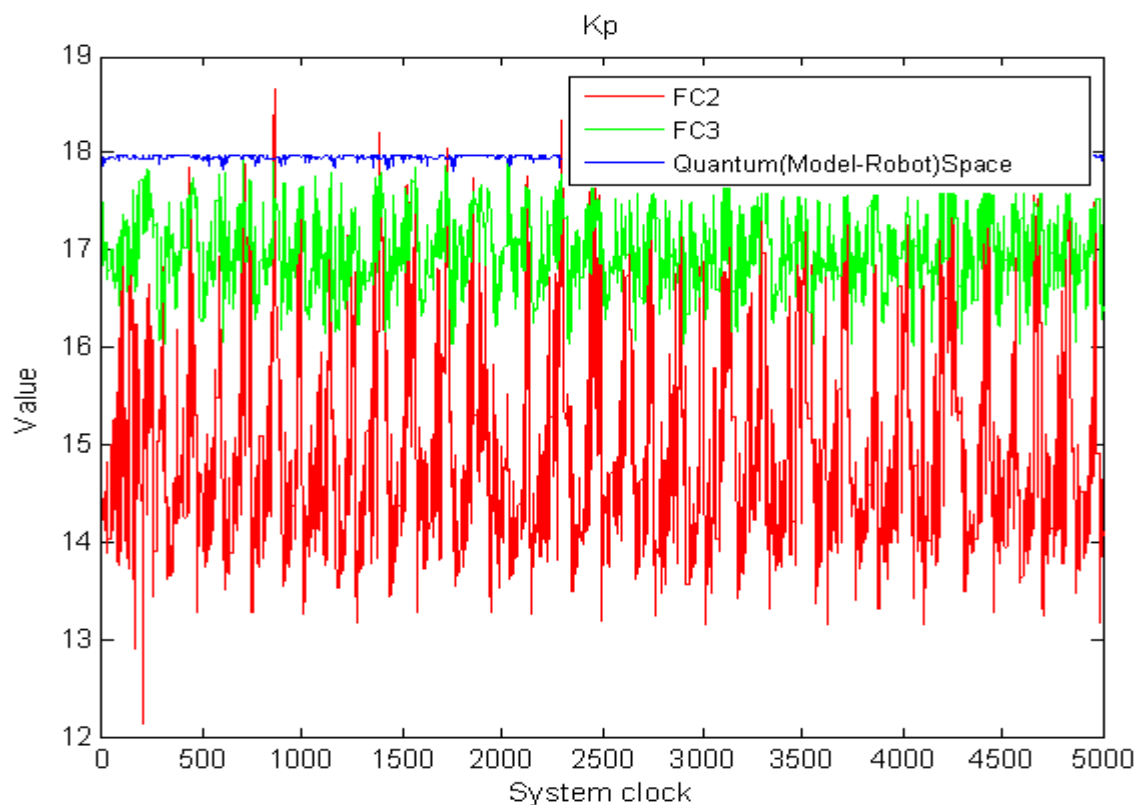


Рис. 36. Коэффициент усиления K_p . Входные и выходные значения КНВ.
Эксперимент в типовой ситуации

Рассмотрим результаты эксперимента в непредвиденной ситуации управления (C2).

На рис. 37-43 представлены результаты экспериментов в непредвиденной ситуации управления.

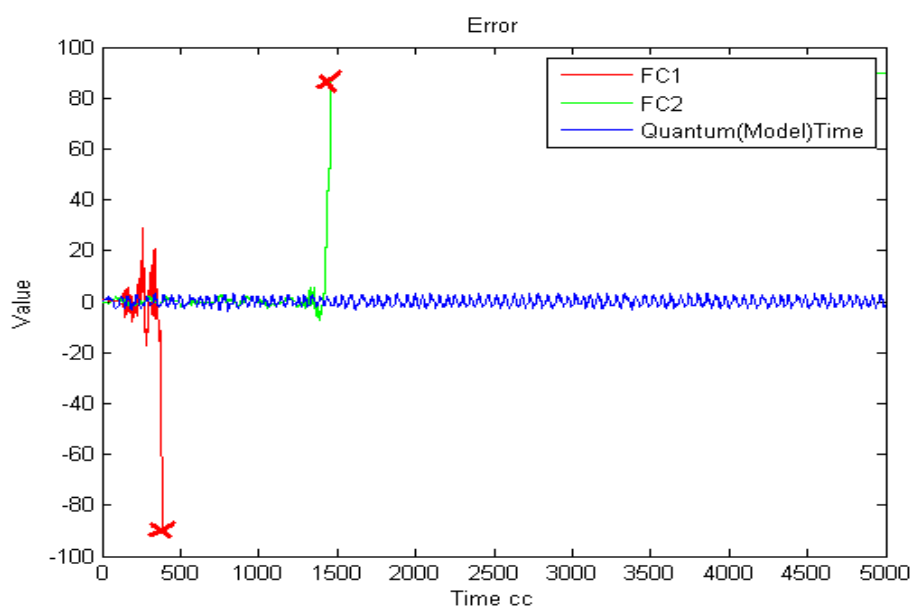


Рис. 37. Угол отклонения макета. Эксперимент в непредвиденной ситуации управления.
НР на основе ОС с модели и КНВ на основе этих регуляторов

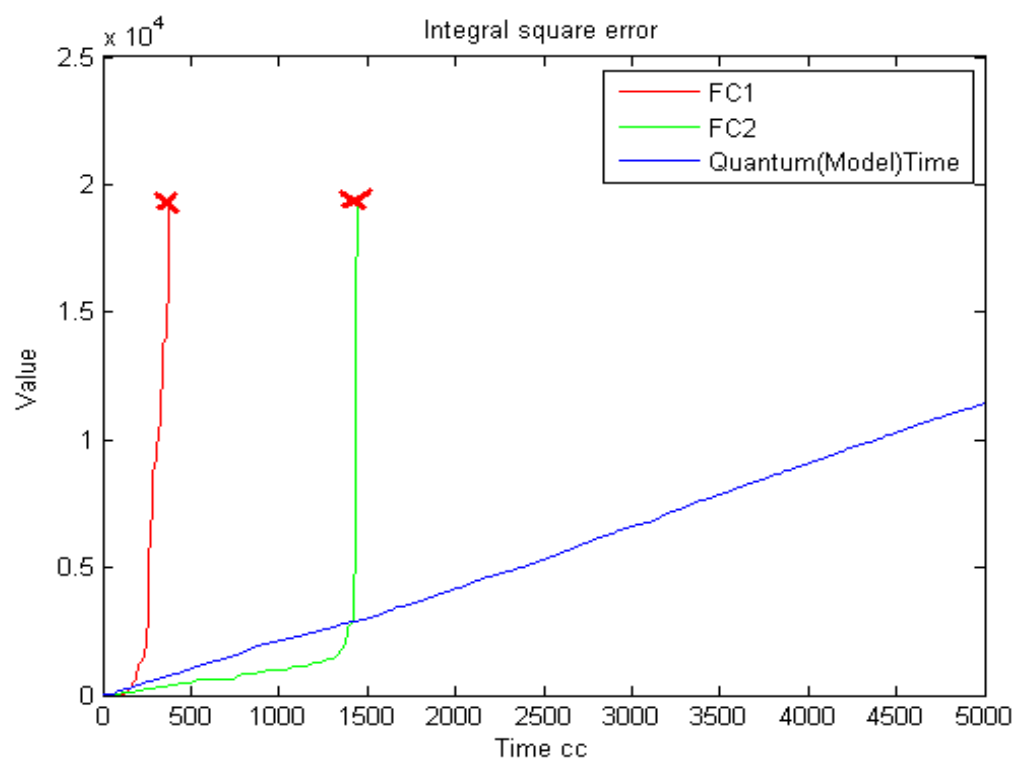


Рис. 38. Интеграл квадратичной ошибки. Эксперимент в непредвиденной ситуации управления.
НР на основе ОС с модели и КНВ на основе этих регуляторов

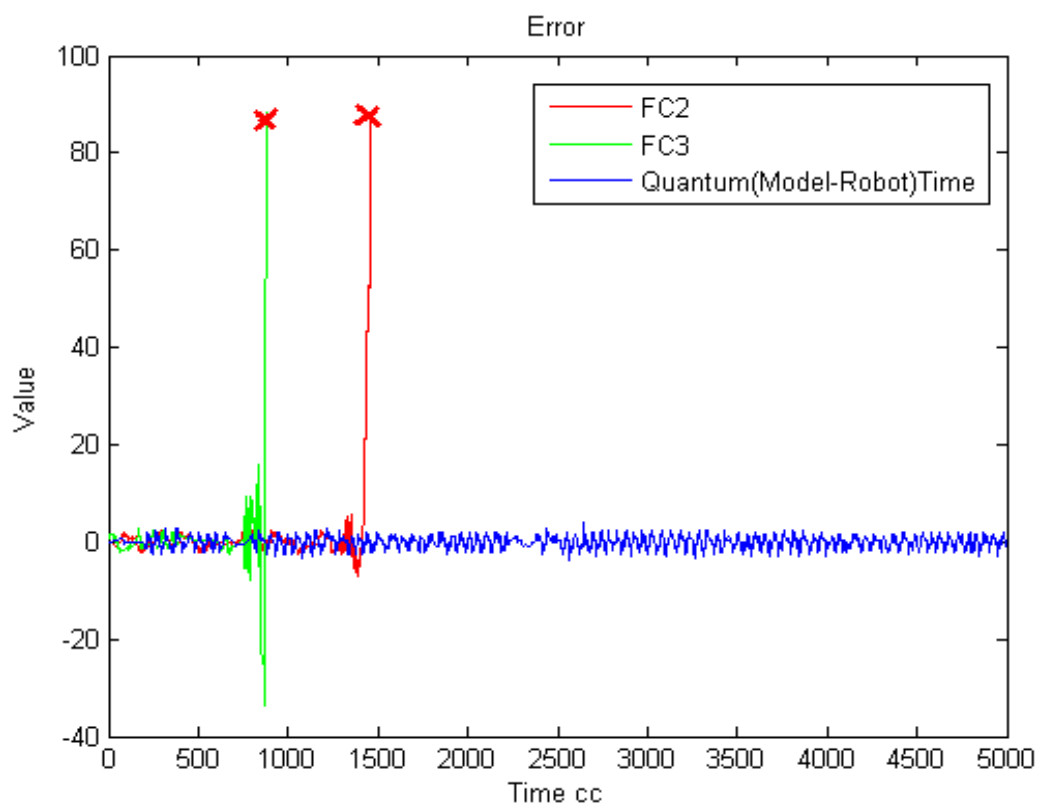


Рис. 39. Угол отклонения макета. Эксперимент в непредвиденной ситуации управления.
НР на основе ОС с модели и макета, и КНВ на основе этих регуляторов

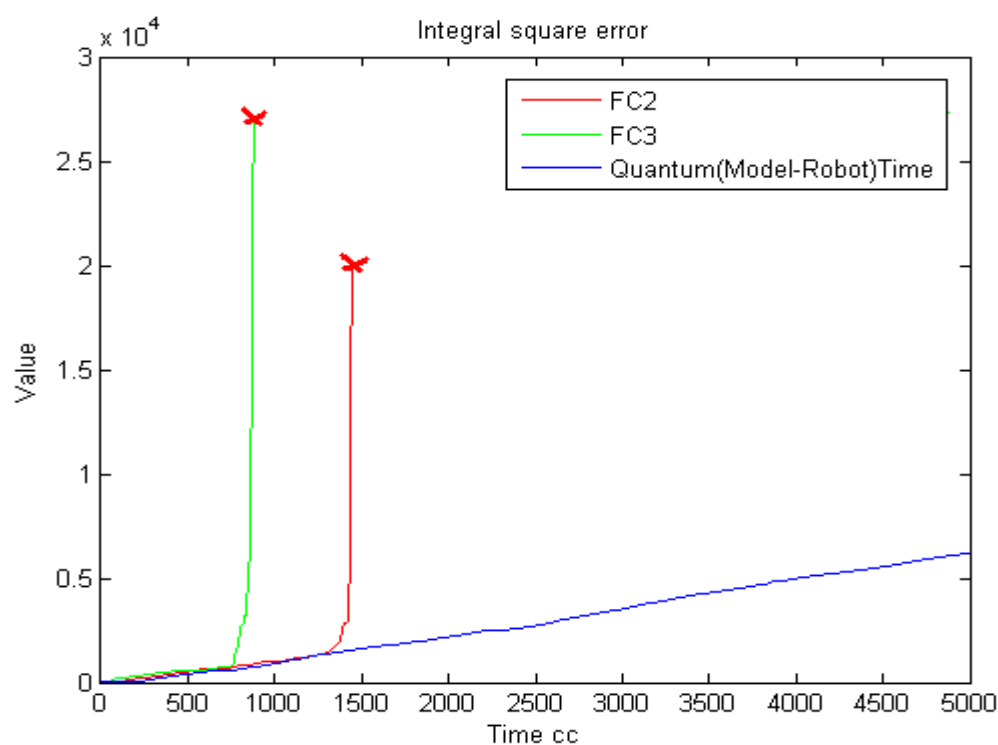


Рис. 40. Интеграл квадратичной ошибки. Эксперимент в непредвиденной ситуации управления.
НР на основе ОС с макета и модели, и КНВ на основе этих регуляторов

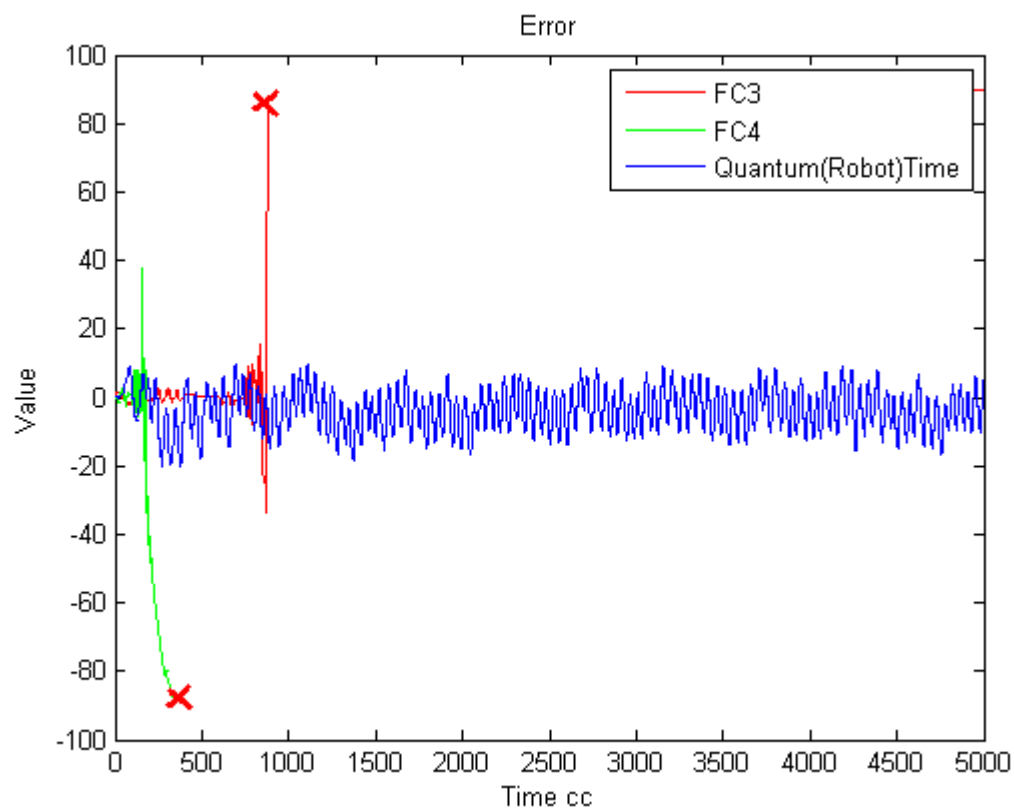


Рис. 41. Угол отклонения макета. Эксперимент в непредвиденной ситуации управления.
НР на основе ОС с макета, и КНВ на основе этих регуляторов

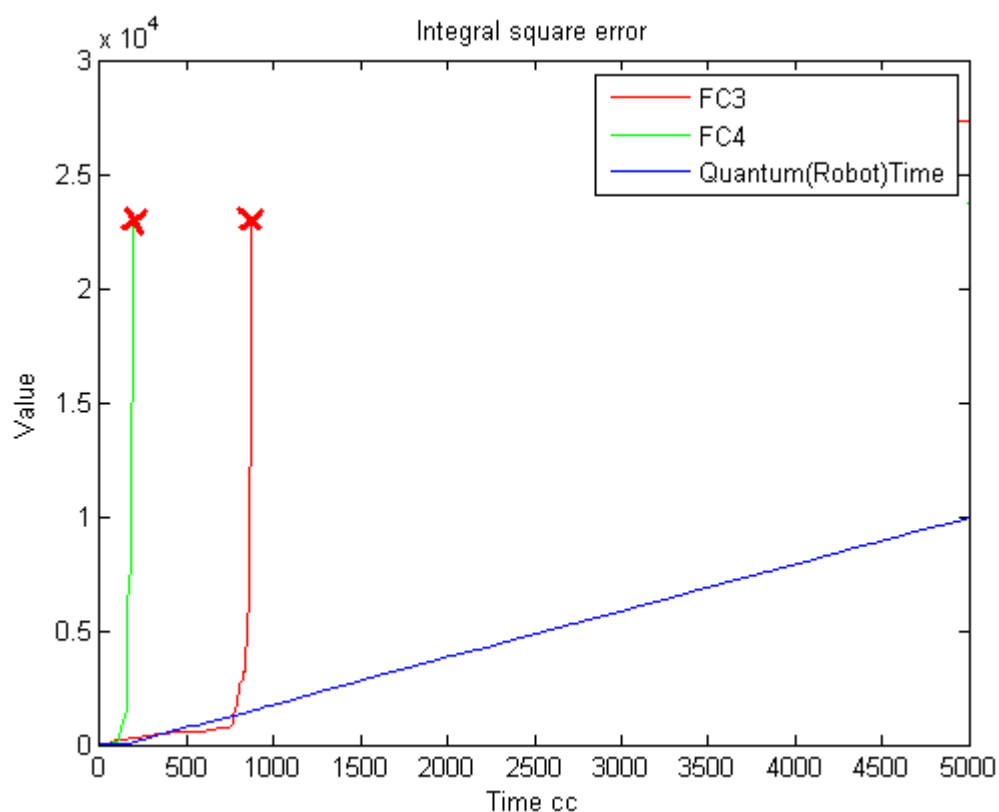


Рис. 42. Интеграл квадратичной ошибки. Эксперимент в непредвиденной ситуации управления.
НР на основе ОС с макета, и КНВ на основе этих регуляторов

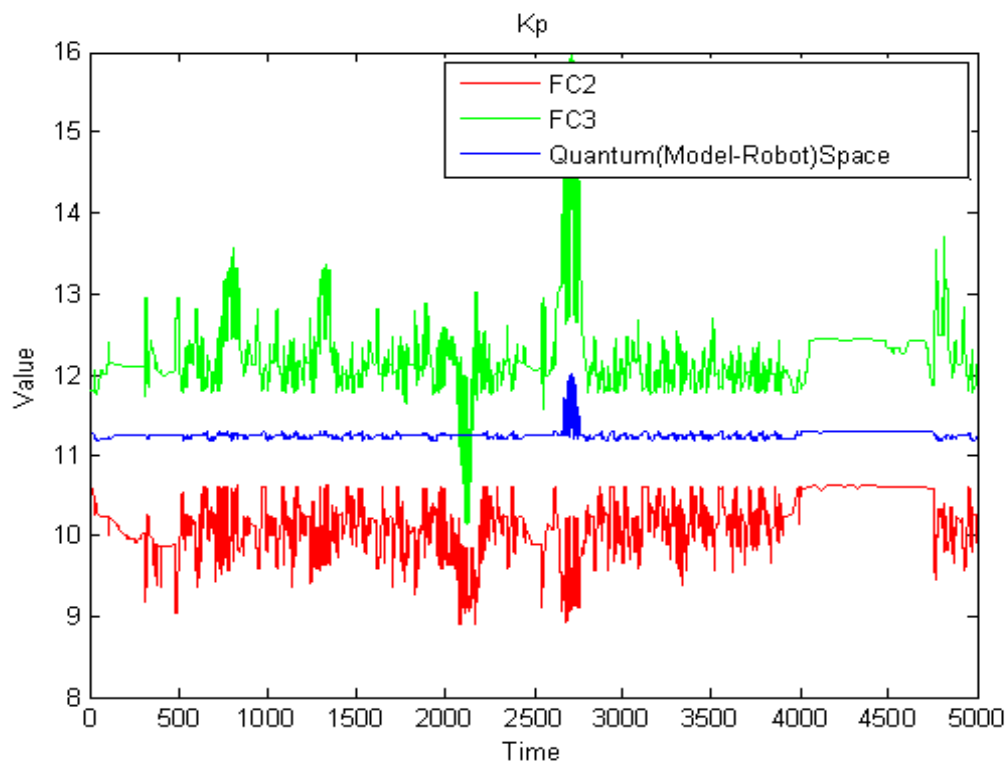


Рис. 43. Коэффициенты усиления квантового регулятора на основе БЗ с макета и модели.
Эксперимент в непредвиденной ситуации

На рис. 44 приведено сравнение качества управления по интегралу квадратичной ошибки.

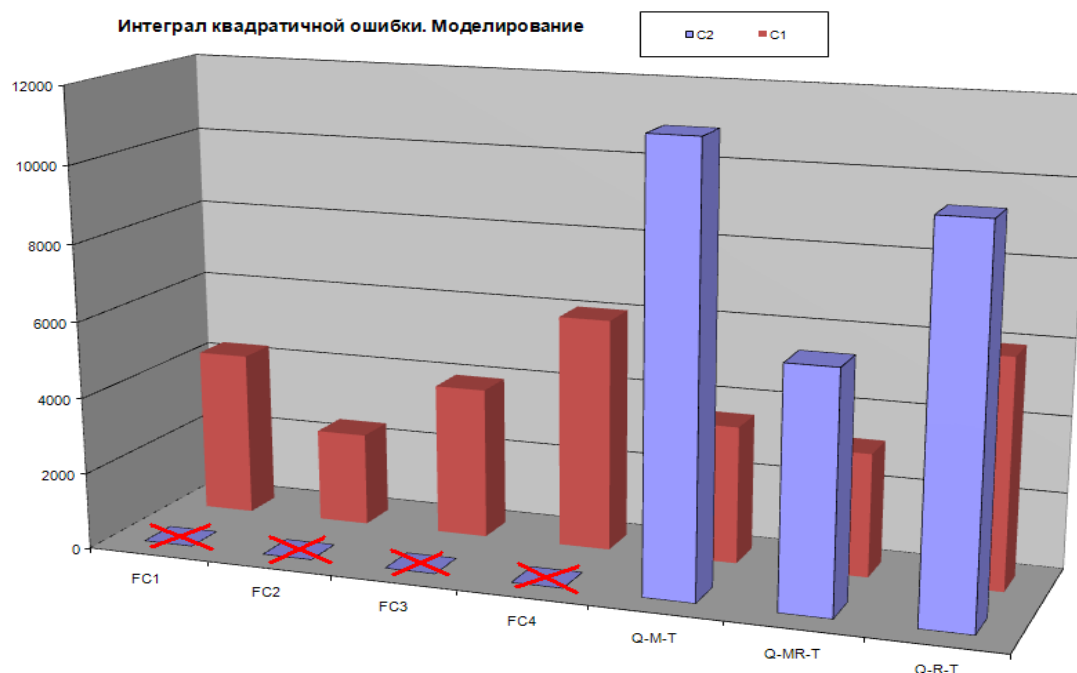


Рис. 44. Интеграл квадратичной ошибки. Непредвиденная и типовая ситуации управления. FC1-FC4 – нечеткие регуляторы, сокращения Q-quantum, M(Model)-две базы с модели, MR(ModelRobot)-база с макета и база с модели, R(Robot)-две базы с робота, T(Time) – временная корреляция

Для оценки качества процесса управления используют также показатели переходного процесса (рис. 45). К таким показателям относятся: сложность управления, устойчивость, величина перерегулирования.

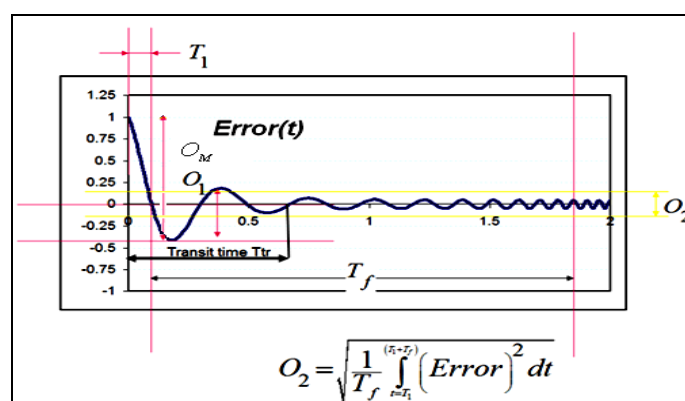


Рис. 45. Показатели качества управления

Проведем анализ качества управления лучших НР (ниже на рис. 46-48 FC2 и FC3 обозначаются как FC1Model и FC2Robot соответственно), квантовых и ПИД регуляторов в типовой ситуации управления (C1). Напомним, что для сравнения качества управления используем ПИД-регулятор и НР разработанные в [20].

На рис. 46-48 представлены диаграммы показателей качества PID, FC2 (FC1Model), FC3 (FC2Robot) и квантовых регуляторов на основе БЗ с различными источниками ОС.

Перерегулирование характеризует свойство перерегулирования переходного процесса и рассчитывается согласно (2-5).

$$O_1 = 1 - \frac{O_1}{O_m}; O_m (const.) \geq O_1. \quad (2)$$

В частности, на рис. 46 представлена диаграмма уровня перерегулирования систем управления.

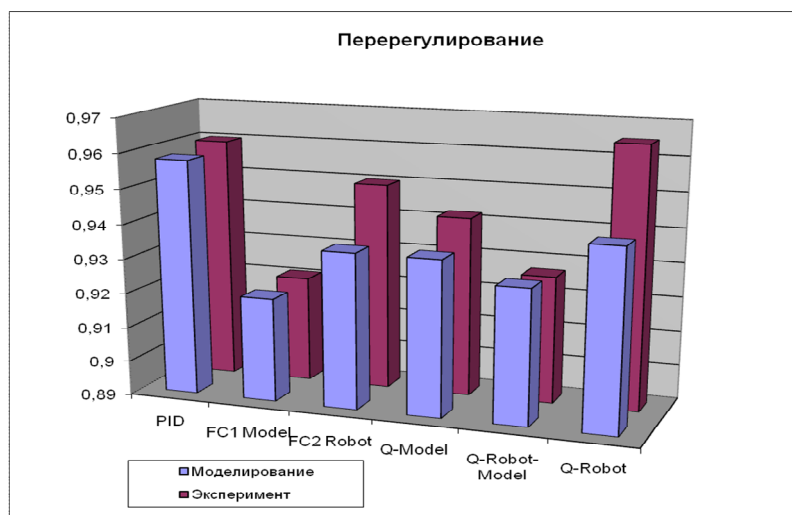


Рис. 46. Перерегулирование систем управления в типовой ситуации

НР, разработанный на основе верифицированной математической модели, имеет более низкий показатель перерегулирования, что характеризует работу такого регулятора как более эффективную.

Устойчивость переходного процесса (рис. 47) рассчитывается как:

$$O_2 = 1 - \frac{O_2}{O_m}; O_m(const.) \geq O_2. \quad (3)$$

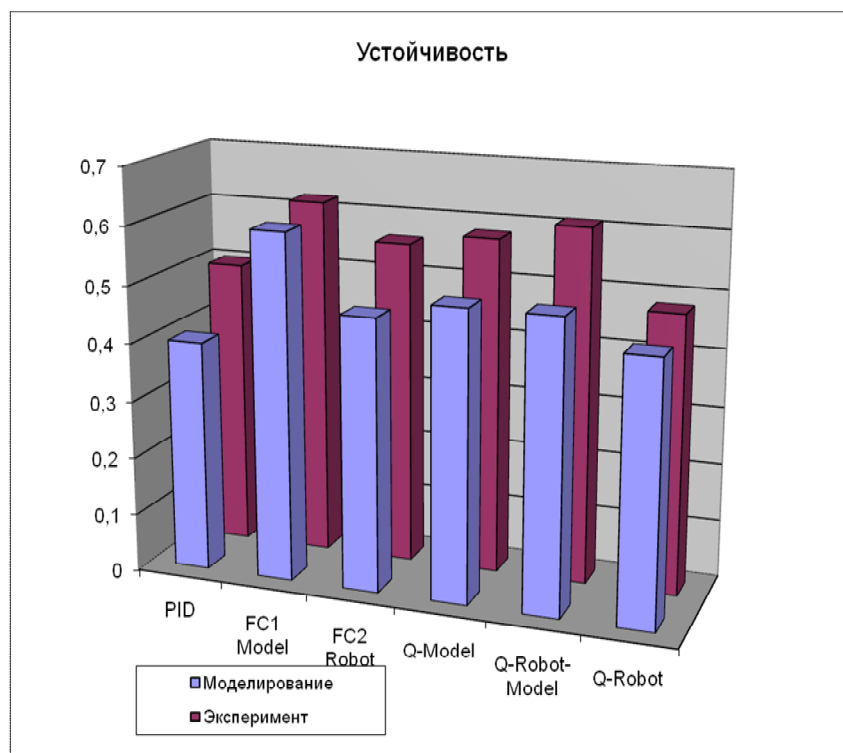


Рис. 47. Устойчивость систем управления в типовой ситуации

Качество управления характеризует способность системы управления эффективно расходовать энергетический и технический ресурс системы. В случае реализации сложного управления, износ оборудования и затраты энергии будут велики.

Сложность управления (рис. 48) рассчитывается в виде:

$$P \equiv 1 - \left(\frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \left(\frac{dK}{dt} \right)^2 dt}}{A} \right); A = (const). \quad (4)$$

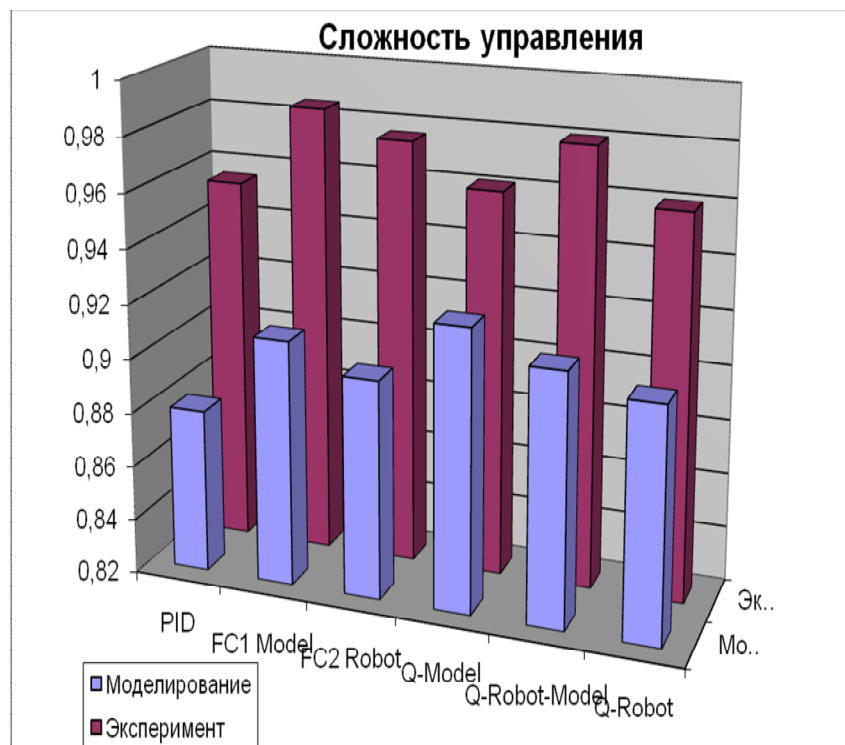


Рис. 48. Сложность управления в типовой ситуации

Оценка сложности управления показала, что НР разработанные с использованием ОБЗ обеспечивают систему более простым управлением, что в конечном итоге положительно сказывается на сроке использования оборудования, снижая износ. Это подтверждается результатами моделирования и экспериментов в [20].

Из рис. 46-48 видно, КНВ не уступает в качестве управления ПИД-регулятору, а уровень качества управления КНВ находится между уровнями качества БЗ, используемых в квантовом нечетком выводе. Важно отметить, что система управления на основе КНВ наследует лучшие характеристики качества управления от БЗ нечетких регуляторов.

Заключение

Выделим некоторые особенности разработанного подхода к структурному проектированию моделей интеллектуального управления [4-14] и его отличия от известных работ [21-39] по разработке ИСУ.

- Применение квантового алгоритма самоорганизации БЗ позволяет в реальном времени достичь цели управления в непредвиденных ситуациях за счет повышения робастности ИСУ в проблемно-ориентированной области. Вычислительным базисом отмеченных направлений разработок является технология квантовых мягких вычислений.
- Важным для системной инженерии результатом применения ИТ проектирования ИСУ является показанная возможность реализации квантовых алгоритмов и квантовых вычислений на *миллионовом* (а не на гибридном квантовом процессоре типа D – Wave и др.) процессоре в стандартной конфигурации аппаратной поддержки роботов-манипуляторов и автономных роботов.

- Поэтому из многочисленных моделей ИВ в качестве примера представлены прикладные разработки технологий мягких и квантовых вычислений. Отметим, что возможно рассматривать взаимосвязь технологий ИВ с другими направлениями типа квантовых облачных (cloud), вслепую (blind) вычислений, ДНК вычислений и др.
- Отмеченная актуальность и широта аудитории пользователей технологиями ИВ объясняется также следующим обстоятельством: одной из предметных областей применения технологий ИВ является разработка прорывных интеллектуальных наукоемких ИТ. Поэтому доступно (без потери необходимой математической и физической строгости) изложены принципиальные вопросы разработки и эффективного применения технологий ИВ на конкретном примере робастного интеллектуального управления автономным роботом.
- Подробно разъяснены возникающие логические «парадоксы» в получаемых результатах на основе технологии ИВ, вызывающих в инженерной аудитории трудности в наглядной физической и математической интерпретации.

Приведенные результаты применения классического процессора к реализации квантовых вычислений показали возможность решения задач встраиваемыми ИСУ, которые не могут быть решены традиционными методами. Возможность иметь в ближайшем будущем гибридные квантовые процессоры открывает еще большие перспективы применения новых квантовых ИТ к решению алгоритмически неразрешимых классическими методами задач управления.

Выводы

Современные методы теории управления обладают методами для создания систем управления для хорошо описанных и хорошо формализованных ситуаций управления. Однако, как показывает практика, системы управления часто сталкиваются с непредвиденными ситуациями управления. Представленная технология квантового нечеткого вывода, не разрушая нижний исполнительский уровень управления, обеспечивает систему дополнительным свойством робастности, только за счет использования программно-алгоритмического обеспечения.

Проведенные эксперименты и моделирование показали, что интеллектуальное управление позволяет в непредвиденных ситуациях управления гарантированно достигать цели управления с минимальным расходом ресурса, что по своей сути отражает на содержательном уровне само определение целенаправленной деятельности ИСУ.

В работе продемонстрировано существование непредвиденных ситуаций управления, в которых НР не обладают требуемым качеством робастности, а квантовый нечеткий регулятор (на основе этих НР) справляется с задачей управления на требуемом уровне качества управления, что подтверждает реализацию принципа самоорганизации БЗ за счет использования алгоритма КНВ.

В работе продемонстрировано применение квантовых вычислений на классическом процессоре в режиме реального времени. Результаты моделирования и экспериментов подтверждают полезность 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. 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. – Pp. 42-54.
2. Ulyanov S. Engineering management in the field of high IT of fuzzy control system's design: Methods of intellectual property protection and business models of intelligent control systems // *Proc. of the 7th ICAFS.* – Siegen, 2006. – Pp. 218-239.
3. Khan H. PID controller: Comparative analysis and design diverse realizations (Moving towards efficient control in robotics and industries). – Lambert Academic Publishing House, 2012.
4. Litvintseva L. V., Ulyanov S.S., Takahashi K. et all. Intelligent robust control design based on new types of computation. Pt 1. New soft computing technology of KB-design of smart control simulation for non-linear dynamic system. – Milan: Note del Polo (Ricerca), Università degli Studi di Milano. – 2004. – Vol. 60.
5. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. – М.: ВНИИГеосистем, 2011.
6. Ulyanov S.V. System for intelligent control based on soft computing. – US Patent US 6,415,272 B1. Filed – Oct. 1998. – Date of patent. – Jul. 2, 2002.
7. Litvintseva L.V., Ulyanov S.V. et all. Soft computing optimizer for intelligent control system design: the structure and applications // *J. Systemics, Cybernetics and Informatics (USA).* – 2003. – Vol. 1. – № 5.
8. 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.
9. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. et all. Self – organization principle and robust wise control design based on quantum fuzzy inference // *Proc. Of Internat. Conf. ICSCCW'2005.* – Antalya Turkey, 2005.
10. Litvintseva L. V., Ulyanov S.S., Takahashi K. et all. Design of self-organized robust wise control system based on quantum fuzzy inference // *Proc. Of World Automation Congress (WAC'2006): Soft computing with Industrial Application (ISSCI'2006).* – Budapest, Hungary. – 2006. – Vol. 5.
11. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. et all. Quantum information and quantum computational intelligence: Backgrounds and applied toolkit of information design technologies. – Milan: Note del Polo (Ricerca), Università degli Studi di Milano. – 2005. – Vol. 78-86.
12. Ulyanov S.V. Self-organization of robust intelligent controller using quantum fuzzy inference // *Proc. of IEEE Intern. Conference ISKE'2008 (3rd Intern. Conf. on Intelligent System and Knowledge Engineering), Xiamen, China, 2008.* – Vol. 1. – Pp. 726-732.
13. Ulyanov S.V. Self-organized intelligent robust control based on quantum fuzzy inference. – *Recent Advances in Robust Control – Novel Approaches and Design Methods / A. Mueller (Ed.), Ch. 9, In Tech, 2011.* – Pp. 187-220.
14. Ульянов С.В., Сорокин С.В., Литвинцева Л.В. Оптимизатор баз знаний на основе квантовых вычислений для проектирования самоорганизующихся нечетких регуляторов: программный инструментарий // *Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание.* – 2012. – №1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/23>. – 0421200111\0006.
15. Ghisi F., Ulyanov S.V. The information role of entanglement and interference in Shor quantum algorithm gate dynamics // *J. Modern Optics.* – 2000. – Vol. 47. – № 12.
16. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. и др. Проблемы управления релятивистскими и квантовыми динамическими системами. – М.: Наука, 1982.

17. Гольденблат И.И., Ульянов С.В. Введение в теорию относительности и её приложения к новой технике. – М.: Физматгиз, 1979.
18. Ulyanov S.V., Kurawaki I., Panfilov S.A. 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. Kluwer Acad./Plenum Publ. – 2001. – Pp. 207-214.
19. Zurek W.H. Probabilities from entanglement, Born's rule $p_k = |\psi_k|^2$ from envariance // Phys. Review. – 2005. – Vol. A71. – № 5.
20. 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>.
21. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А. и др. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматгиз, 2000.
22. Лебедев Г.Н. Интеллектуальные системы управления и их обучение с помощью методов оптимизации (Учебное пособие). – М.: МАИ, 2002.
23. Усков А.А., Круглов В.В. Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики. – Смоленск: Смол. Город. Типография, 2003.
24. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В. и др. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. – М.: Наука, 2006.
25. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – Киев: Радиоиматор, 2008.
26. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. – БИНОМлаборат. знаний, 2008.
27. Афанасьев В.Н. Динамические системы управления с неполной информацией. – М., 2007.
28. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. – М.: Радиотехника, 2009.
29. Васильев С.Н. (ред.) Интеллектуальные системы управления – М.: Машиностроение, 2010.
30. Ponce-Cruz P., Ramirez-Figueroa F.D. Intelligent control systems with Lab VIEW™. –Berlin: Springer Verlag, 2010.
31. Wen Y. (Ed.). Recent advances in intelligent control systems. – Springer Verlag, 2009.
32. Szederkényi G., Lakner R., Gerzson M. Intelligent control systems: An introduction with examples. – Kluwer Acad. Publ., 2002.
33. Behera L., Kar I. Intelligent systems and control principles and applications. – Oxford University Press, 2010.
34. Nanayakara T., Jamshidi M., Sahin F. Intelligent control systems with an introduction to system of systems engineering. – CRC Press, 2009.
35. Shin Y.C., Xu Ch. Intelligent systems: Modeling, optimization, and control (Automation and Control Engineering). – CRC Press, 2008.
36. Zdenko K, Bogdan S. Fuzzy controller design: Theory and applications. – CRC Press, 2006.
37. Reznik L. Fuzzy controller's handbook: How to design them, How they work. – Newnes, 1997.
38. Kai M. Fuzzy control: fundamentals, stability and design of fuzzy controllers. – Springer, 2006.
39. Feng G. Analysis and synthesis of fuzzy control systems: A model-based approach. – CRC Press, 2010.