

# СИМУЛЯТОР РОБАСТНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ: ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАТОРА БАЗ ЗНАНИЙ НА КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ — QCOptKB™

*М. С. Катулин* \*, *С. В. Ульянов* \*\*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

На примере многозвенного робота-манипулятора показаны два способа реализации нечетких регуляторов: один регулятор для всех элементов управления и отдельный нечеткий регулятор на каждый элемент управления. Предложен способ устранения рассогласования работы отдельных независимых нечетких регуляторов. Описаны методы самоорганизации координационного управления на основе технологий квантовых вычислений для создания робастных интеллектуальных систем управления роботизированными манипуляторами с 3DOF и 7DOF. Продемонстрировано квантовое превосходство разработанной сквозной информационной технологии проектирования для моделирования робастных интеллектуальных систем управления.

Using the example of a multi-link robot manipulator, two ways of implementing fuzzy controllers were shown: one controller for all link controls and a separate fuzzy controller for each link control. A method is proposed to eliminate the mismatch of the operation of separate independent fuzzy controllers. The methods of self-organized coordination control based on quantum computing technologies for creating robust intelligent control systems for robotic manipulators with 3DOF and 7DOF are described. The quantum supremacy of the developed end-to-end IT design for modeling robust intelligent control systems is demonstrated.

PACS: 89.20.Ff; 07.05.Tp

## ВВЕДЕНИЕ

Принципиальной особенностью в построении многозвенных манипуляционных устройств является модульность, которая обеспечивает адаптивность и реконфигурируемость динамической структуры в соответствии с решаемой задачей.

---

\* E-mail: m.katulin@jinr.ru

\*\* E-mail: ulyanovsv@jinr.ru

Задачами управления в применении к избыточному роботу-манипулятору являются обеспечение заданной точности позиционирования устройства захвата манипулятора и определение пространственной конфигурации звеньев манипулятора (инвариантность обеспечивается избыточностью числа степеней свободы) с учетом непредвиденных факторов среды.

Построение интеллектуальной системы управления (ИСУ) роботом-манипулятором возможно с применением технологий мягких вычислений. В работах [1–3] рассмотрены возможности проектирования ИСУ роботом-манипулятором с тремя степенями свободы с единой базой знаний (БЗ), а также метод декомпозиции управления. Показано, что использование единой БЗ приводит к увеличению сложности и времени ее создания, повышению требований к вычислительным ресурсам процессора, на котором создаются правила БЗ, и объему памяти системы, в которой размещается БЗ. Декомпозиция управления — разделение единой БЗ на несколько независимых БЗ — значительно упрощает процесс проектирования ИСУ, делает ее более универсальной и снижает требования к вычислительным ресурсам. Однако в результате рассогласования работы разделенных независимых БЗ снижается качество управления.

В данной работе рассматривается метод организации координационного управления с применением технологий квантовых вычислений [4], позволяющий устранить отмеченный недостаток.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Система управления на основе технологий мягких вычислений с разделенным управлением, когда каждый нечеткий регулятор (НР) отвечает за управление одним звеном, спроектирована с помощью интеллектуального инструментария «оптимизатор баз знаний» (ОБЗ) [5] и представлена на рис. 1. Из этого рисунка видно, что задача интеллектуальной надстройки сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора  $K_{Pi}$ ,  $K_{Di}$ ,  $K_{Ii}$ ,  $i = 1, 2, 3$ , при которых обеспечивается желаемый характер движения. Однако в представленной структуре коэффициенты ПИД-регулятора для каждого звена определяются независимо друг от друга, вследствие чего возникает рассогласование управления.

Для организации координационного управления в ИСУ на основе мягких вычислений с разделенным управлением можно использовать извлечение скрытой информации о взаимосвязях разработанных ранее НР для трех звеньев манипулятора с БЗ, полученными для штатных ситуаций управления. Для этого в блок интеллектуальной надстройки необходимо включить обобщающее звено, например модель квантового нечеткого вывода (КНВ), основанную на физических законах теории квантовых вычислений [6, 7] и использующую четыре оператора: суперпозицию, квантовую корреляцию, интерференцию и измерение. Первые

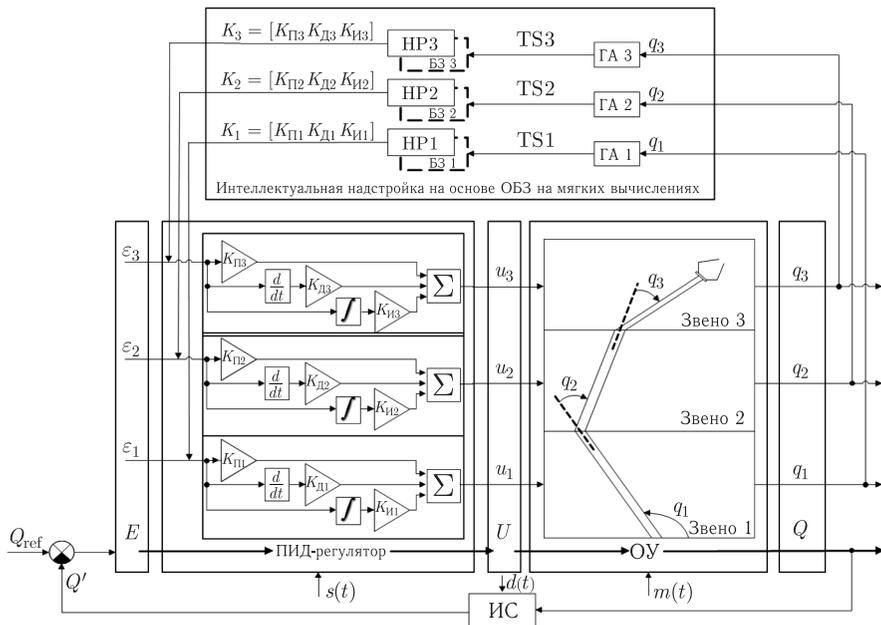


Рис. 1. ИСУ на основе ОБЗ на мягких вычислениях:  $Q_{ref}$  — воздействующий (задающий) сигнал;  $Q'$  — измеренная регулируемая величина;  $E = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3]$  — ошибка управления (позиционирования трех звеньев);  $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = 1, 2, 3$ , — пропорциональные, дифференциальные и интегральные коэффициенты ПИД-регулятора;  $i$  — номер соответствующего звена робота-манипулятора;  $s(t)$  — ограничение управляющего воздействия;  $U = [u_1, u_2, u_3]$  — управляющее воздействие;  $d(t)$  — задержка в источнике сигнала (ИС);  $TS_i, i = 1, 2, 3$ , — обучающий сигнал соответствующего НР;  $Q = [q_1, q_2, q_3]$  — регулируемая величина, задающая положение соответствующего звена;  $m(t)$  — внешнее воздействие среды

три являются унитарными, обратимыми квантовыми операторами, а четвертый (оператор измерения) — классическим (необратимым).

На компьютерном симуляторе MatLab/Simulink была смоделирована ситуация, когда в процессе работы манипулятора на него было оказано внешнее воздействие. На рис. 2 приведены траектории движения манипулятора с тремя степенями свободы под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции.

Из результатов моделирования видно, что НР, отвечающий за управление вторым звеном, не смог за отведенное время работы «реабилитироваться» после мощного внешнего воздействия, в результате ошибка позиционирования второго звена составила более  $50^\circ$ .

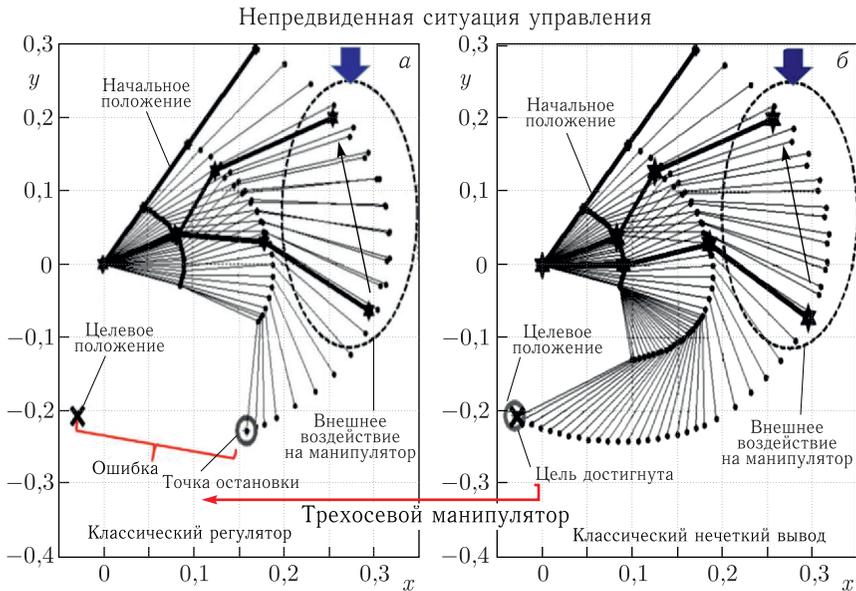


Рис. 2. Поведение манипулятора с тремя степенями свободы в непредвиденной ситуации: а) под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением; б) под управлением ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции

На рис. 3 показана динамика изменения коэффициентов ПИД-регулятора на входе (а) и выходе (б) КНВ для рассматриваемой нештатной ситуации на примере  $K_{П1}$ .

Непредвиденные ситуации управления (изменение начальных условий, принудительное смещение звеньев) относятся к внешним непредвиденным ситуациям управления. Однако помимо внешних возмущений возможны изменения во внутренней конфигурации объекта и системы управления (см. рис. 1), связанные с неполнотой начального описания, помехами в управляющих каналах, неточностью и инерционностью измерительной системы и т. д. После внесения в модель систем управления дополнительных случайных изменений параметров объекта управления во времени были сформированы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычисле-

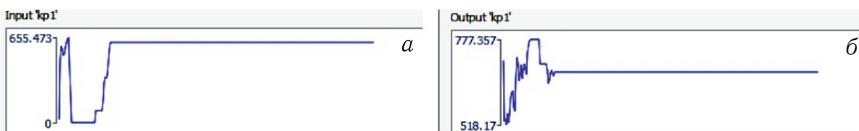


Рис. 3. Изменения коэффициентов ПИД-регулятора на входе (а) и выходе (б) КНВ

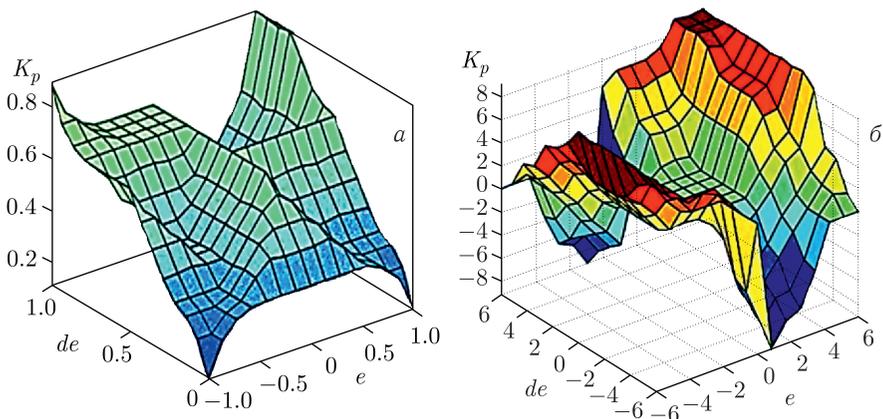


Рис. 4. Нечеткая поверхность продукционных правил БЗ параметров  $K_p$  гибридного нечеткого ПИД-регулятора для второго звена до (а) и после (б) воздействия

ниях с применением пространственной корреляции и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением. Важно отметить, что в законах управления, сформированных для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, присутствуют участки локально неустойчивых состояний, поэтому такая ИСУ далее не рассматривается.

С точки зрения качества формирования законов управления наилучшими свойствами обладает ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции, так как обладает минимальным расходом полезного ресурса при формировании управляющих сигналов. Нечеткие поверхности продукционных правил БЗ параметров  $K_p$  гибридного нечеткого ПИД-регулятора для второго звена (например, до и после воздействия) представлены на рис. 4.

При организации координационного управления за счет одного общего НР на БЗ на мягких вычислениях количество входных переменных ограничено вычислительными ресурсами процессора, на котором создана БЗ НР, и объемом памяти в системе, в которой находится НР. Более того, для сложных систем, таких как робот-манипулятор с 7DOF, организация одной БЗ НР невозможна.

## ВЫВОДЫ

В целом возможность декомпозиции управления (разделения одной БЗ на несколько одинаковых независимых БЗ) и организации координационного управления путем введения квантового нечеткого факторного звена значительно увеличивает возможное количество входных переменных и тем самым расширяет возможности учета параметров системы и объекта управления.

Представлены разработки нескольких высокотехнологичных направлений робототехники, которые представляют практический научно-технический интерес как в отдельных, так и в совместных разработках. Данные разработки могут найти успешное применение при использовании когнитивных интерфейсов человек–машина.

Следующим этапом разработки является создание когнитивной ИСУ роботизированной рукой-протезом для технического обслуживания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Литвинцева Л. В., Тятюшкина О. Ю., Ульянов С. В.* Технологии интеллектуальных вычислений. Ч. 1. Мягкие и дробные вычисления: Учеб.-метод. пособие. М.: КУРС, 2020.
2. *Николаева А. В., Ульянов С. В.* Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором. Ч. 2: Декомпозиция управления и физический эксперимент на основе технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: Сетевое науч. изд. 2013. № 1; <http://sanse.ru/index.php/sanse/archive/view/159>.
3. *Николаева А. В., Петров С. П., Ульянов С. В.* Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором. Ч. 1: Технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: Электрон. науч. журн. 2012. № 3; <http://sanse.ru/archive/25.-0421200111/0021>.
4. *Николаева А. В., Ульянов С. В.* Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором. Ч. 2: Декомпозиция управления и физический эксперимент на основе технологии квантовых вычислений // Программные продукты и системы. 2017. № 1.
5. Soft Computing Optimizer of Intelligent Control System Structures. US Patent, US 7,219,087 B2 / Ulyanov S. V. May 15, 2007.
6. *Nielsen M. A., Chang I. L.* Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge Univ. Press, UK, 2000.
7. *Marinescu D. C., Marinescu G. M.* Approaching Quantum Computing. Pearson Prentice Hall, USA, 2006.