

## **ОПТИМИЗАТОР БАЗ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ: ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ**

**Ульянов Сергей Викторович<sup>1</sup>, Сорокин Сергей Владимирович<sup>2</sup>,  
Литвинцева Людмила Васильевна<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Доктор физико-математических наук, профессор;  
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
PronetLabs;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

<sup>2</sup>Кандидат физико-математических наук, доцент;  
Тверской государственный университет, Тверь;  
170100, Тверь, ул. Желябова, 33;  
e-mail: sergey@tversu.ru.

<sup>3</sup>Кандидат физико-математических наук, профессор;  
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: litvi50@mail.ru.

Рассматривается новая технология проектирования робастных ИСУ на основе Оптимизатора Баз Знаний на квантовых вычислениях. Рассматривается метод самоорганизации баз знаний нечетких регуляторов на основе соответствующего квантового алгоритма. Дается краткое описание программного инструментария Оптимизатора Баз Знаний на квантовых вычислениях и описываются результаты моделирования управления движением глобально-неустойчивого объекта управления («перевернутый маятник – тележка») с помощью квантового нечеткого контроллера.

Ключевые слова: оптимизатор баз знаний, квантовые вычисления, самоорганизация знаний, нечеткие регуляторы.

## **KNOWLEDGEBASE OPTIMIZATOR BASED ON QUANTUM COMPUTING FOR SELF-ORGANIZATION FUZZY CONTROLLER DESIGN: TOOLKIT**

**Ulyanov Sergey<sup>1</sup>, Sorokin Sergey<sup>2</sup>, Litvintseva Ludmila<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;  
Dubna International University of Nature, Society and Man,  
Institute of system analysis and management;  
PronetLabs;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

<sup>2</sup>Candidate of Science in Physics and Mathematics, associate professor;  
Tver State University, Tver;  
170100, Tver, Shelyabova str., 33;  
e-mail: sergey@tversu.ru.

<sup>3</sup>Candidate 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: litvi50@mail.ru.

*New design technology of robust intelligent control systems based on knowledgebase optimizator on quantum computing is considered. Self-organization method of fuzzy controller knowledgebase is discussed using corresponding quantum algorithm. Toolkit of knowledgebase optimizator is introduced and simulation results of globally unstable control object as «cart – pole» system with quantum fuzzy controller is demonstrated.*

**Keywords:** knowledgebase optimizator, quantum computing, knowledge self-organization fuzzy controller.

## Введение

Одна из основных задач современной теории и проектирования систем управления – построение и внедрение *робастных баз знаний* в структуры интеллектуальных систем управления (ИСУ) с целью повышения их способности к *самообучению, самоадаптации, самоорганизации* или саморазвитию с минимальным расходом полезного ресурса.

Методология проектирования ИСУ, основанная на технологии мягких вычислений [1], рассматривает в качестве базиса структуру нечеткого регулятора (НР) как один из вариантов проектирования традиционных систем автоматического управления (САУ) [2]. Модели НР демонстрируют повышенную способность управления динамическими ОУ, которые обладают слабо формализованной структурой или функционируют в условиях неопределенности исходной информации. С помощью технологии проектирования ИСУ на основе инструментария ОБЗ1 – Оптимизатора Баз Знаний (БЗ) на основе мягких вычислений – возможно спроектировать несколько БЗ для нескольких типовых ситуаций управления [3, 4]. Однако очень трудно спроектировать глобально «хорошую» и робастную структуру ИСУ на все случаи ситуаций управления, включая непредвиденные, 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.). В ряде практических случаев такого рода условия могут быть предсказаны, однако трудно реализовать робастное управление в непредвиденных ситуациях, используя спроектированную для фиксированной типовой ситуации базу знаний НР.

Одним из существующих решений представляется формирование конечного числа баз знаний НР для множества фиксированных ситуаций управления. В таком случае возникает проблема: *как определить БЗ, которая должна быть использована в конкретный момент времени?* В этом случае особую важность приобретает выбор обобщённой стратегии, которая давала бы возможность переключать поток управляющих сигналов, поступающих с выхода различных БЗ НР, и (если необходимо) модифицировать их выходной сигнал под текущие условия функционирования ОУ. Простым вариантом решения этой проблемы является использование метода взвешенных весов и агрегирования выходных сигналов от каждого независимого НР. Но, к сожалению, такой метод (как показали результаты моделирования) имеет ограниченные возможности, так как распределение весовых факторов часто необходимо определять в динамике реального времени и процедура поиска носит комбинаторный характер.

В статье описывается стратегия повышения робастности НР, спроектированных на основе мягких вычислений, за счет использования новых видов вычислений, базирующихся на методологии квантовых вычислений. Мы вводим новое свойство ИСУ – *самоорганизация Баз Знаний*. Конкретная реализация данного свойства достигается за счёт введения обобщения стратегий в моделях нечёткого вывода (на конечном множестве предварительно спроектированных НР) в виде нового, *квантового нечёткого вывода* (КНВ).

Процесс проектирования робастных БЗ состоит из двух взаимосвязанных этапов, основанных на мягких и квантовых вычислениях соответственно. Функционально, на первом этапе процесса проектирования формируются индивидуальные БЗ для двух (или более) НР для конкретных ситуаций управления (ситуации обучения). На втором этапе реализуется *самоорганизация Баз Знаний* нечетких регуляторов на основе разработанного квантового алгоритма КНВ (квантового нечеткого вывода).

## Стратегия самоорганизации Баз Знаний на основе квантового алгоритма

В данном разделе описывается принципиальная структура и алгоритм квантового нечеткого вывода (КНВ), его программная поддержка в процессах проектирования робастных самоорганизующихся НР.

### Модель КНВ как квантовый поисковый алгоритм

Модель разработанного КНВ рассматривается как новый вид квантового поискового алгоритма (КА), действующего на обобщённом пространстве баз знаний НР. Выходной результат КНВ – обобщённый робастный сигнал управления. КНВ использует и реализует процессы извлечения скрытой квантовой информации, содержащейся в классических индивидуальных базах знаний нечетких регуляторов, на основе физических законов квантовой теории информации и квантовых вычислений. Для извлечения и агрегирования дополнительной скрытой ценной квантовой информации в БЗ на основе КНВ необходимо задействовать новые дополнительные логические операторы обработки информации, отсутствующие в инструментарии технологии мягких вычислений. Дополнительные (необходимые для обработки классической информации) унитарные обратимые (квантовые) операторы носят следующие наименования: *суперпозиция*, *квантовая корреляция* (перепутанные операторы) и *интерференция*, являясь математическим инструментарием квантовых вычислений.

В общем виде модель квантовых вычислений состоит из пяти этапов:

- приготовление начального (классического или квантового) состояния  $|\psi_{in}\rangle$ ;
- выполнение преобразования Адамара для начального состояния с целью подготовки состояния суперпозиции;
- применение запутанного оператора или оператора квантовой корреляции (квантового оракула) к суперпозиционному состоянию;
- исполнение оператора интерференции;
- использование оператора измерения для результата квантовых вычислений  $|\psi_{fin}\rangle$ .

Модель КНВ основана на физических законах теории квантовых вычислений, а именно в вычислениях участвуют унитарные, обратимые квантовые операторы и представляет собой *квантовый алгоритм* (КА). В общем виде КА состоит из трёх основных унитарных операций: суперпозиция; квантовая корреляция (квантовый оракул или запутанные операторы) и интерференция. Четвёртый оператор, оператор измерения результатов квантовых вычислений, является необратимым (классическим). Алгоритм решения данных задач может быть реализован как на аппаратных средствах, так и на программном уровне с помощью соответствующего программного продукта с реализацией на классическом компьютере.

### Структура и основные шаги КНВ

Общая структура *самоорганизующихся интеллектуальных систем управления* показана на рис. 1. На рис. 1 указаны факторы, задающие ситуацию управления, и показана структура ИСУ, состоящая из двух (или нескольких) нечетких ПИД-регуляторов (НР) и блока КНВ, реализующего свойство самоорганизации БЗ. Модель КНВ использует частные индивидуальные БЗ НР, каждая из которых получена с помощью инструментария «Оптимизатор Баз Знаний» (ОБЗ1) для фиксированных (типовых) ситуаций управления во внешней случайной среде.

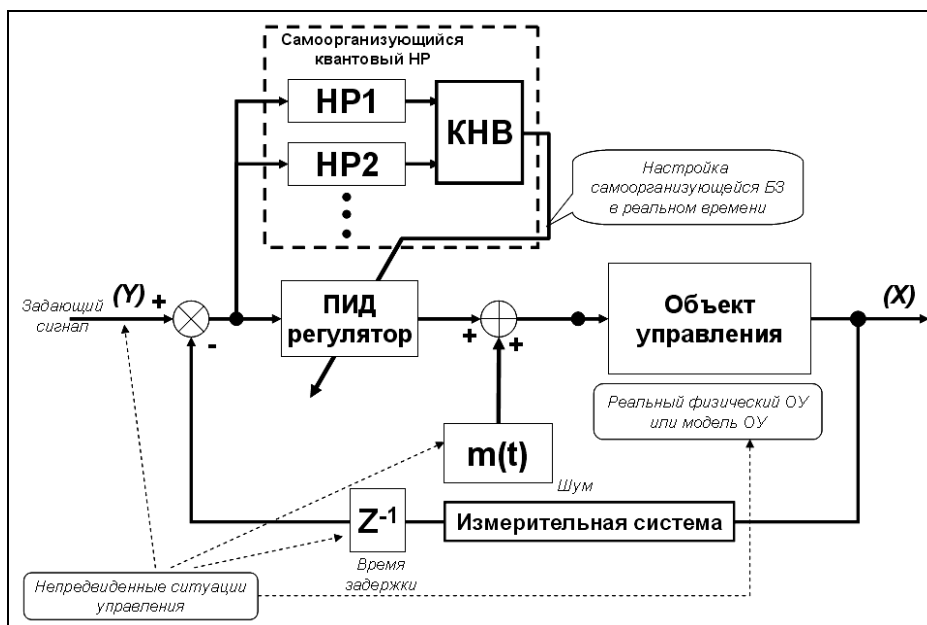


Рис. 1. Принципиальная схема самоорганизующейся структуры ИСУ

Рассмотрим 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. 2 показана функциональная структура модели КНВ.

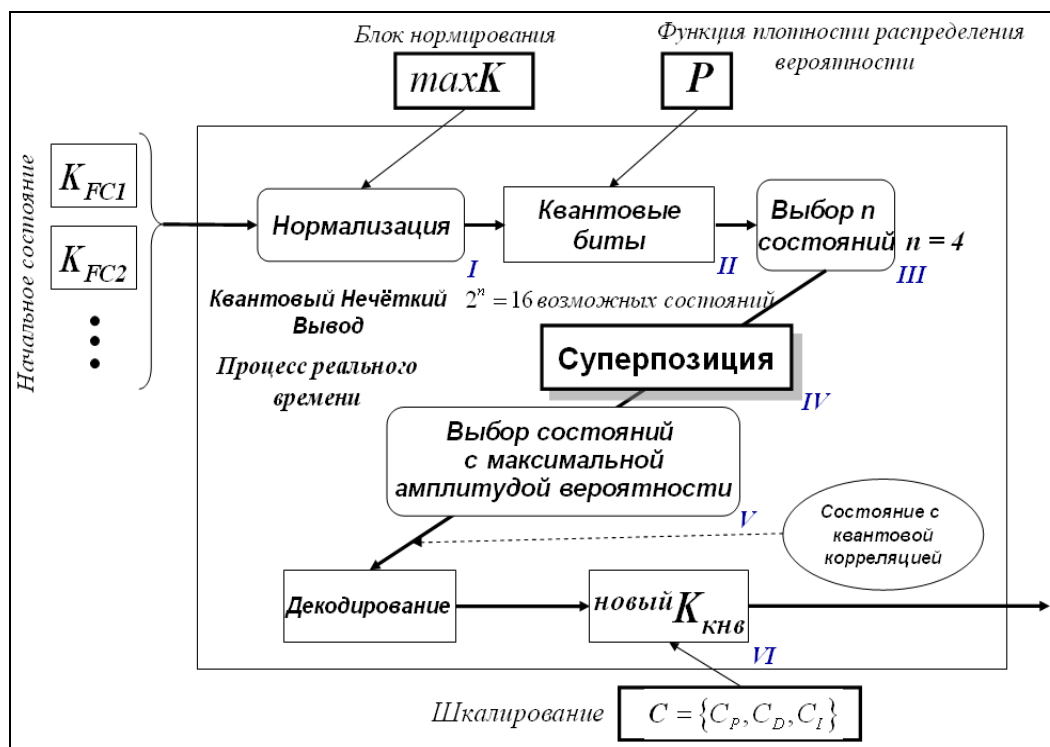


Рис. 2. Функциональная структура КНВ

Модель КНВ состоит из шести этапов, показанных на рис. 2. Опишем данные этапы.

**Этап 0.** На вход КНВ в реальном времени поступают коэффициенты усиления  $K_{FC1}, K_{FC2}$  и т.д., по которым строится текущий сигнал управления от сформированных заранее БЗ НР (шаг «Начальное состояние» на рис. 2).

**Этап 1.** Следующим шагом является процесс нормализации (блок *I*) полученных сигналов в интервале  $[0,1]$  путем деления текущих значений сигналов управления на их максимальные значения (блок « $\max K$ »), которые заранее известны (из результатов моделирования управления с НР).

**Этап 2.** После нормировки сигналов осуществляется формирование квантовых битов (блок *II*) из текущих значений нормированных сигналов управления. Для этого предварительно определяются функции плотности распределения вероятностей по представительным выборочным траекториям сигналов управления. Далее путем интегрирования полученных функций плотности распределения вероятностей определяются интегральные функции распределения вероятностей (блок «*P*» совместно с блоком *II*). Полученные таким образом функции распределения вероятностей позволяют определить виртуальные состояния сигналов управления для формирования суперпозиции с помощью преобразования Адамара из текущего состояния введенных сигналов управления. При этом используется закон вероятностей типа  $P(|0\rangle) + P(|1\rangle) = 1$ , где  $P(|0\rangle)$  – вероятность текущего *реального состояния* сигнала управления, а  $P(|1\rangle)$  – вероятность текущего *виртуального состояния* сигнала управления.

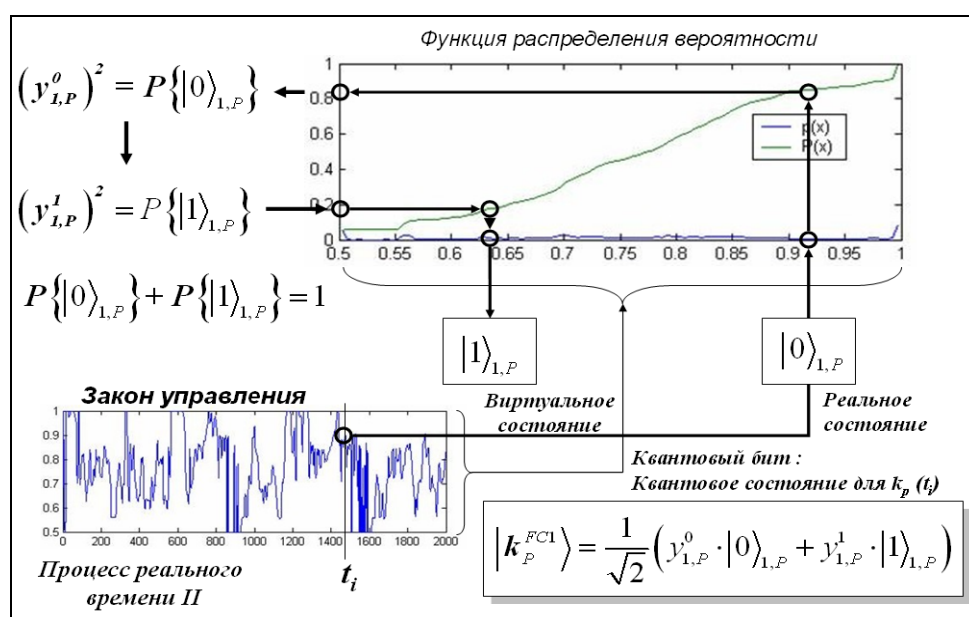


Рис. 3. Процесс формирования квантовых бит

Для текущего реального нормированного состояния сигнала управления с помощью интегральной функции распределения вероятностей определяется его вероятность. Далее, из закона сохранения вероятностей рассчитывается вероятность виртуального состояния нормированного сигнала управления. Используя тот же интегральный закон распределения вероятностей, путём обратного отображения, вычисляется численное значение соответствующего виртуального состояния сигнала управления. Суперпозиция квантовой системы «реальное состояние – виртуальное состояние» имеет следующий вид:

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

На рис. 3 схематично показан вычислительный процесс формирования квантовых бит для текущего состояния нормированного сигнала управления, описывающего коэффициенты усиления нечеткого ПИД-регулятора в структуре ИСУ.

**Примечание.** Состояние  $|0\rangle$  представляет текущее реальное значение коэффициента усиления, состояние  $|1\rangle$  представляет текущее виртуальное значение коэффициента усиления. «Закон управления» на рис. 3 описывает изменение текущего сигнала  $k_p^{FC1}$  во времени, для которого строится функция распределения вероятности (из гистограмм сигнала).

**Этап 3.** Далее осуществляется выбор типа квантовой корреляции (рис. 2, блок *III*). Эта операция представляет собой операцию построения запутанных состояний (операция запутывания – entanglement). Мы рассматриваем три типа квантовой корреляции (содержащих скрытую в спроектированных БЗ ценную квантовую информацию): пространственная, временная и пространственно-временная.

В Табл. 1 приводится формальное описание трех типов квантовой корреляции. Основная идея применения данного типа корреляций состоит в следующем: используя текущие значения  $K_{FC1}, K_{FC2}$  проектируются новые выходные (самоорганизующиеся) значения вектора управления  $K = [k_p, k_D, k_I]$  в соответствии с выбранным типом корреляции.

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 компонент: классическая (между реальными значениями нормированного сигнала управления); квантовая (между виртуальными значениями нормированного сигнала управления) и смешанная (между реальными и виртуальными значениями нормированного сигнала управления).

Внешний вид корреляции характеризует связь между соответствующими сигналами управления первого  $K_{FC1}$  и второго  $K_{FC2}$  нечетких регуляторов (НР) или соответствующих баз знаний. Индекс «1» означает нечеткий регулятор 1 (НР1), а индекс «2» означает нечеткий регулятор 2 (НР2).

Таблица 1: Основные типы квантовой корреляции

1. Пространственная корреляция	$\{k_p^1(t), k_p^2(t), k_D^1(t), k_D^2(t)\}$ – для построения $k_p^{new}(t)$ $\{k_D^1(t), k_D^2(t), k_I^1(t), k_I^2(t)\}$ – для построения $k_D^{new}(t)$ $\{k_I^1(t), k_I^2(t), k_p^1(t), k_p^2(t)\}$ – для построения $k_I^{new}(t)$ где 1 и 2 – индексы Баз Знаний (или соответствующих НР)
2. Временная корреляция	$\{k_p^1(t)k_p^1(t-\Delta t), k_p^2(t)k_p^2(t-\Delta t)\}$ – для построения $k_p^{new}(t)$ $\{k_D^1(t)k_D^1(t-\Delta t), k_D^2(t)k_D^2(t-\Delta t)\}$ – для построения $k_D^{new}(t)$ $\{k_I^1(t)k_I^1(t-\Delta t), k_I^2(t)k_I^2(t-\Delta t)\}$ – для построения $k_I^{new}(t)$
3. Пространственно-временная корреляция	$\{k_p^1(t)k_D^1(t-\Delta t), k_p^2(t-\Delta t)k_D^2(t)\}$ – для построения $k_p^{new}(t)$ $\{k_D^1(t)k_I^1(t-\Delta t), k_D^2(t-\Delta t)k_I^2(t)\}$ – для построения $k_D^{new}(t)$ $\{k_I^1(t)k_p^1(t-\Delta t), k_I^2(t-\Delta t)k_p^2(t)\}$ – для построения $k_I^{new}(t)$

Например, рассмотрим следующий тип квантовой корреляции (пространственная):  $\{k_p^1(t), k_p^2(t), k_D^1(t), k_D^2(t)\} \rightarrow k_p^{new}(t)$ . Запутанное состояние, соответствующее данной корреляции, имеет следующий вид:  $|a_1 a_2 a_3 a_4\rangle = |k_p^1(t) k_p^2(t) k_D^1(t) k_D^2(t)\rangle$ .

**Этап 4.** Рассмотрим алгоритм формирования суперпозиции запутанных состояний (рис. 2, блок *IV*) для вычисления выходного значения  $k_p^{new}(t)$ , используя выше приведенную корреляцию и БЗ двух НР, спроектированных для двух разных типовых ситуаций управления.

На рис. 4 показан пример вычисления суперпозиции запутанных состояний и выбор приоритетного квантового состояния по принципу максимизации амплитуды вероятностей.

*Примечание.* На рис. 4 используются следующие обозначения  $\{k_p^{FC1}, k_p^{FC2}, k_D^{FC1}, k_D^{FC2}\}$ , где  $k_p^{FC1}$  – используемое значение сигнала управления пропорциональным коэффициентом усиления БЗ первого НР, спроектированного для первой фиксированной ситуации управления;  $k_D^{FC2}$  – значение сигнала

управления дифференциальным коэффициентом усиления БЗ второго НР, разработанного для второй ситуации управления.

Новое состояние  $k_p$  строится из суперпозиции состояний  $|k_p^{FC1}\rangle \otimes |k_p^{FC2}\rangle \otimes |k_D^{FC1}\rangle \otimes |k_D^{FC2}\rangle$ , присутствующих в выбранном запутанном состоянии (рис. 4). Состояние  $|k_p^{FC1}\rangle$  представляет собой квантовое состояние из суперпозиции реального и виртуального состояний текущего  $k_p^{FC1}$  и описывается следующим образом:  $|k_p^{FC1}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(y_{1,p}^0|0\rangle_{1,p} + y_{1,p}^1|1\rangle_{1,p})$  (см. рис. 2).

*Новый  $k_p$  (Суперпозиция 4 выбранных квантовых состояний)*

$$|k_p^{FC1}\rangle \otimes |k_p^{FC2}\rangle \otimes |k_D^{FC1}\rangle \otimes |k_D^{FC2}\rangle$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2^n}} (\alpha_1 \cdot |0000\rangle + \alpha_2 \cdot |0001\rangle + \dots + \alpha_{2^{n-1}} \cdot |1110\rangle + \alpha_{2^n} \cdot |1111\rangle)$$

*16 возможных состояний* ( $n = 4$ )

$\alpha_k \cdot |a_1 a_2 a_3 a_4\rangle$ 

*Выбранное состояние*

*Процесс реального времени V*

**max.**

←

$$\begin{cases} \alpha_1 = y_{1,p}^0 \cdot y_{2,p}^0 \cdot y_{1,D}^0 \cdot y_{2,D}^0 \\ \alpha_2 = y_{1,p}^0 \cdot y_{2,p}^0 \cdot y_{1,D}^0 \cdot y_{2,D}^1 \\ \vdots \\ \alpha_{16} = y_{1,p}^1 \cdot y_{2,p}^1 \cdot y_{1,D}^1 \cdot y_{2,D}^1 \end{cases}$$

Рис. 4. Выбор приоритетного квантового состояния по принципу максимизации амплитуды вероятностей

Применяя тензорное произведение между преобразованиями Адамара, получим суперпозицию выбранных состояний (комбинации коэффициентов усиления). Как видно на рис. 4, имеется 16 возможных состояний, входящих в данную суперпозицию.

**Этап 5.** Следующий шаг в КНВ – выбор приоритетного в суперпозиции квантового состояния при фиксированном типе корреляции (в данном случае пространственном) – осуществляется в блоке V на рис. 2. За критерий отбора приоритетного квантового состояния принимается *принцип максимума амплитуды вероятностей* при соответствующем коррелированном состоянии. Таким образом, вычислением амплитуд квантовых состояний в суперпозиции состояний со смешанными видами квантовой корреляции и выбором среди них максимальной реализуется модель квантового оракула, обладающего (по определению понятия квантового оракула) необходимой информацией об искомом решении.

**Этап 6.** Используя стандартную процедуру декодирования (как норму вектора состояния в Гильбертовом пространстве) и выбирая коэффициенты шкалирования для выходных значений проектируемых коэффициентов усиления (рис. 2, блок VI), осуществляется вычисление выходного результата блока КНВ.

Отметим принципиальную особенность процесса формирования и проектирования нового вида робастных коэффициентов усиления нечёткого 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 (ОБЗ1) проектирование БЗ осуществляется путем случайного поиска с помощью 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.

Применение новых типов и видов квантовой корреляции позволяет 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 телепортации между квантовыми состояниями в сформированной суперпозиции. Такой подход к проектированию робастных БЗ не имеет классических аналогов и отличается чисто квантовой природой получаемых эффектов проектирования.

Резюмируя все сказанное, представим теперь алгоритм КНВ в виде следующих шагов.

### Шаг 1. Кодирование

- Построение всех нормализованных состояний  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  для текущих входных значений коэффициентов усиления  $\{k_p^i(t), k_D^i(t), k_I^i(t)\}$  нечетких регуляторов, где индекс  $i$  означает номер НР (или его базы знаний),
- Вычисление амплитуд вероятностей  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  из соответствующих гистограмм.

### Шаг 2. Выбор типа квантовой корреляции для построения новых значений (выходных) сигналов управления

Например, рассмотрим следующий тип квантовой корреляции:

$$\{k_p^1(t), k_p^2(t), k_D^1(t), k_D^2(t)\} \rightarrow k_p^{new}(t),$$

где 1 и 2 – индексы Баз Знаний (или соответствующих НР). Квантовое состояние  $|a_1 a_2 a_3 a_4\rangle = |k_p^1(t) k_p^2(t) k_D^1(t) k_D^2(t)\rangle$  является запутанным состоянием.

### Шаг 3. Суперпозиция запутанных состояний

Построение суперпозиции запутанных состояний (рис. 5).

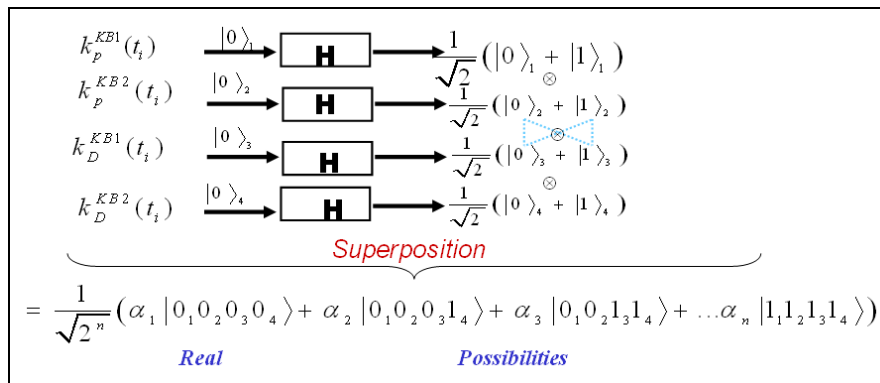


Рис. 5. Построение суперпозиции запутанных состояний

### Шаг 4. Измерение интеллектуального квантового состояния

Выбор состояния  $\vec{S} = |a_1 a_2 a_3 a_4\rangle$  с максимальной амплитудой вероятности  $|\alpha_k|^2$ .

### Шаг 5. Декодирование

Вычислить выходное значение соответствующего коэффициента усиления как норму вектора  $\vec{S}$

в пространстве состояний:  $k_p^{new}(t_i) = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sqrt{\langle a_1 \dots a_n | a_1 \dots a_n \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i)^2}$ .



**Шаг 6. Денормализация**

Вычисление денормализованного выходного значения соответствующего коэффициента усиления  $k_p^{output} = k_p^{new}(t_i) \cdot \max K_p, k_D^{output} = k_D^{new}(t_i) \cdot \max K_D, k_I^{output} = k_I^{new}(t_i) \cdot \max K_I$ .

**Шаг 7(off-line). Поиск коэффициентов шкалирования**

Поиск робастных коэффициентов шкалирования  $\{gain_p, gain_D, gain_I\}$  с помощью ГА и выбранной функции пригодности.

**Шаг 7 (on-line). Вычисление выходного значения**

Вычисление реального выходного значения соответствующего коэффициента усиления с учетом найденных на шаге 7 (off-line) коэффициентов шкалирования:

$$k_p^{output} = k_p^{new}(t_i) \cdot gain_p, k_D^{output} = k_D^{new}(t_i) \cdot gain_D, k_I^{output} = k_I^{new}(t_i) \cdot gain_I.$$

**Квантовый оптимизатор баз знаний и программный инструментарий**

Для проектирования квантового контроллера (рис. 6) разработан новый программный продукт, называемый «Оптимизатор Баз Знаний на квантовых вычислениях», являющийся продвинутым дополнением к инструментарию ОБЗ на мягких вычислениях. Структура квантового регулятора на основе КНВ показана на рис. 6.

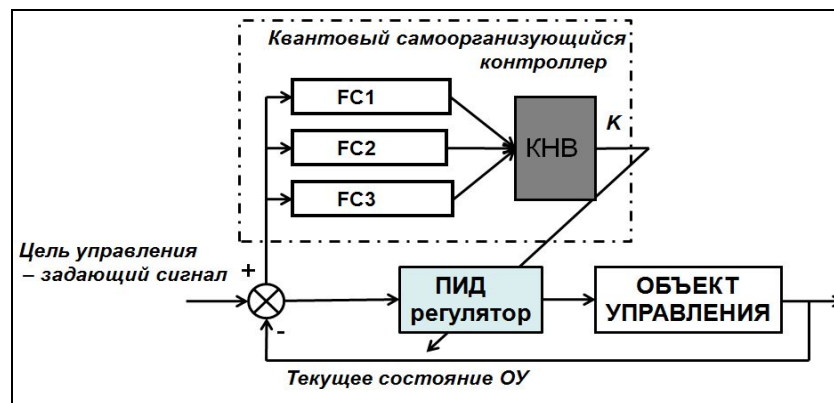


Рис. 6. Структура квантового контроллера на основе КНВ

*Примечание.* Для простоты в дальнейшем будем называть ОБЗ на квантовых вычислениях – квантовым оптимизатором. Будем использовать также сокращение ОБЗ2.

Оптимизатор Баз Знаний на квантовых вычислениях (ОБЗ2) предназначен для проектирования самоорганизующихся квантовых контроллеров и представляет собой программный инструментарий, позволяющий спроектировать несколько структур КНВ (с разными типами квантовых корреляций) и выбрать из них наилучшую с точки зрения робастности. ОБЗ2 реализован в виде программной системы. В качестве языка программирования при реализации данной системы был выбран язык C++ (Microsoft Visual Studio.net). Алгоритмическая часть, отвечающая за реализацию основных этапов алгоритмов оптимизации, была выполнена платформно независимо. Графический интерфейс, представленный на рис. 7, разработан для операционных систем семейства Win32 и был протестирован на PC с различными установленными версиями операционной системы Windows. Основное программное меню квантового оптимизатора (т.н. модельное окно) показано на рис. 7.

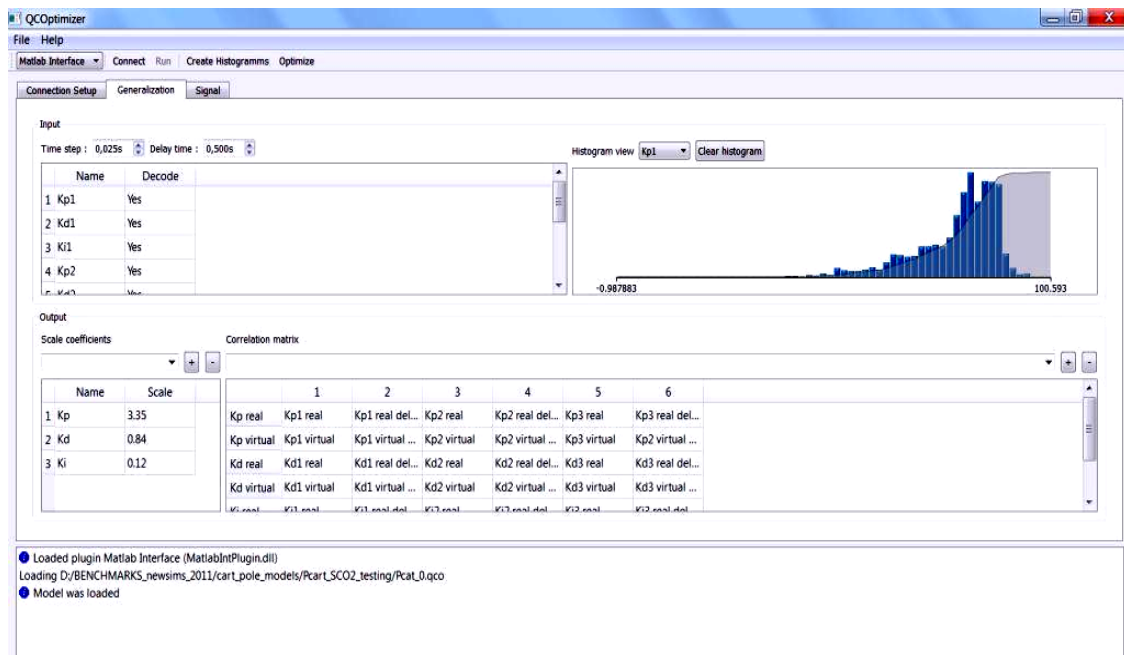


Рис. 7. Основное программное меню квантового оптимизатора

Модельное окно ОБЗ2 позволяет строить различные модели управления на основе алгоритма КНВ. Главное меню ОБЗ2 обеспечивает доступ к функциям создания, редактирования моделей, а также к функции оптимизации параметров КНВ. Для создания модели, показанной на рис. 7, выбираем в главном меню опции «File» и «New» и попадаем в окно, где надо указать число входных переменных в блок КНВ (для трех БЗ это равно 9), число выходных переменных (3) и размер состояния квантовой корреляции (для трех БЗ это 6). Далее попадаем в основное окно, где описываются заданные переменные и тип квантовой корреляции (например, так, как показано на рис. 7). В окне рис. 7 описываются входные данные блока, их гистограммы, выходные данные блока, коэффициенты шкалирования «Scale» (которые находятся с помощью ГА), а также тип квантовой корреляции. В окне «Delay time» задается параметр, связанный с параметром временной квантовой корреляции  $\Delta t$ . В окне «Time step» описывается время управления (моделирования движения ОУ в матлабовской модели или в реальной физической модели). Для описания квантовой корреляции имеется окно «Correlation matrix». В случае, представленном на рис. 7, описана временная квантовая корреляция для алгоритма КНВ с тремя базами знаний. Обсудим данное представление. Временная квантовая корреляция может быть представлена в следующем виде:

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

где индексы 1,2,3 означают номера нечетких регуляторов (их БЗ соответственно), а  $\otimes$  – операция тензорного произведения квантовых состояний. В соответствии с указанной корреляцией будет вычисляться новое значение  $k_p^{new}(t)$  как результат самоорганизации значений:

$$k_p^1(t), k_p^1(t - \Delta t), k_p^2(t), k_p^2(t - \Delta t), k_p^3(t), k_p^3(t - \Delta t).$$

Для временной квантовой корреляции корреляционная матрица «Correlation matrix» представляется в виде следующей таблицы:

	1	2	3	4	5	6
Kp real	Kp1 real	Kp1 real_del	Kp2 real	Kp2 real_del	Kp3 real	Kp3 real_del
Kp virtual	Kp1 virtual	Kp1 virt_del	Kp2 virtual	Kp2 virt_del	Kp3 virtual	Kp3 virt_del
Kd real	Kd1 real	Kd1 real_del	Kd2 real	Kd2 real_del	Kd3 real	Kd3 real_del

<b>Kd virtual</b>	Kd1 virtual	Kd1 virt_del	Kd2 virtual	Kd2 virt_del	Kd3 virtual	Kd3 virt_del
<b>Ki real</b>	Ki1 real	Ki1 real_del	Ki2 real	Ki2 real_del	Ki3 real	Ki3 real_del
<b>Ki virtual</b>	Ki1 virtual	Ki1 virt_del	Ki2 virtual	Ki2 virt_del	Ki3 virtual	Ki3 virt_del

На основе построенной корреляционной матрицы строится суперпозиция запутанных состояний. Коэффициенты шкалирования  $gain_{p(D,I)}$  для алгоритма КНВ находятся с помощью ГА. Для этого в главном меню ОБ32 имеется кнопка «Optimize». Нажав ее, попадаем в окно параметров оптимизации и далее в сам процесс оптимизации (поиска коэффициентов шкалирования). Но перед этим в окне «Connection Setup» надо прописать путь доступа к Матлаб-Симулинк модели и функциям инициации, пригодности и окончания сессии. Например, так, как показано на рис. 8.

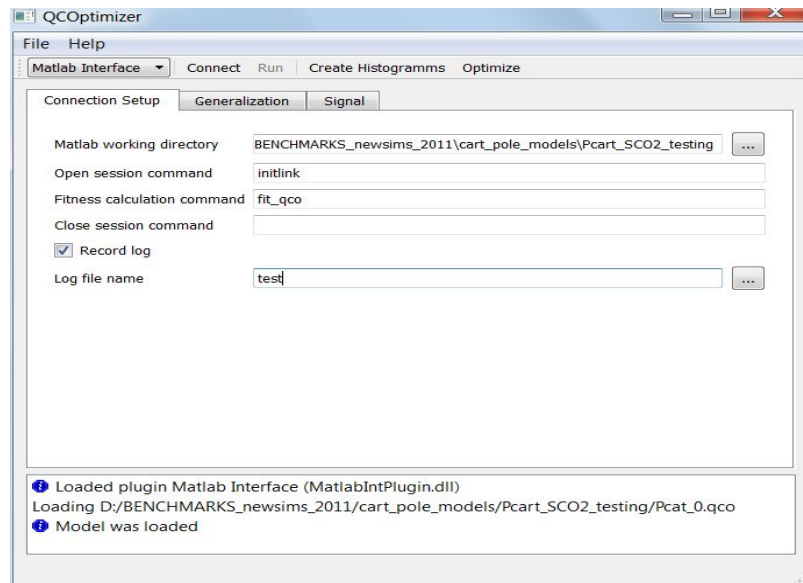


Рис. 8. Окно установок доступа к матлаб модели и фитнес функции

Нажав кнопку «Optimize» и подтвердив далее параметры ГА, активизируем процесс поиска ГА. При этом возникает окно, показывающее состояние процесса оптимизации (рис. 9).

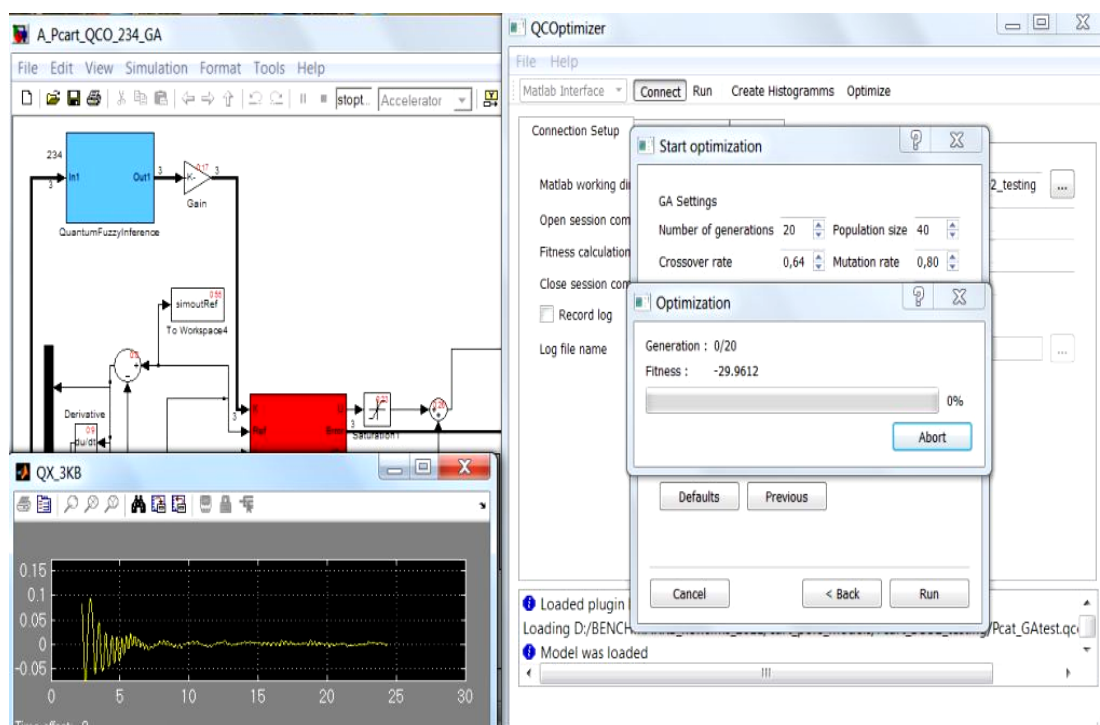


Рис. 9 Окно процесса оптимизации (справа) и текущая модель ОУ в МатЛаб/Симулинк (слева)

Процесс (окно процесса оптимизации показано на рисунке справа) можно остановить кнопкой «Abort All». По умолчанию, лучшее решение запоминается в блоке модели КНВ. ОБ32 сохраняет файл с моделью в формате «имя.qco», который затем используется в квантовом нечетком регуляторе (КНР). КНР является либо блоком в матлаб/симулинк модели управления заданным ОУ, либо может быть связан с реальным физическим ОУ.

Мы обсудили особенности использования программного продукта ОБ32 – «Оптимизатор Баз Знаний на квантовых вычислениях» – для проектирования самоорганизующегося квантового контроллера, способного выполнять функции управления заданным ОУ в широком классе ситуаций управления, включая непредвиденные. Основным блоком в ОБ32 является блок *квантового нечеткого вывода* – КНВ.

В результате применения КНВ в структуре ИСУ осуществляется извлечение дополнительной (скрытой) квантовой информации, а ее использование дает возможность проектировать робастные сигналы управления в реальном времени из реакций НР на непредвиденные ситуации управления. С помощью средств ОБ32 можно проектировать и тестировать различные квантовые контроллеры на основе разных КНВ: КНВ с разными типами корреляции, КНВ с различным набором БЗ (двумя, тремя, четырьмя и т.д.). После тестирования выбираем наиболее робастный контроллер для использования в реальных приложениях.

В следующем разделе рассмотрим и обсудим результаты моделирования поведения выбранного динамического объекта управления (т. наз. *benchmark*) на основе спроектированных самоорганизующихся квантовых контроллеров с помощью инструментариев ОБ31 и ОБ32.

### ***Пример проектирования самоорганизующейся интеллектуальной системы управления на основе квантового оптимизатора баз знаний***

Рассмотрим пример эффективного моделирования самоорганизации робастных БЗ в ИСУ глобально неустойчивым и существенно-нелинейным объектом управления (ОУ) (см. рис. 10)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Эффективность и качество управления на основе разработанного инструментария для данного примера рассмотрены в [5].

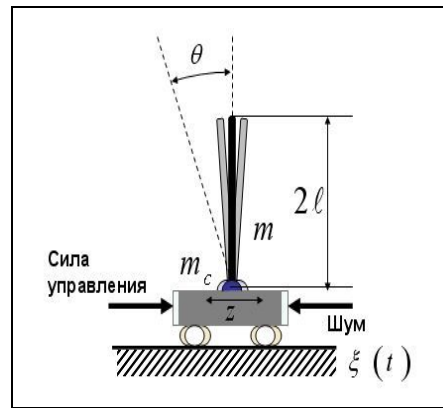


Рис. 10. Динамическая система «перевернутый маятник – каретка»

Модель ОУ усложнена новыми (по отношению ко многим известным) ограничениями. В частности, модель ОУ содержит в структуре случайные параметрические возмущения, дискретные ограничения, задержки по времени в измерительной системе состояний ОУ, непредвиденные ситуации управления, что представляет большую алгоритмическую сложность для эффективного применения традиционных методов оптимального управления.

Движение динамической системы “перевернутый маятник-каретка”, описывается следующими уравнениями:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left( \frac{+(u + \xi(t)) + \{+a_1 \dot{z} + a_3 z\} - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k \dot{\theta}}{l \left( \frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}, \quad (1)$$

$$\ddot{z} = \frac{u + \xi(t) + \{-a_1 \dot{z} - a_2 z\} + ml(\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \cos \theta)}{m_c + m},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения ( $9.8 \text{ m/sec}^2$ ),  $m_c$  – масса каретки,  $m$  – масса маятника,  $l$  – половина длины маятника,  $\xi(t)$  – внешнее стохастическое воздействие и  $u$  – управляющая сила, действующая на каретку;  $\{k; a_1; a_2\}$  – параметры модели ОУ.

Уравнения для скорости производства энтропии в ОУ и ПИД-регуляторе имеют следующий вид:

$$\frac{d}{dt} S_\theta = \frac{k \dot{\theta}^2 + \frac{ml \dot{\theta}^3 \sin 2\theta}{m_c + m}}{l \left( \frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}; \quad \frac{d}{dt} S_z = a_1 \dot{z}^2; \quad \frac{d}{dt} S_u = k_d \dot{e}^2. \quad (2)$$

**Задача управления:** при наличии стохастического шума, действующего на каретку, при наличии времени задержки сигнала в системе измерения положения маятника (равного 0.001 сек.) и при наличии ограничения на силу управления, перевести маятник из начального положения в целевое вертикальное ( $\theta = 0$ ) и удерживать движение ОУ в заданном вертикальном положении.

Для решения поставленной задачи управления рассмотрим следующую *схему управления*. Так как сила управления действует на каретку, то задающий сигнал управления тоже должен быть связан с движением каретки. Для задачи стабилизации перевернутого маятника ( $\theta \rightarrow 0$ ) выберем следующий задающий сигнал  $z_{ref}$ : проекция центра тяжести перевернутого маятника на ось  $z$ . Проекция центра тяжести перевернутого маятника вычисляется по формуле:  $z_{ref} = -l \cdot \sin \theta$ . Следовательно,

задающий сигнал может быть представлен следующим образом:  $z_{ref} = -l \cdot \sin \theta$ . Очевидно, что, если  $\theta \rightarrow 0$ , то  $z_{ref} \rightarrow 0$ . Зададим также ограничение на задающий сигнал:  $|z_{ref}| \leq 1$ .

Будем проектировать *самоорганизующийся квантовый контроллер* для робастного управления в широком классе ситуаций управления, в том числе и в случае непредвиденных ситуаций, на основе инструментариев ОБЗ1 и ОБЗ2 [6].

### Обоснование разработки ОБЗ2 на основе квантового алгоритма самоорганизации БЗ с использованием результатов моделирования

На первом этапе будем строить ИСУ в виде нечеткого ПИД-регулятора (НР) на основе инструментария ОБЗ1 [4]. Исследуем возможности четырех баз знаний (и соответственно четырех НР), построенных для четырех типовых ситуаций<sup>2</sup>, различающихся внешними шумами, показанными на рис. 11. Остальные параметры обучающих ситуаций – следующие. Параметры модели ОУ:  $\{m_c [kg]; m [kg]; l [m]; k; a_1; a_2\} = \{1; 0.1; 0.5; 0.4; 0.1; 5\}$ .

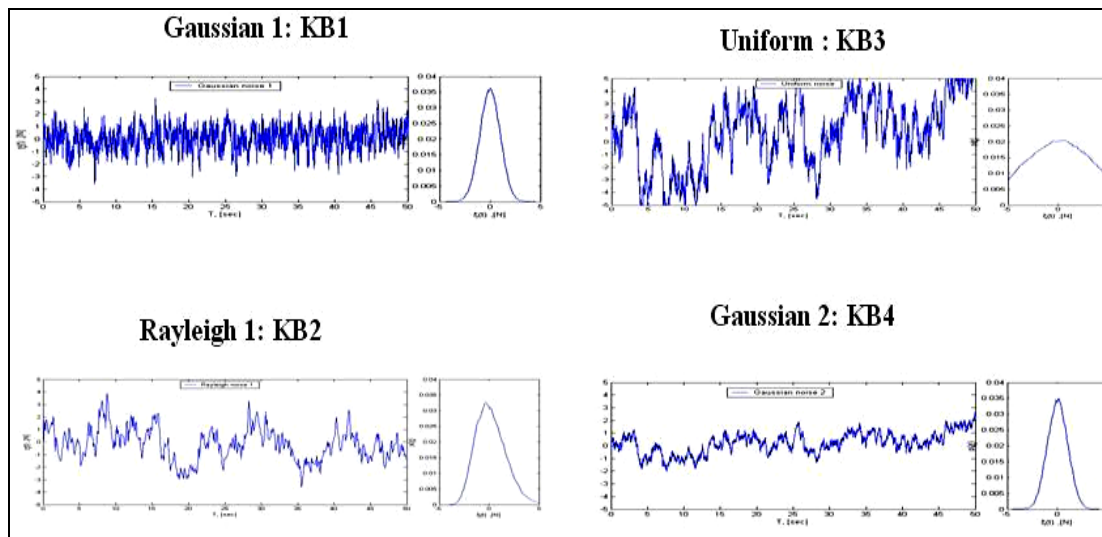


Рис. 11. Четыре типовых шума для выбранного ОУ

Начальное положение:  $[\theta_0 \dot{\theta}_0] = [10 \ 0.1]$  (в градусах);  $[z_0 \dot{z}_0] = [0 \ 0]$  [m]; Задержка по времени в канале измерения = 0.001 (сек); Ограничения на силу управления:  $-5.0 < u < 5.0$  [N]. Ограничения на движение каретки:  $-1.0 < z < 1.0$  [m].

Для построения баз знаний необходим *обучающий сигнал* (ОС), который может быть получен экспериментально или на основе моделирования процесса поиска оптимального сигнала управления с помощью ГА. Выберем следующие параметры поиска для ГА: область поиска значений вектора  $K = [100 \ 100 \ 100]$ ; функция пригодности  $ФП = \sum |\theta| + \sum |\dot{\theta}|$  представляет собой сумму абсолютных значений угла отклонения и скорости угла отклонения; ГА ищет минимум ФП.

По окончании процесса поиска оптимального сигнала управления с помощью ГА, формируем ОС для следующего этапа технологии проектирования. Данный ОС поступает на вход ОБЗ1, который строит оптимальную и робастную БЗ для заданной типовой ситуации. Пример одной из построенных БЗ (БЗ3 для типовой ситуации 3 с равномерно-распределенным (uniform) шумом) показан на рис. 12.

<sup>2</sup> Мишин А.А., Петров С.П., Ульянов С.В. Применение оптимизатора баз знаний для проектирования интеллектуальных систем управления в среде MATLAB/SIMULINK. Ч.1 // Системный Анализ в Науке и Образовании: электрон. науч. журнал. – 2011. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/21>. – 0421100111\0020.



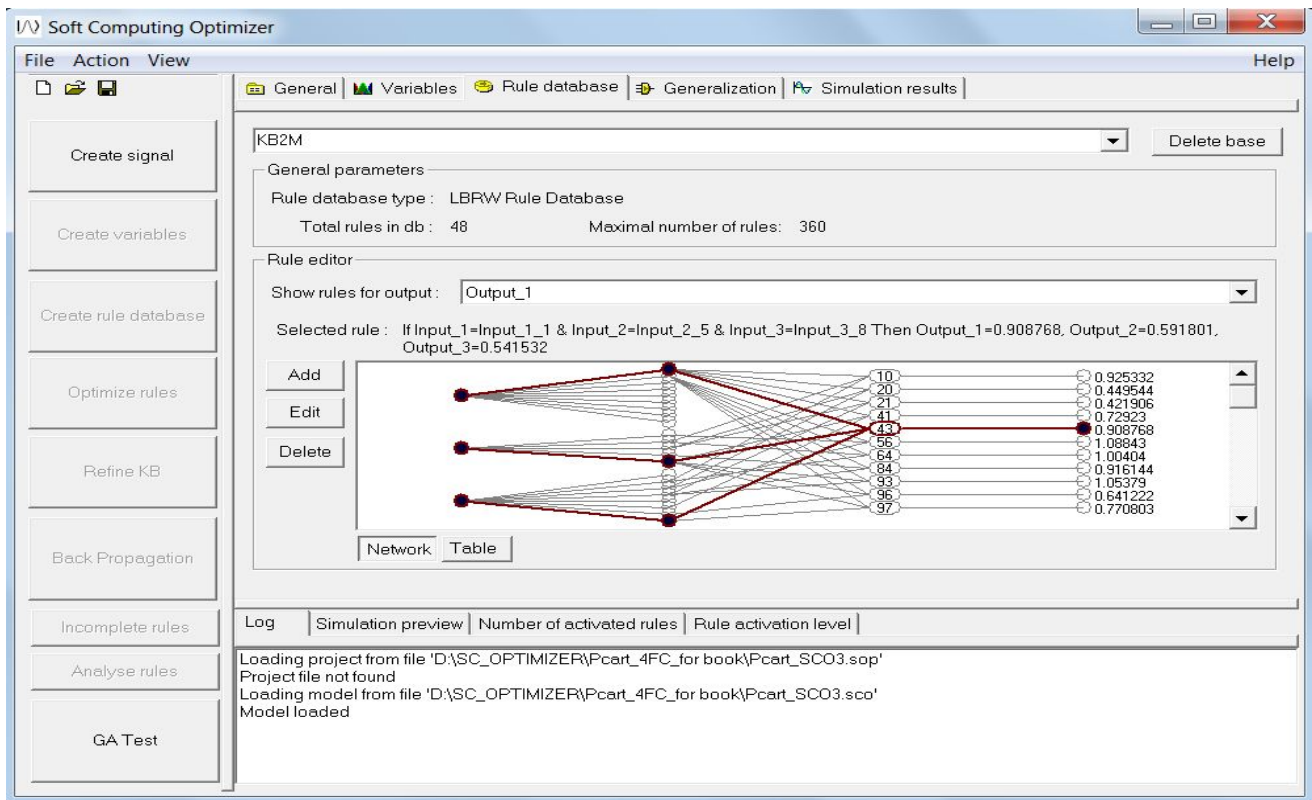


Рис. 12. БЗЗ нечеткого контроллера 3 (НРЗ)

База Знаний 3 (БЗЗ) состоит из 48 правил (рис. 12), выбранных ОБЗ1 из полной БЗ с 360 правилами. Число лингвистических переменных для трех входов равно (9,5,8). Напомним, что полная БЗ равна произведению числа лингвистических переменных для трех входов, т.е. полная БЗ состоит из  $9 \times 5 \times 8 = 360$  правил.

На рис. 13 показано представление нечетких множеств для входной переменной (input\_3) в нечетком регуляторе НРЗ.

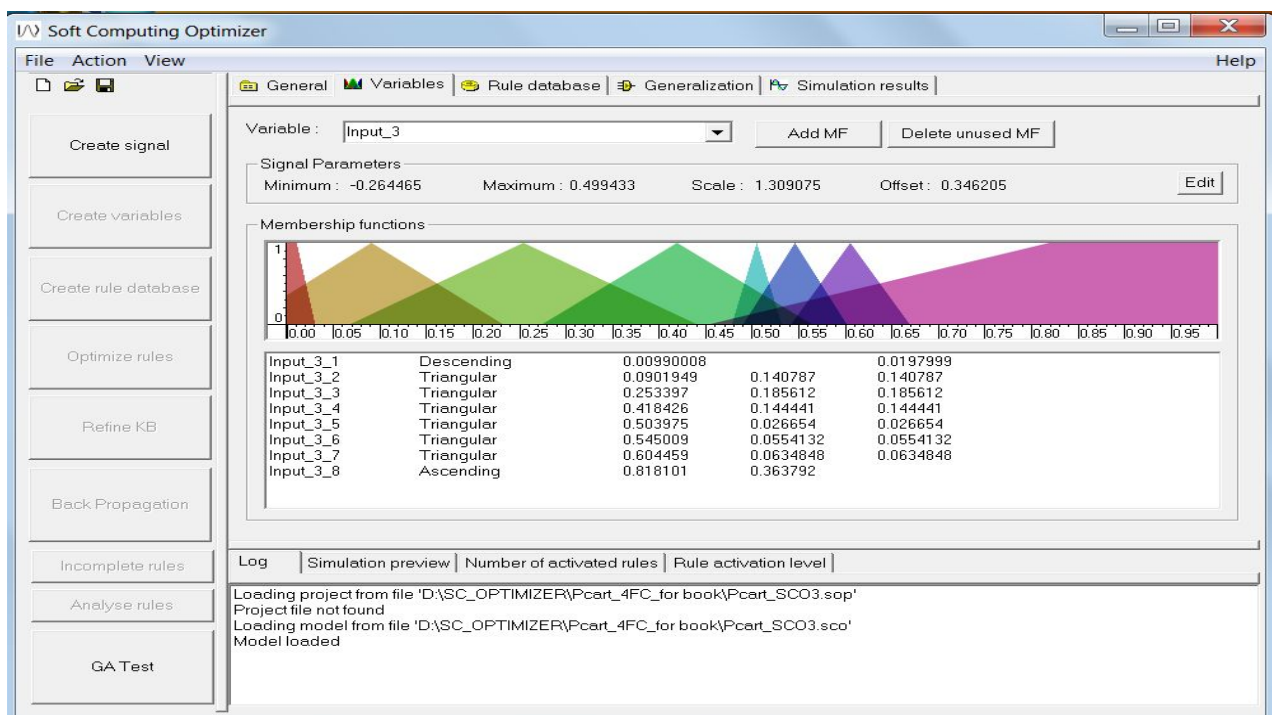
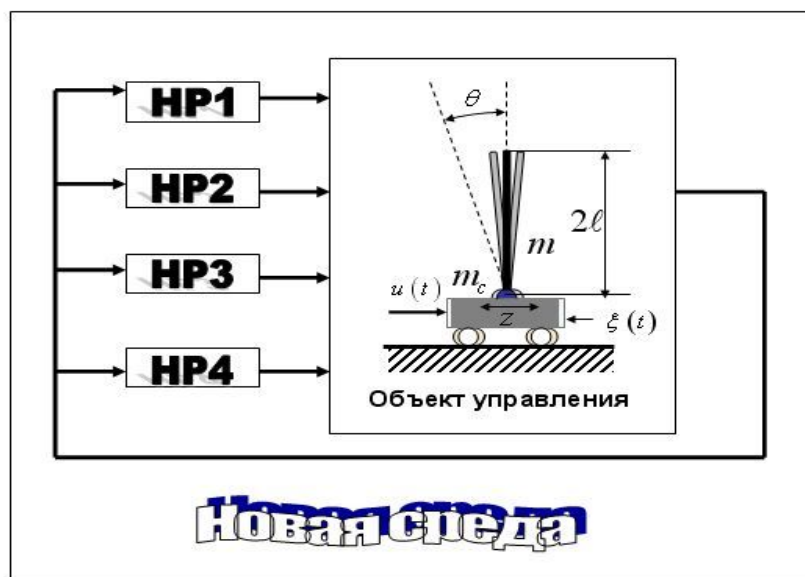


Рис. 13. Представление нечетких множеств для третьей входной переменной в НРЗ

Проведем исследование, схематично показанное на рис 14. Для этого выберем ситуации управления («новая среда») отличные от четырех типовых указанных выше.



Какая ИСУ победит в новой среде функционирования ОУ ?

Рис. 14. Схема исследования робастности построенных НР

Смоделируем три нетиповых (непредвиденных) ситуаций, как показано в Табл. 2.

### Сравнение движения перевернутого маятника в новых непредвиденных ситуациях для четырех построенных нечетких регуляторов

Результаты сравнения движения маятника под управлением четырех нечетких регуляторов (четырёх баз знаний соответственно) в трех смоделированных непредсказуемых ситуациях управления (Табл. 2) показаны на рис. 17-19.

Таблица 2

S1 ситуация управления	S2 ситуация управления
Новый Рэлеевский шум (рис. 15) <i>Шум в системе измерения</i> (Гауссовский с амплитудой = 0.01); <i>Новая временная задержка</i> = 0.003 сек; Типовые параметры модели и начальное положение	Новый Рэлеевский шум (рис. 15) <i>Шум в системе измерения</i> (Гауссовский с амплитудой = 0.01); <i>Новая временная задержка</i> = 0.002 сек; Новое значение параметра $a_1 = 0.08$ ; Типовое начальное положение
S3 ситуация управления	
Равномерно распределенный шум: (рис. 16) <i>Шум в системе измерения</i> (Гауссовский с амплитудой = 0.01); <i>Новая временная задержка</i> = 0.005 сек; Типовые параметры модели и начальное положение	



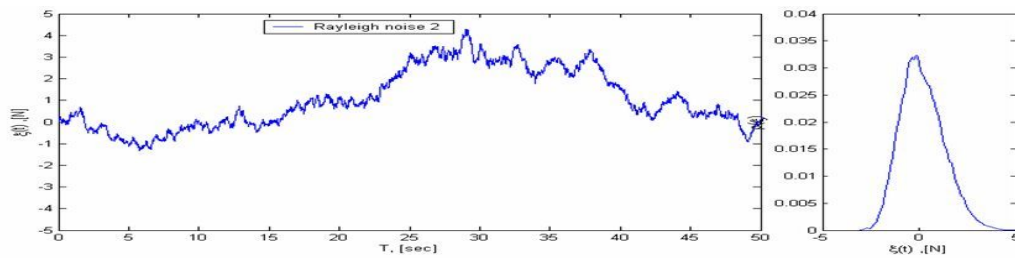


Рис. 15. Новый Рэлеевский шум

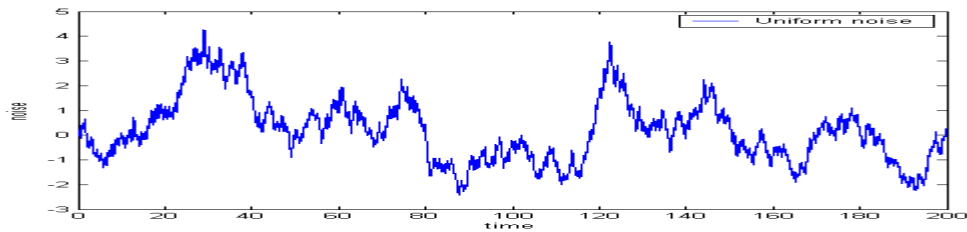


Рис. 16. Равномерно распределенный шум

**Ситуация S1.** Новый стохастический шум, новое время задержки и шум в измерительной системе. (Примечание. На рисунках используются следующие обозначения: FC1 – HP1, FC2 – HP2, FC3 – HP3, FC4 – HP4).

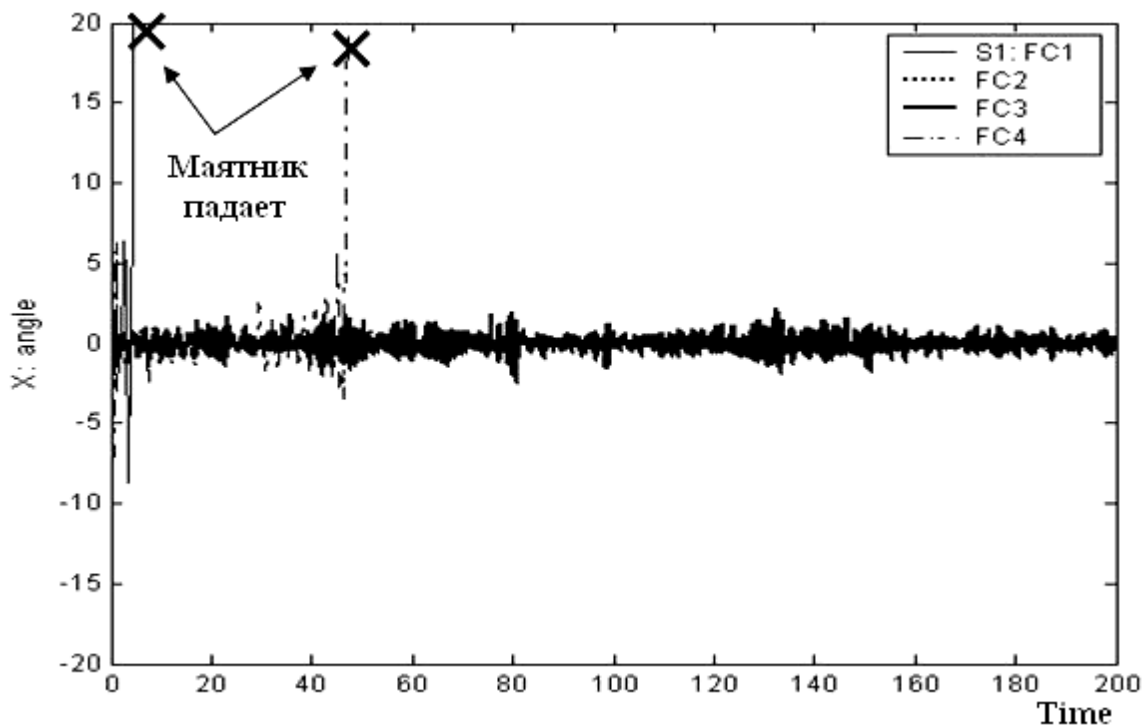


Рис. 17. Движение перевернутого маятника в ситуации S1 для четырех нечетких регуляторов

**Вывод:** нечеткие регуляторы HP1 и HP 4 - не робастны в S1 ситуации, так как маятник падает при их управлении.

**Ситуация S2.** Новый стохастический шум, новое время задержки и шум в измерительной системе. Кроме того, изменился параметр модели ОУ.

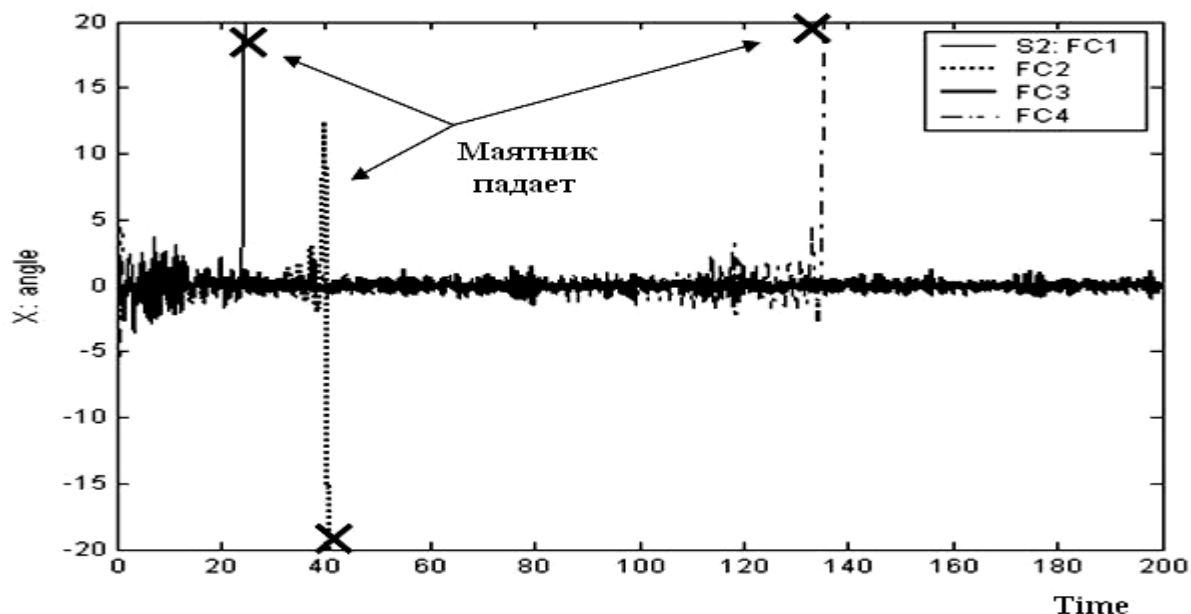


Рис. 18. Движение перевернутого маятника в ситуации S2 для четырех нечетких регуляторов

**Вывод:** Нечеткие контроллеры НР1, НР2 и НР4 не робастны в S2 ситуации. Только НР3 справляется с задачей управления.

**Ситуация S3.** Новый стохастический шум, новое, еще большее, время задержки и шум в измерительной системе.

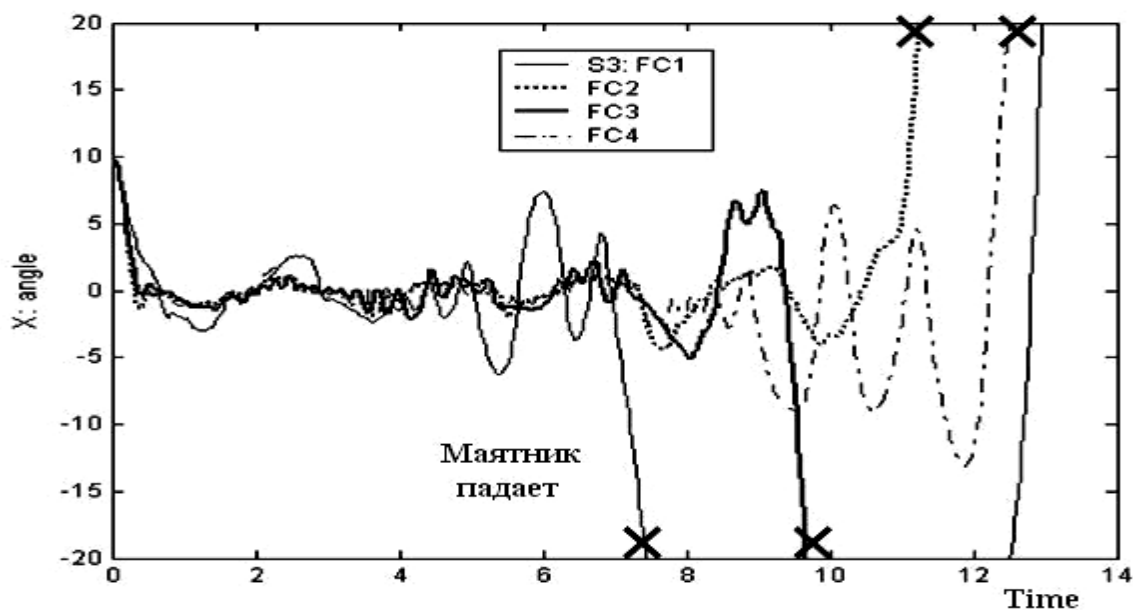


Рис. 19. Движение перевернутого маятника в ситуации S3 для четырех нечетких регуляторов

**Вывод:** все регуляторы не робастны в S3 ситуации.

Результаты моделирования (Рис. 17 – 19) показывают границы робастности нечетких регуляторов, построенных на основе инструментария на мягких вычислениях. Факторами, влияющими на робастность нечетких регуляторов, построенных в типовых обучающих условиях, являются:

- изменение стохастических параметров внешнего шума;
- появление шумов в сенсорной системе (погрешности в системе измерения);
- изменение времени задержки в сенсорной системе (неполадки в системе измерения);
- смена параметров модели (в результате старения объекта управления, например).

Как показывают приведенные выше результаты моделирования, трудно спроектировать глобально «хорошую» и робастную структуру ИСУ на все случаи. В этом случае необходимо выбрать некоторую обобщающую стратегию, которая давала бы возможность переключать поток управляющих сигналов, поступающих с выхода различных БЗ НР, и (если необходимо) модифицировать их выходной сигнал под текущие условия функционирования ОУ. Конкретная реализация обобщающей стратегии достигается за счёт введения обобщения стратегий в моделях нечёткого вывода (на конечном множестве предварительно спроектированных НР) в виде нового, *квантового нечёткого вывода* (КНВ).

Таким образом, процесс проектирования робастных БЗ состоит из двух взаимосвязанных этапов, основанных на мягких и квантовых вычислениях соответственно. Функционально, на первом этапе процесса проектирования формируются индивидуальные БЗ для двух (или более) НР для конкретных ситуаций управления (ситуации обучения). На втором этапе реализуется *самоорганизация Баз Знаний* нечетких регуляторов на основе разработанного квантового алгоритма КНВ.

### Проектирование квантового регулятора для выбранного ОУ с помощью инструментария ОБЗ2

Будем проектировать самоорганизующийся квантовый нечеткий регулятор (КНР) на основе следующих трех спроектированных на первом этапе нечетких контроллеров – НР2, НР3 и НР4 (см. выше). *Примечание.* Количество выбранных баз для процесса самоорганизации является проектируемой величиной. С помощью ОБЗ2 можно исследовать различные варианты КНВ (с двумя базами, с тремя, с четырьмя базами знаний и т.д.) и выбрать наиболее робастный вариант. Как показали результаты моделирования, в случае с данным ОУ, вариант КНВ с четырьмя БЗ является «избыточным», менее робастным.

Матлаб/Симулинк структура КНР (блок «Quantum Fuzzy Inference») с тремя выбранными НР для динамической системы «маятник-каретка» показана на рис. 20. Блок «Connect block for SCO2» (справа на рис. 20) связывается с текущей (активированной моделью КНВ), показанной на рис. 21.

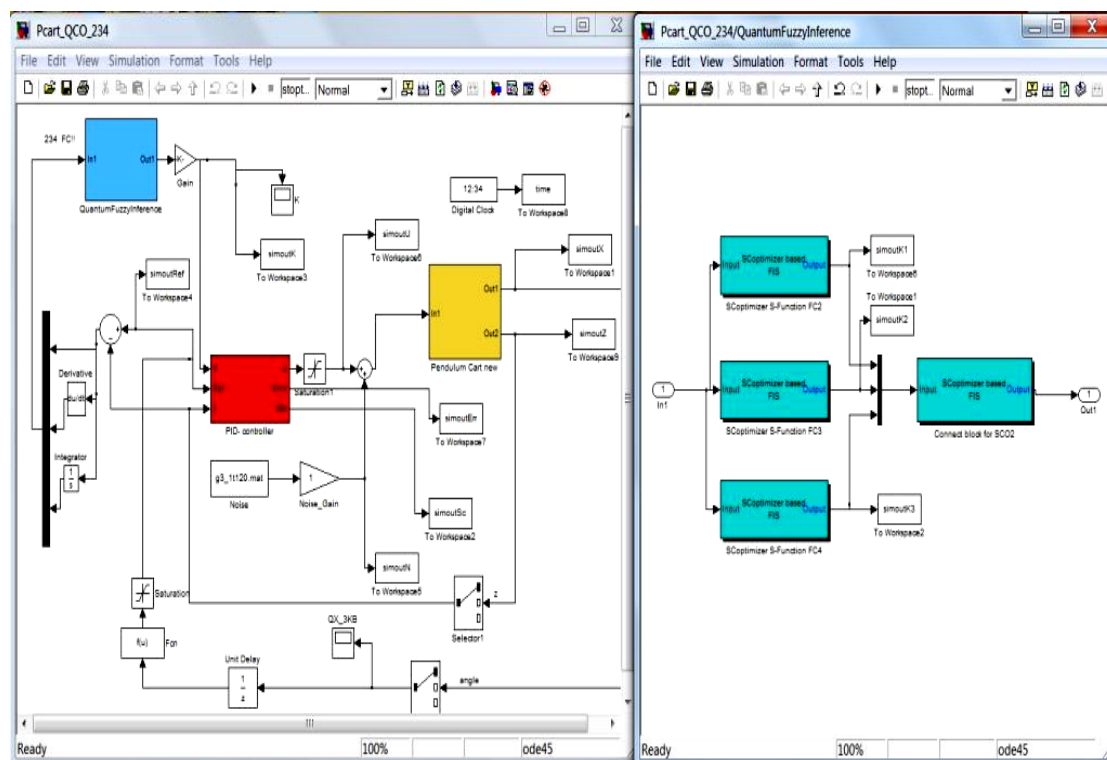


Рис. 20. Матлаб/Симулинк структура квантового регулятора динамической системы «маятник-каретка»

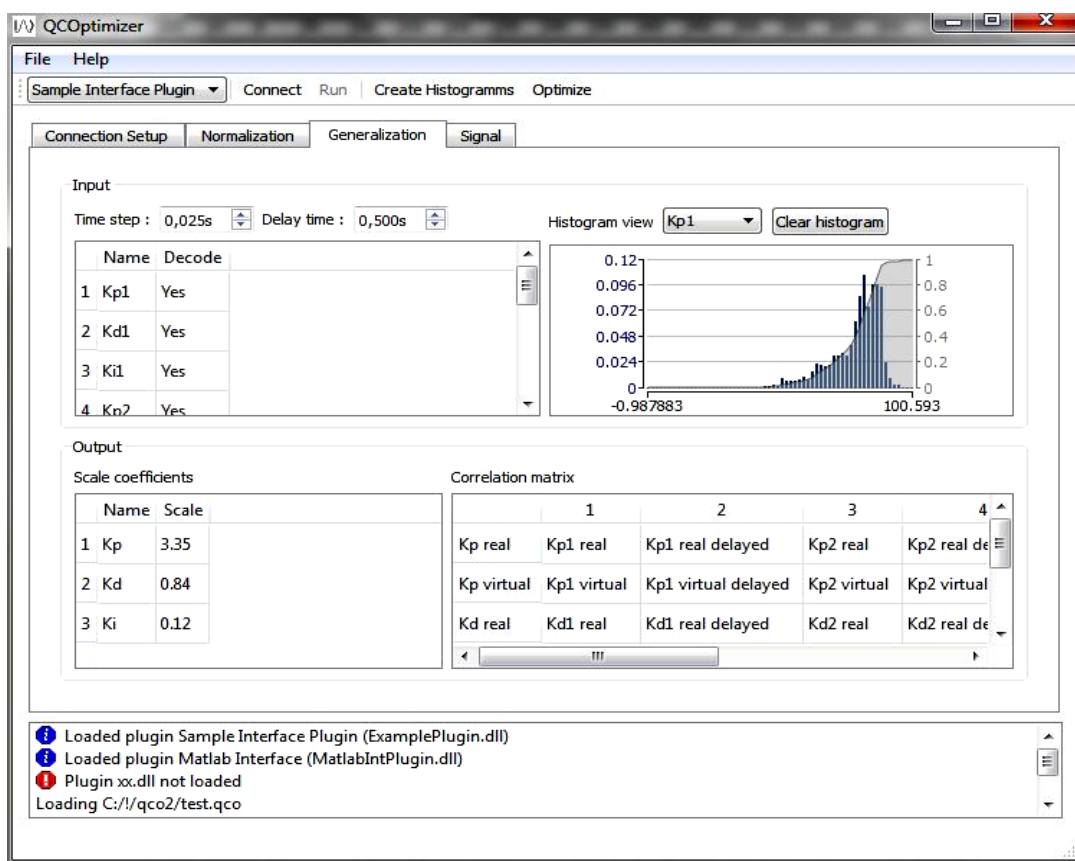


Рис. 21. Выбранная модель КНВ в инструментари OB32

Задача проектирования на данном этапе сводится к тестированию различных типов КНВ и выбора наилучшего для данного объекта управления и данной задачи управления. Исследуем три типа квантовой корреляции и выберем лучшую с точки зрения критериев управления. Выберем одну из типовых (обучающих) ситуаций управления, например, четвертую типовую ситуацию TS4 (условия проектирования нечеткого регулятора НР4, рис.11, KB4).

На рис. 22-24 показано сравнение динамического поведения ОУ под управлением КНР на основе трех типов квантовой корреляции в КНВ (пространственной, временной и пространственно-временной) в TS4.

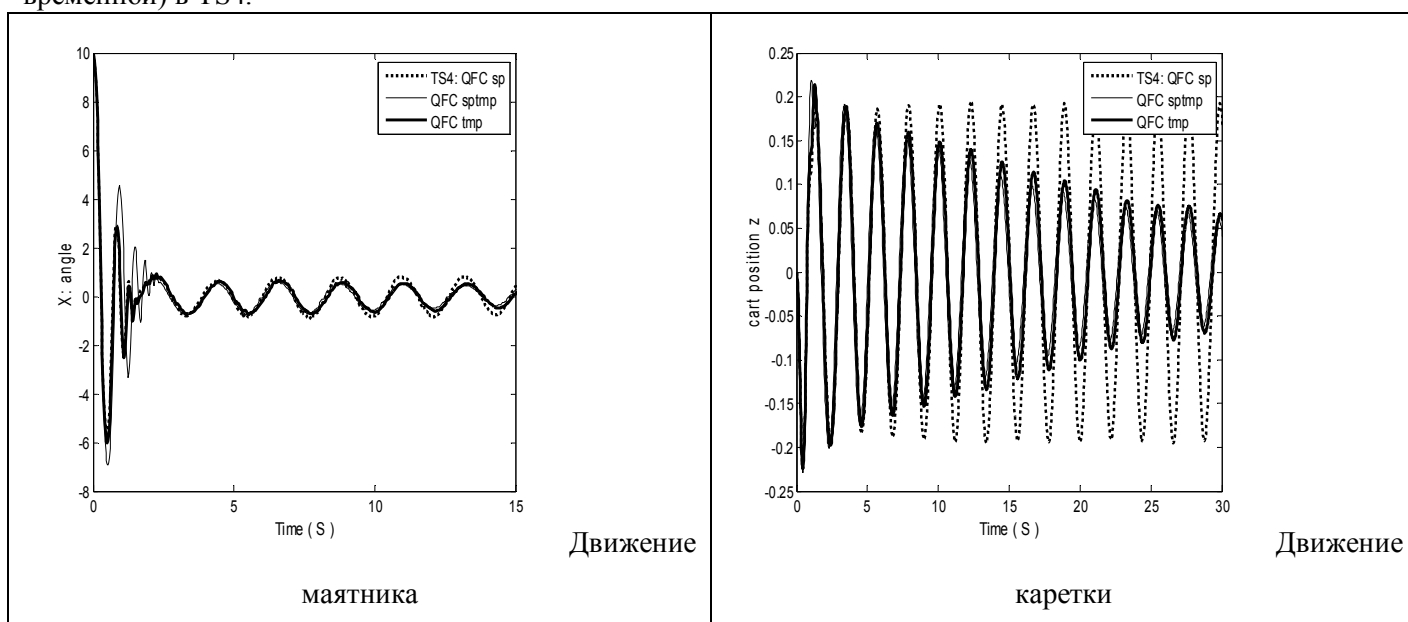


Рис. 22. Динамическое поведение системы «маятник-каретка» при управлении КНВ с тремя типами корреляций

*Примечание.* Для КНВ на основе *временной корреляции* параметр «delta» = 0.5 (сек), коэффициенты шкалирования  $\{gain_p, gain_D, gain_I\}$  посчитаны с помощью ГА и равны [3.3539 0.8438 0.1398];

Для КНВ на основе *пространственно-временной корреляции* параметр «delta» = 0.5 (сек), коэффициенты шкалирования  $\{gain_p, gain_D, gain_I\}$  посчитаны с помощью ГА и равны [4.5930 0.7117 1.4500];

Для КНВ на основе *пространственной корреляции* коэффициенты шкалирования  $\{gain_p, gain_D, gain_I\}$  посчитаны с помощью ГА и равны [3.4047 0.5781 0.7047]. Для простоты введем также следующие обозначения: **QFC sp** – КНР на основе *пространственной корреляции* в КНВ; **QFC sptmp** - КНР на основе *пространственно-временной корреляции* в КНВ; **QFC tmp** – КНР на основе *временной корреляции* в КНВ.

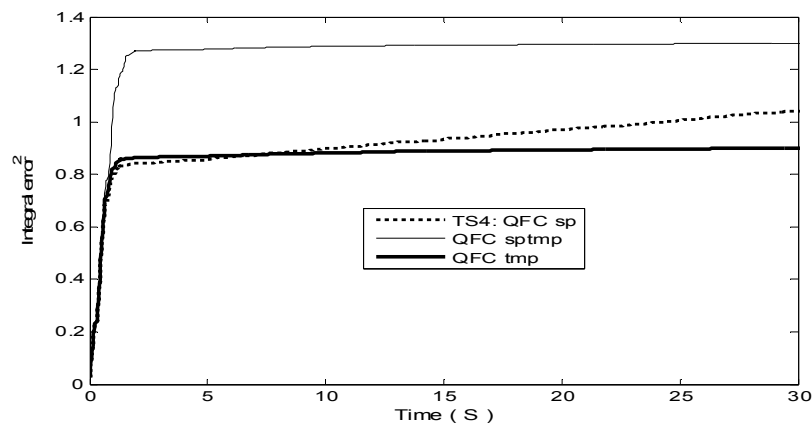


Рис. 23. Интегральная ошибка управления при управлении КНВ с тремя типами корреляций

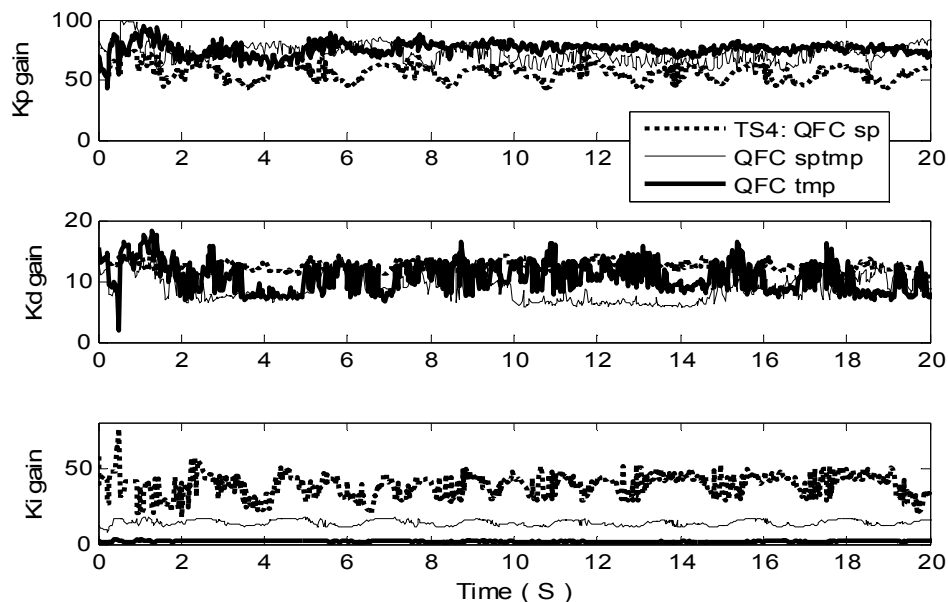


Рис. 24. Законы управления при управлении КНВ с тремя типами корреляций

**Вывод.** Результаты сравнения показывают, что для данного ОУ и выбранных трех нечетких контроллеров, КНР на основе *временной корреляции* в КНВ является лучшим с точки зрения основного

критерия качества управления – минимум интегральной ошибки управления. Поэтому выберем КНР на основе *временной корреляции* в КНВ для дальнейшего тестирования свойства робастности.

### Исследование робастности спроектированного квантового нечеткого контроллера: Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

Вернемся к ситуациям, описанным выше в табл. 2. Посмотрим на поведение нашей динамической системы в ситуациях управления из табл. 2 и сравним качества управления нечетких регуляторов (НР2, НР3 и НР4) и КНР.

**Ситуация S1.** Начнем с ситуации S1, при этом немного усложним S1, увеличив время задержки до 0.004 сек, и увеличив амплитуду шума в измерительной системе до 0.015. (рис. 25 и 26)

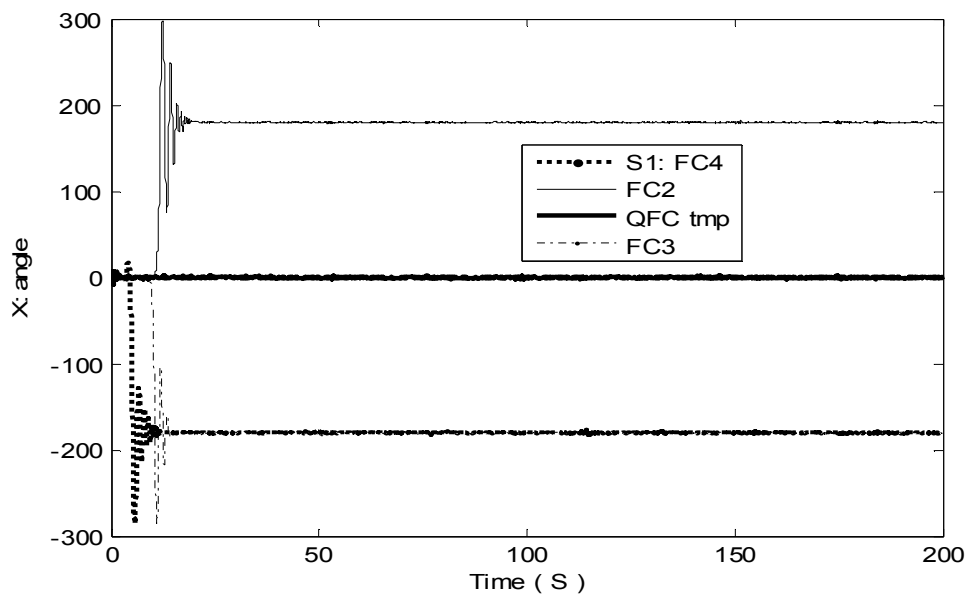


Рис. 25. Движение маятника в ситуации S1  
Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

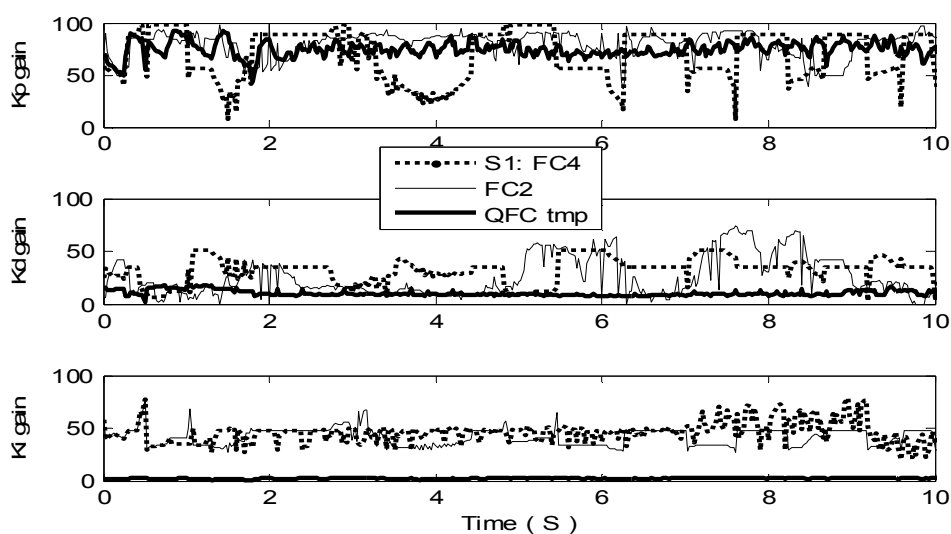


Рис. 26. Законы управления в S1  
Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

*Примечание.* На рис. 25 и 26 жирной линией показано движение маятника под управлением КНР (QFC tmp); тонкой линией – движение под управлением НР2 (FC2), пунктирной линией – движение под управлением НР4 (FC4); штрихпунктирной линией – движение под управлением НР3 (FC3).

*Вывод.* Все спроектированные нечеткие регуляторы не робастны в ситуации S1, так как маятник падает. Однако, квантовый регулятор успешно справляется с задачей управления.

**Ситуация S2.** Рассмотрим ситуацию S2 (Табл. 2) и усложним ее, увеличив задержку по времени до 0.004 сек.

На рис. 27 показано сравнение динамического поведения перевернутого маятника установленного на каретке (в ситуации S2) под управлением нечетких регуляторов и под управлением КНР на основе временной квантовой корреляции в КНВ.

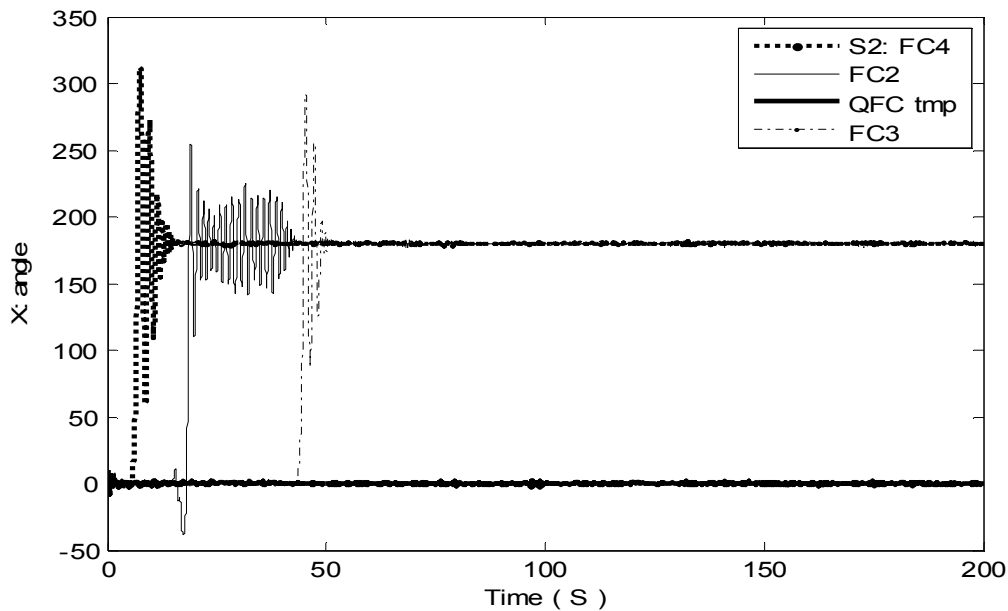


Рис. 27. Динамическое поведение системы «маятник-каретка» в ситуации S2  
Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

*Вывод.* Все спроектированные нечеткие регуляторы не робастны в ситуации S2, так как маятник падает. КНР успешно справляется с задачей управления.

**Ситуация S3.** Рассмотрим ситуацию S3 (Табл. 2) и усложним ее, увеличив задержку по времени до 0.006 сек.

На рис. 28 показано сравнение динамического поведения ОУ (в ситуации S3) под управлением нечетких регуляторов и под управлением КНР на основе временной квантовой корреляции в КНВ.

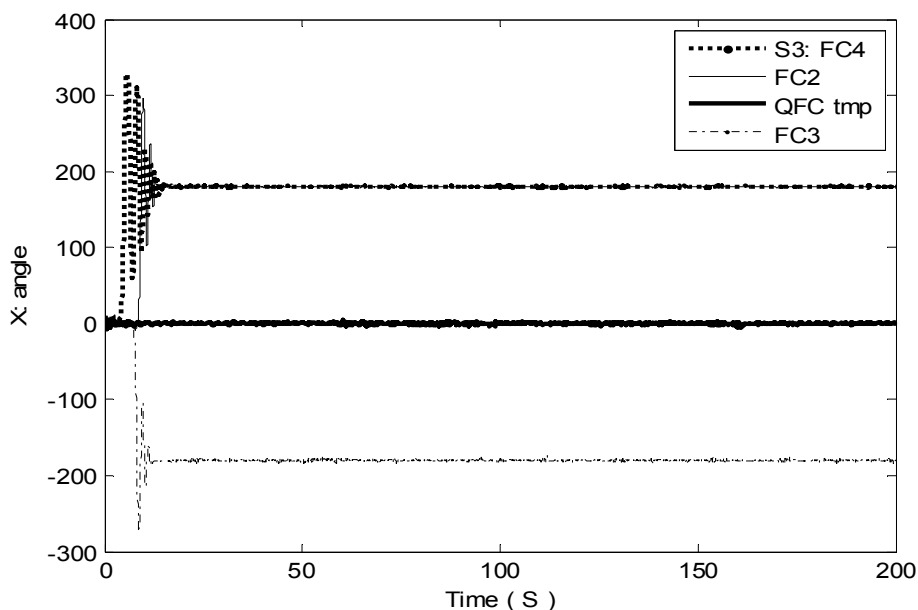


Рис. 28. Динамическое поведение системы «маятник-каетка» в ситуации S3  
Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

**Вывод.** Все три нечетких регулятора – не робастны в ситуациях S1, S2 и S3, однако квантовый нечеткий регулятор – робастен. С точки зрения квантовой теории игр данный эффект является демонстрацией «Паррондо парадокса»: в игровой ситуации (в непредвиденной ситуации управления) между тремя классическими НР(1,2,3) (игроки А, В и С соответственно), которые не являются победителями при использовании классических стратегий в различных ситуациях управления, с помощью квантовой стратегии принятия решений на основе КНВ можно спроектировать из них победителя в виде нового самоорганизующегося НР.

### Сравнение качества управления классического ПИД, взвешенного нечеткого и квантового нечеткого регуляторов

В заключение сделаем сравнение следующих трех типов управления: квантового нечеткого регулятора, традиционного ПИД с коэффициентами усиления равными средним значениям от КНВ в четвертой типовой ситуации ( $K = [74.4684 \ 9.2590 \ 2.2474]$ ) и взвешенного нечеткого регулятора. «Взвешенный» нечеткий контроллер (weighted fuzzy controller, WFC) строит управляющий сигнал на основе усреднения выходных сигналов от НР так, как это показано в симулинк/модели на рис. 29 – выходы от трех НР (НР4, НР2 и НР3) усредняются в блоке справа.



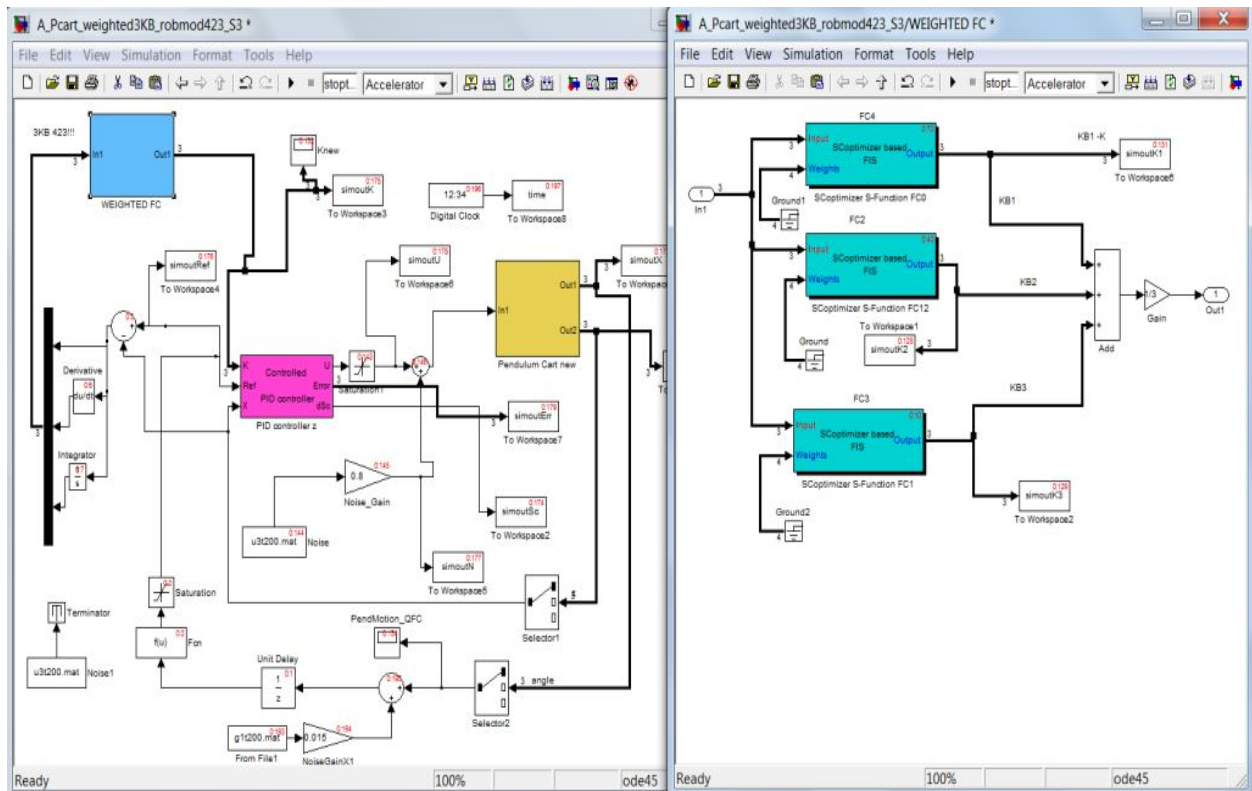


Рис. 29. Матлаб-Симулинк модель управления на основе «взвешенного» нечеткого контроллера

На рис. 30-32 показано сравнение динамического поведения ОУ под управлением трех указанных типов в ситуации S3.

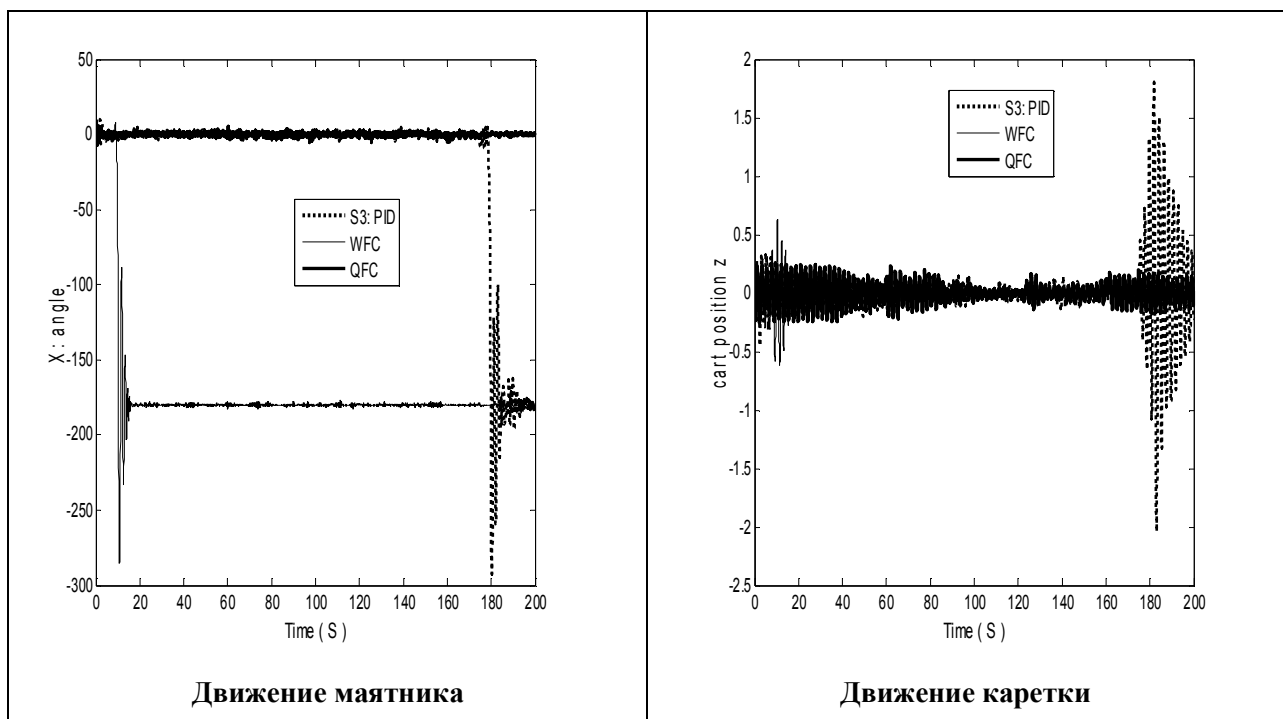


Рис. 30. Динамическое поведение системы «маятник-каретка» в ситуации S3

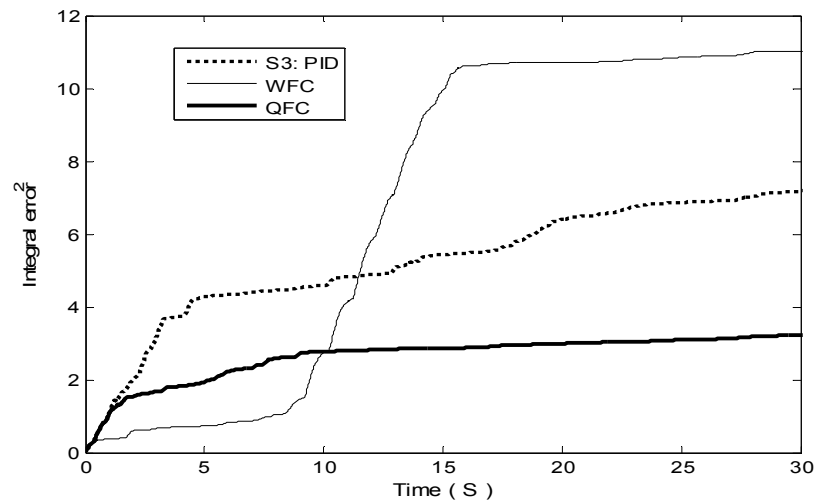


Рис. 31. Интегральная ошибка управления в ситуации S3  
Сравнение взвешенного нечеткого управления, ПИД и квантового нечеткого управления

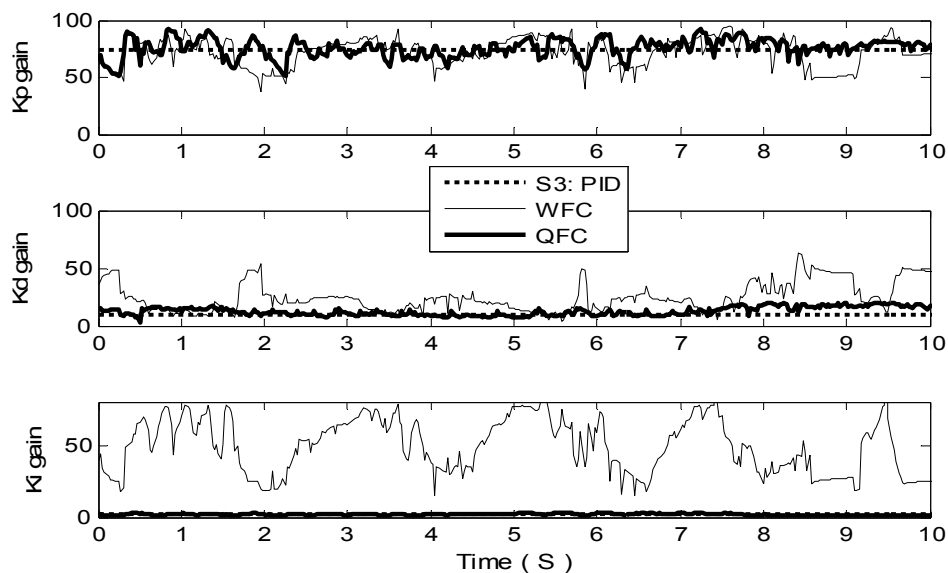


Рис. 32. Законы управления в ситуации S3  
Сравнение взвешенного нечеткого управления, ПИД и квантового нечеткого управления

Примечание: жирной линией показано движение в случае QFC управления, тонкой линией показано движение в случае WFC управления, пунктирной линией – движение в случае ПИД управления.

## Выводы

- В непредсказуемых ситуациях управления (в т.н. условиях риска) в случае сложных нелинейных неустойчивых динамических объектов управления традиционные в теории управления методы на основе ПИД-регуляторов, а также нечеткие регуляторы, спроектированные на типовые обучающие условия, и взвешенные нечеткие регуляторы (на их основе) не справляются с задачей управления.
- Квантовый нечеткий регулятор (КНР) демонстрирует высокий уровень качества управления и робастность во многих ситуациях управления, особенно в сложных непредсказуемых ситуациях управления.

- Рассмотренный пример иллюстрирует эффективность методологии применения квантовых вычислений для решения алгоритмически неразрешимых классических задач в теории и практике интеллектуального нечеткого управления.

## Заключение

В заключение отметим важные особенности алгоритма КНВ как квантового алгоритма (КА):

- Структурно КА управления самоорганизацией баз знаний нечетких регуляторов включает все (необходимые и достаточные) действия и операторы, характеризующие его как принадлежащего к классу поисковых КА.
- С точки зрения теории квантовых вычислений и алгоритмов, структура КА содержит ряд особенностей и действий:
  - 1) приготовление состояния квантовой суперпозиции;
  - 2) выбор типа квантовой корреляции (при этом определение (типа и вида) квантовой корреляции зависит от класса нелинейности ОУ);
  - 3) применение оператора квантового оракула (модель «черного ящика»);
  - 4) обмен частично извлеченной (скрытой) квантовой информацией между компонентами;
  - 5) использование квантовой корреляции как альтернативы классической корреляции, которая рассматривается в качестве дополнительного ресурса КА;
  - 6) привлечение эффекта квантовых массивных параллельных вычислений.
- В модели КА для КНВ реализуются следующие этапы:
  - 1) обрабатываются результаты нечеткого вывода каждого независимого индивидуального НР;
  - 2) выбирается тип квантовой корреляции;
  - 3) формируется суперпозиция для выбранной квантовой корреляции;
  - 4) извлекается ценная квантовая информация, скрытая в независимых индивидуальных БЗ (по принципу минимума энтропии в извлеченных квантовых знаниях – максимальной амплитуды вероятностей «интеллектуального состояния») на основе методов квантовой теории информации;
  - 5) в режиме реального времени проектируется обобщенный выходной робастный сигнал управления на множестве БЗ в виде реакций НР на новую ошибку управления;
  - 6) в этом случае выходной сигнал КНВ в режиме реального времени представляет оптимальный сигнал управления изменением коэффициентов усиления нечеткого ПИД-регулятора, который включает в себя необходимые (наилучшие) качественные характеристики выходных сигналов управления каждого из НР, реализуя тем самым *принцип самоорганизации*. Качественные особенности синергетического эффекта самоорганизации учитываются в выбранном типе и виде квантовой корреляции.
- 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).

Таким образом, рассмотрены основные идеи и программный инструментарий новой технологии проектирования робастных ИСУ на основе Оптимизатора Баз Знаний на квантовых вычислениях

## Список литературы

1. Ульянов С.В. Робастные интеллектуальные системы управления: Системный и структурный анализ // Нечеткие Системы и Мягкие Вычисления. – 2008. – № 2. – С. 15-31.
2. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматлит, 2000.

3. Ульянов С.В., Л.В. Литвинцева, В.Н. Добрынин, А.А. Мишин. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. – М.: ВНИИГеосистем, 2011.
4. Сорокин С.В., Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Технология мягких вычислений в проектировании робастных нечетких систем управления: Оптимизатор баз знаний // Нечеткие Системы и Мягкие Вычисления. – 2008. – Т. 3. – № 1.
5. Ульянов С.В., Нефедов Н.Ю. Эффективность и качество интеллектуального управления с применением квантового нечеткого вывода: Глобально неустойчивая динамическая система // Системный Анализ в Науке и Образовании: электрон. науч. журнал. – 2012. – №1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/23>.
6. Litvintseva L. V., Ulyanov I.S., Ulyanov S. V. and Ulyanov S. S. Quantum fuzzy inference for knowledge base design in robust intelligent controllers // J. of Computer and Systems Sciences Intern. – 2007. – Vol. 46. – № 6. – Pp. 908-961.