

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗВЕНОМ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

К.А. Голдинова

spaydervic@yandex.rucom

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*Нечеткая логика как прикладная наука имеет богатый спектр приложений и дает возможность решать широкий класс задач, связанных с управлением. В области управления техническими системами нечеткое моделирование позволяет получать более адекватные результаты по сравнению с основанными на использовании традиционных алгоритмов управления. Предложен способ проектирования системы на базе нечеткой логики для управления локтевым звеном робота-манипулятора. Приведены преимущества метода, его основные положения и конкретный пример применения. Для оценки результативности метода показаны результаты моделирования робота-манипулятора в библиотеке SimMechanics до и после введения нечеткого регулятора.*

### Ключевые слова

*Моделирование, нечеткая логика, привод, правила, регулятор, система управления, робот-манипулятор, фазсификация*

Поступила в редакцию 06.07.2017

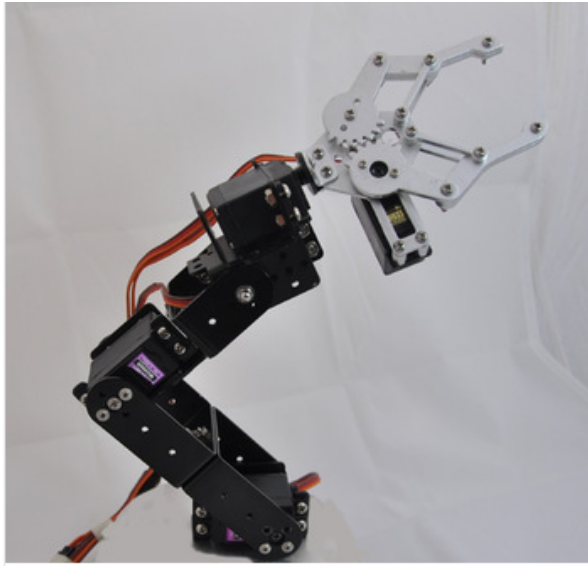
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

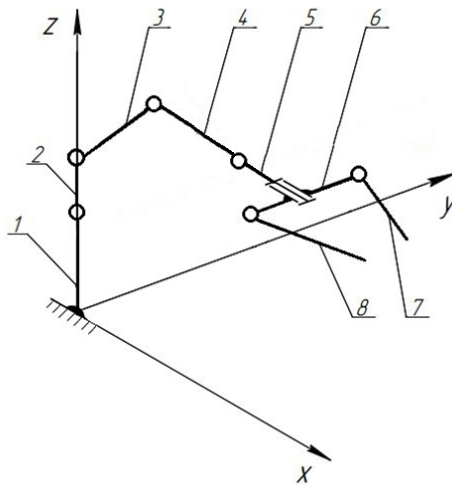
В теории управления большое внимание уделяется синтезу систем управления при недостаточной информации об объекте управления и действующих на него полезных сигналах и помехах [1]. С одной стороны, традиционные методы построения моделей не приводят к удовлетворительным результатам, когда исходное описание подлежащей решению проблемы заведомо является неточным или неполным. С другой стороны, стремление получить исчерпывающую информацию для создания точной математической модели сложной реальной ситуации способно привести к потере времени и средств, поскольку это в принципе невозможно. В подобных ситуациях наиболее целесообразно использовать такие методы, которые специально ориентированы на создание моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных.

**Анализ исходной системы.** На рис. 1 показан внешний вид и кинематическая схема робота-манипулятора (РМ), для локтевого звена которого разрабатывается система управления.

В качестве объекта управления выступает электрический сервопривод на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Для анализа исходной системы проведем математическое моделирование сервопривода в программе MATLAB с помощью пакета Simulink (рис. 2).



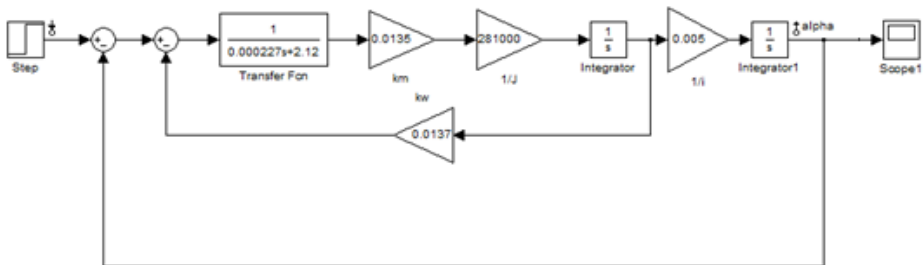
а



б

**Рис. 1.** Внешний вид (а) и кинематическая схема (б) РМ:

1-5 — звенья, соединенные между собой шарнирами; б — основание захвата; 7, 8 — губки захвата



**Рис. 2.** Структурная схема сервопривода

По полученной кривой (рис. 3) делаем вывод, что без применения нечеткой логики (НЛ) время переходного процесса составило 8,1 с. Очевидно, это слишком большое значение времени для перевода звена РМ в нужное состояние. Поставим задачу снижения времени переходного процесса.

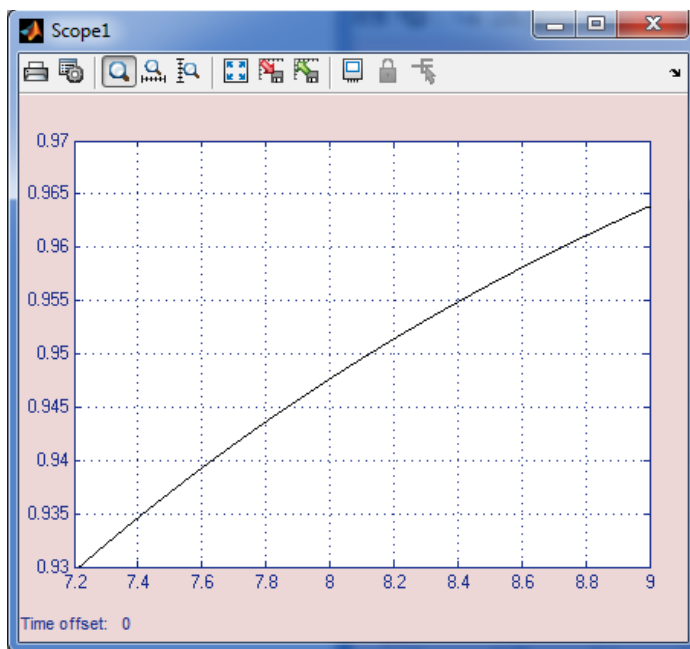
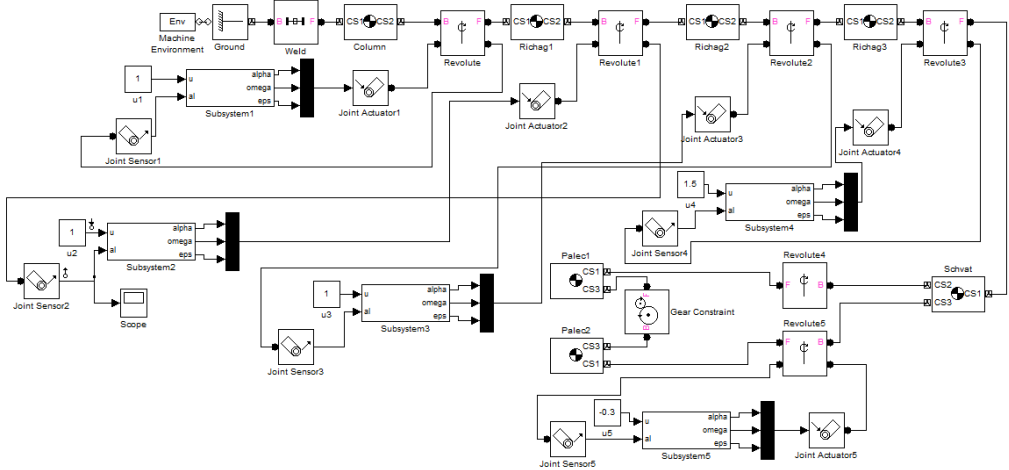


Рис. 3. Кривая переходного процесса

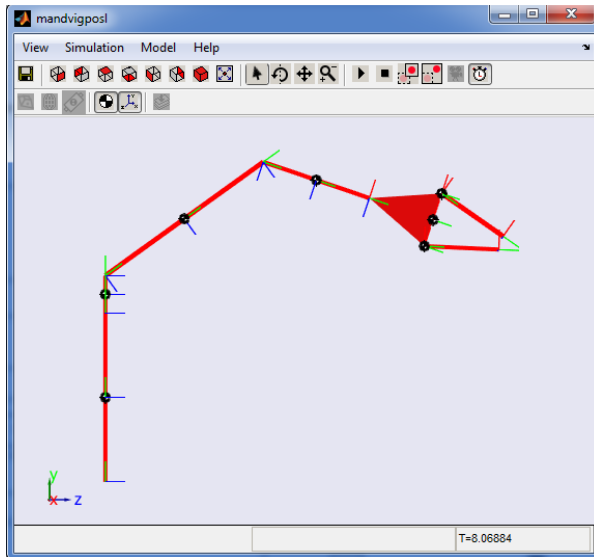
#### Моделирование РМ с захватным механизмом в библиотеке SimMechanics.

Для исследования кинематики и динамики РМ эффективно применить моделирование с помощью библиотеки SimMechanics пакета Simulink среды MATLAB, предназначенной для моделирования пространственных движений твердотельных машин и механизмов на стадии инженерного проектирования.

Система имеет пять степеней свободы, поэтому для ее управления необходимо пять приводов. Каждый привод реализован в блоке Subsystem. Блоки Revolute показывают шарнирное соединение звеньев. Первое звено жестко соединено с основанием, что реализовано с помощью блока Weld. Связка блоков Machine Environment и Ground задает гравитационные силы, приложенные к центру координат и их ориентацию в заданной системе отсчета. В блоках Column, Richag, Schvat, Pales полностью определены физические параметры звеньев: масса, тензор инерции, геометрический центр масс, длина, объем элемента, положение координатных систем и ориентация их относительно друг друга. Для одновременного движения губок захвата РМ они соединены зубчатой передачей (блок Gear Constraint), поэтому при приведении в движение одной губки другая перемещается зеркально ей под тем же углом. На рис. 4, а приведена модель SimMechanics РМ с захватом, а на рис. 4, б — результаты моделирования, которые показали, что РМ достиг заданного положения примерно за 8 с.



а



б

Рис. 4. Модель (а) и результаты моделирования (б) РМ с захватом

**Использование НЛ в задачах управления.** Для улучшения характеристик процесса управления локтевым звеном РМ применим НЛ. Говоря о НЛ, чаще всего имеют в виду системы нечеткого вывода (СНВ), которые широко применяют для управления техническими устройствами и процессами. В этом случае построение нечеткой модели базируется на формальном представлении характеристик исследуемой системы в терминах лингвистических переменных [2].

В общем случае цель управления заключается в том, чтобы на основе анализа текущего состояния объекта управления определить значения управляющих переменных, реализация которых позволяет обеспечить желаемое поведение или состояние объекта управления. Базовая архитектура или модель классической теории управления основана на представлении объекта и процесса управ-

ления в форме некоторых систем (рис. 5). На вход системы управления поступают входные переменные, которые формируются с помощью конечного множества датчиков. На ее выходе с использованием некоторого алгоритма управления создается множество значений выходных переменных, которые поступают на вход объекта управления и, комбинируясь со значениями его входных параметров с помощью сумматора (блок  $\Sigma$ ), реализующего обратную связь, изменяют его поведение в желаемом направлении [3].

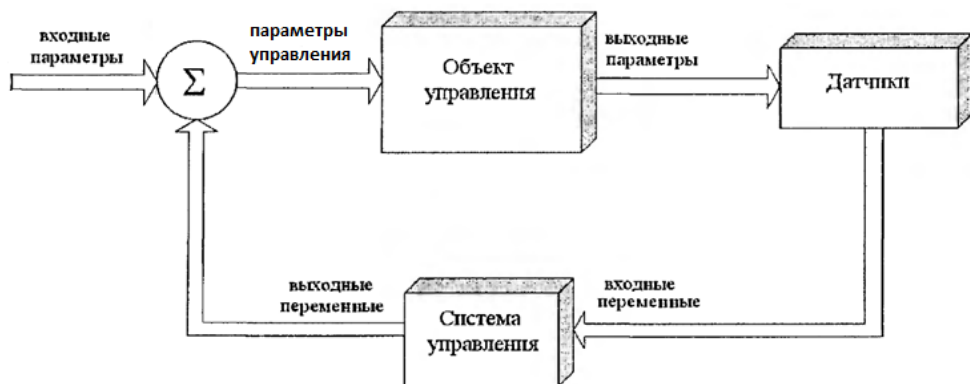


Рис. 5. Архитектура компонентов процесса управления с обратной связью

Наиболее типичным примером рассмотренной модели управления является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) контроллер. Алгоритм его управления основан на сравнении выходных параметров объекта управления с некоторыми заданными параметрами и определении значения расхождения между ними. После этого рассчитываются выходные переменные в форме аддитивной суммы этой ошибки, значения интеграла и производной по времени в течение некоторого промежутка времени.

Один из недостатков ПИД-контроллера заключается в предположении о линейном характере зависимости входных и выходных переменных процесса управления, что существенно снижает адекватность этой модели. Другой недостаток модели связан со сложностью выполнения соответствующих расчетов, что может привести к недопустимым задержкам в реализации управляющих воздействий при оперативном управлении объектами с высокой динамикой изменения выходных параметров.

Архитектура нечеткого управления основана на замене классической системы управления системой нечеткого управления, в качестве которой используют СНВ (рис. 6).

**Этапы построения нечеткой модели.** Разработка и применение СНВ включает в себя несколько этапов. Информация, поступающая на вход СНВ, — это измеренные некоторым образом входные переменные, соответствующие реальным переменным процесса управления. Данные, формируемые на выходе СНВ, соответствуют выходным переменным, которыми являются управляющие переменные процесса управления [4].



Рис. 6. Архитектура компонентов нечеткого управления

СНВ предназначены для преобразования значений входных переменных процесса управления в выходные с помощью нечетких правил продукций. Для этого СНВ должны содержать базу правил нечетких продукций и реализовывать нечеткий вывод заключений на основе посылок или условий, представленных в форме лингвистических высказываний.

Таким образом, основными этапами нечеткого вывода являются [5]:

- формирование базы правил СНВ;
- фаззификация входных переменных;
- агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций;
- активизация или композиция подзаключений в нечетких правилах продукций;
- аккумулярование заключений нечетких правил продукций.

Далее рассмотрим построение системы нечеткого управления с целью решения задачи управления звеном РМ.

**Применение НЛ для управления локтевым звеном РМ.** Суть задачи состоит в том, чтобы разработать модель, обеспечивающую высокую скорость в начале движения, когда двигатель только разгоняется, а ошибка еще велика, и когда она снизится, получить плавный подход звена к заданному положению.

Разработку нечеткой модели (назовем ее Mani2) выполним с использованием графических средств системы MATLAB. Управлять будем с помощью двух переменных (входных лингвистических переменных) «Скорость» и «Ошибка», которые определим в редакторе FIS. На выходе будем получать значение коэффициента (выходную лингвистическую переменную), на которое будет умножаться управляющее напряжение, поэтому зададим одну выходную переменную с именем «Коэффициент». Вид графического интерфейса редактора FIS для этих переменных изображен на рис. 7.

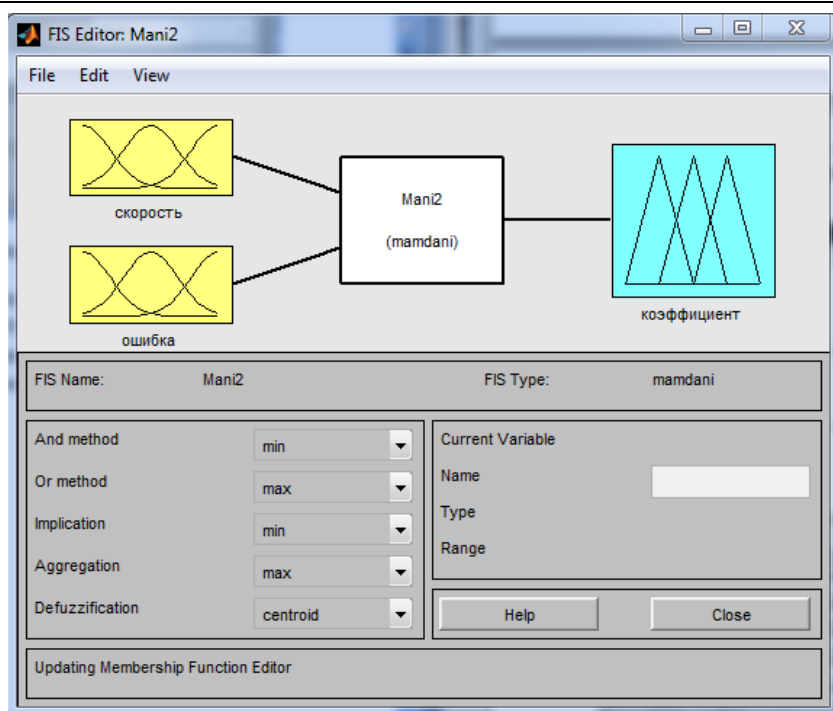
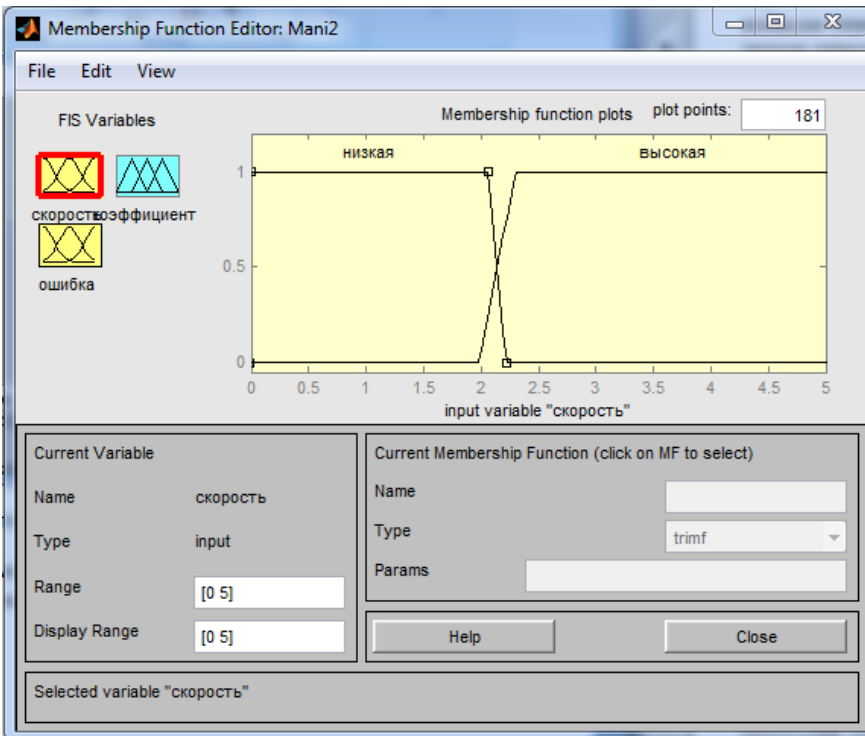


Рис. 7. Графический интерфейс редактора FIS после определения входных и выходных переменных для СНВ Mani2

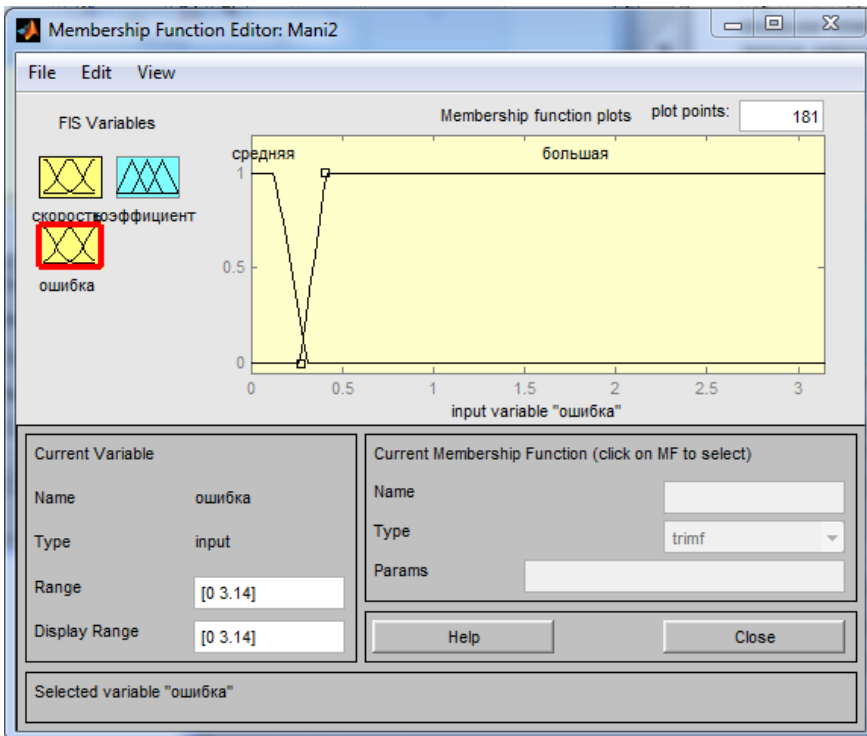
Оставим без изменения тип СНВ, предложенный системой MATLAB по умолчанию, так как будем использовать СНВ типа Мамдани. Нет необходимости изменять и другие параметры разрабатываемой нечеткой модели, заданные по умолчанию, такие как логические операции ( $\min$  — для нечеткого логического И,  $\max$  — для нечеткого логического ИЛИ), методы импликации ( $\min$ ), агрегирования ( $\max$ ) и метода дефаззификации ( $\text{centroid}$ ) [6].

*Фаззификация переменных.* В контексте НЛ под фаззификацией понимают не только отдельный этап выполнения нечеткого вывода, но и собственно процесс или процедуру нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе исходных данных. Цель этапа фаззификации — установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной СНВ и значением функции принадлежности соответствующего ей термина входной лингвистической переменной.

Определим функции принадлежности термов для каждой из переменных СНВ в редакторе функций принадлежности. Это наиболее трудоемкий процесс, в наибольшей степени определяющий качество управления системой [7]. Для терм-множеств переменных будем использовать следующие множества: «Скорость» — {«низкая», «высокая»}, «Ошибка» — {«средняя», «большая»}, «Коэффициент» — {«оставляем», «усиливаем»}. На рис. 8, а показан вид графического интерфейса редактора после задания первой входной переменной, на рис. 8, б — второй входной переменной, рис. 8, в — выходной переменной.



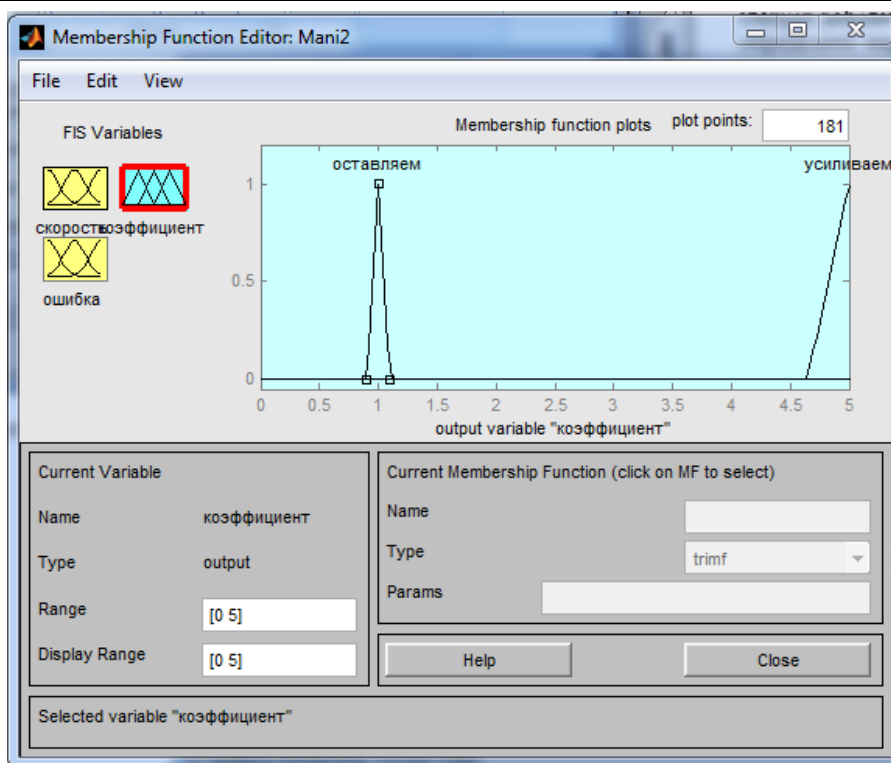
а



б

Рис. 8. Графики функций принадлежности термов «Скорость» (а), «Ошибка» (б)





в

Рис. 8. Графики функций принадлежности термов «Коэффициент» (в)

*Формирование базы правил.* Зададим правила для разрабатываемой СНВ в редакторе правил. База правил — это конечное множество правил нечетких продукций, согласованных относительно используемых в них лингвистических переменных. Наиболее часто база правил представляется в форме структурированного текста:

ПРАВИЛО\_1: ЕСЛИ «Условие\_1», ТО «Заключение\_1»  
 ПРАВИЛО\_2: ЕСЛИ «Условие\_2», ТО «Заключение\_2»  
 ...  
 ПРАВИЛО\_n: ЕСЛИ «Условие\_n», ТО «Заключение\_n».

В случае управления двигателем СНВ будет содержать три правила нечетких продукций. Первое соответствует моменту, когда двигатель практически достиг заданного положения, и ошибка мала, в этом случае значение напряжения не изменяем. Во втором правиле учитывается характер начального движения: двигатель набирает скорость, ошибка между реальным и нужным положением велика, тогда необходимо усилить напряжение для ускорения процесса разгона двигателя. Третье правило написано для момента, когда двигатель уже разогнался до номинальной скорости, но ошибка еще велика. В этом случае дальнейшее усиление напряжения не нужно, иначе двигатель не успеет затормозить при подходе к заданному положению и пройдет мимо него; есть вероят-

ность возникновения колебаний. Вид графического интерфейса редактора после задания всех трех правил нечеткого вывода приведен на рис. 9.

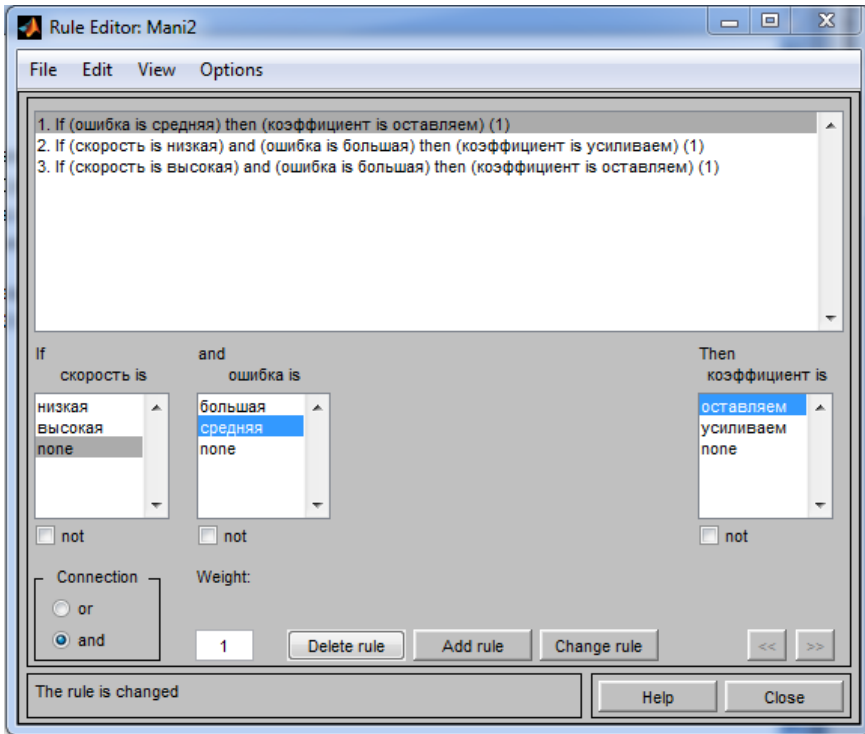


Рис. 9. Правила для СНВ

Теперь можно выполнить оценку построенной СНВ для задачи автоматического управления локтевым звеном РМ с помощью программы просмотра правил. Введем значения входных переменных для частного случая, соответствующего начальному моменту времени, когда скорость движения равна 0, а ошибка — значению угла (1 рад), на который звено должно повернуться. Процедура нечеткого вывода, выполненная для разработанной нечеткой модели, выдает значение выходной переменной «Коэффициент», равное 4,9 (рис. 10).

Это значение соответствует усилению напряжения, поступающего на вход системы управления, почти в 5 раз.

Процесс анализа и исследования построенной нечеткой модели включает в себя выполнение нечетких выводов для различных значений входных переменных и оценки полученных данных в целях установления адекватности модели и внесения в нее необходимых изменений в случае несогласованности отдельных результатов. Проверка нечеткой модели для других значений входных переменных, например, 2,5 рад/с и 0,01 рад приводит к результату 1, что также подтверждает ее адекватность.

Кроме того, для общего анализа разработанной нечеткой модели полезна визуализация соответствующей поверхности нечеткого вывода (рис. 11).

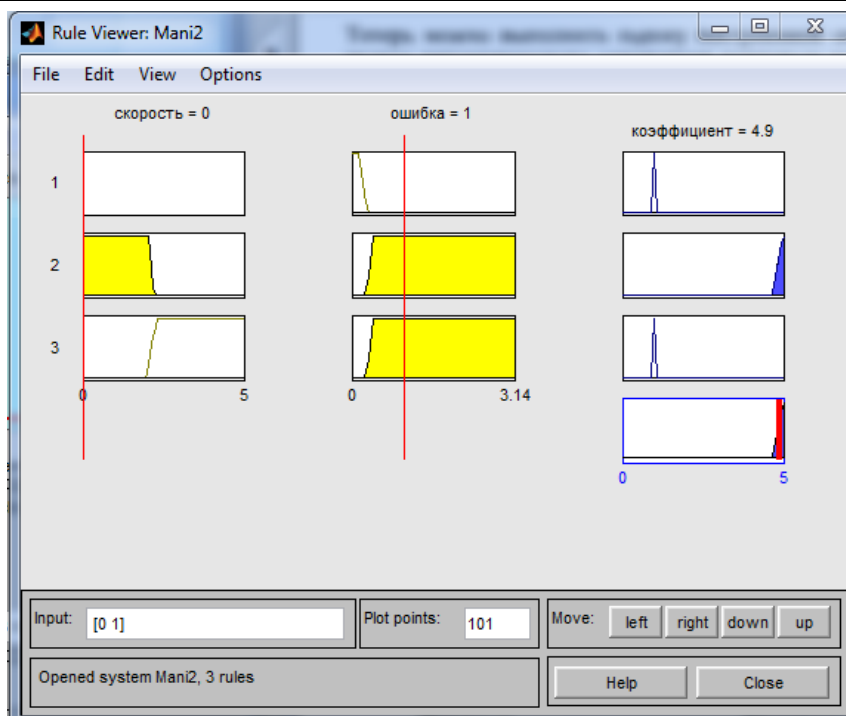


Рис. 10. Графический интерфейс программы просмотра правил после выполнения процедуры нечеткого вывода для значений входных переменных [0 1]

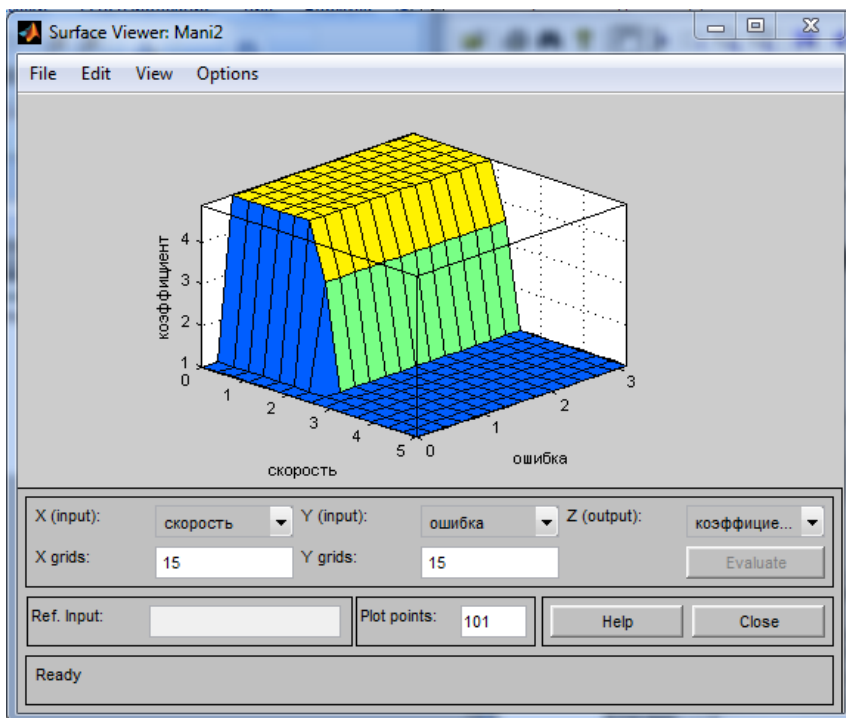


Рис. 11. Визуализация поверхности нечеткого вывода для СНВ Mani2

Поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели системы управления звеном РМ и может послужить основой для программирования микроконтроллера. В дополнение к этому установление такой зависимости является, по сути, решением задачи, известной в классической теории управления как задача синтеза управляющих воздействий. При этом для решения данной задачи были использованы средства НЛ и теории нечетких множеств.

Применим полученную систему на базе НЛ к ранее созданной модели РМ и проанализируем улучшение движения после внесенных изменений. Для этого воспользуемся блоком Fuzzy Logic Controller пакета Fuzzy Logic Toolbox. [8] Модель, расширенная блоками для введения системы НЛ, представлена на рис. 12, а показаны осциллографы — на рис. 13.

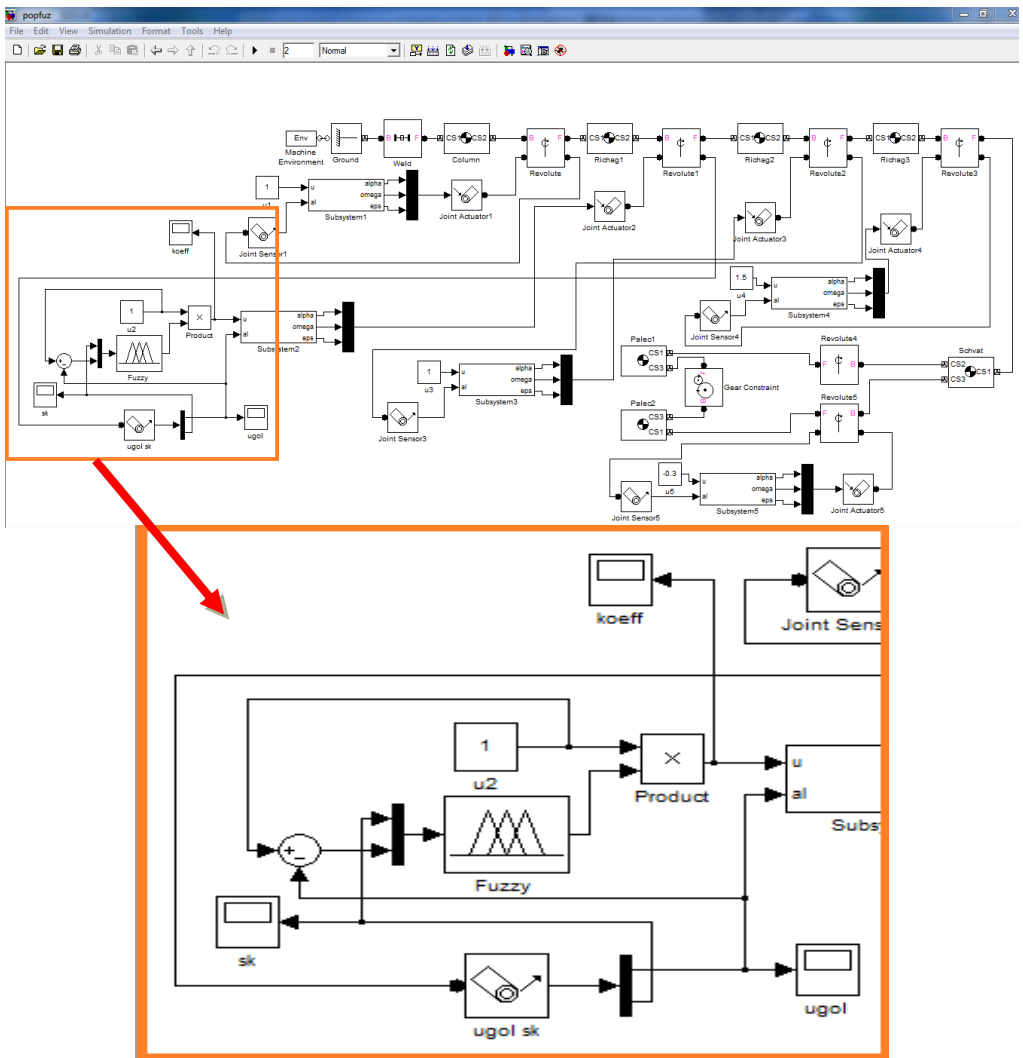
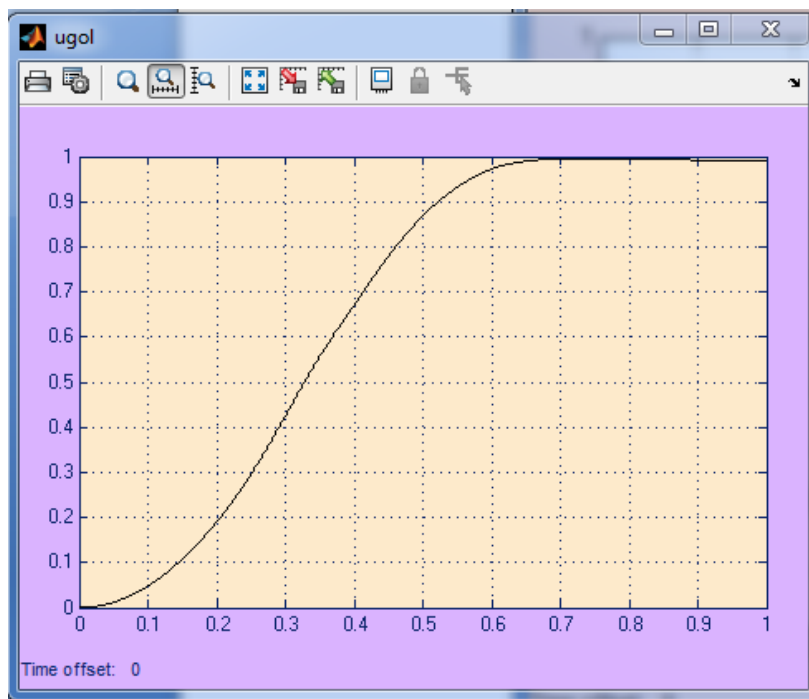
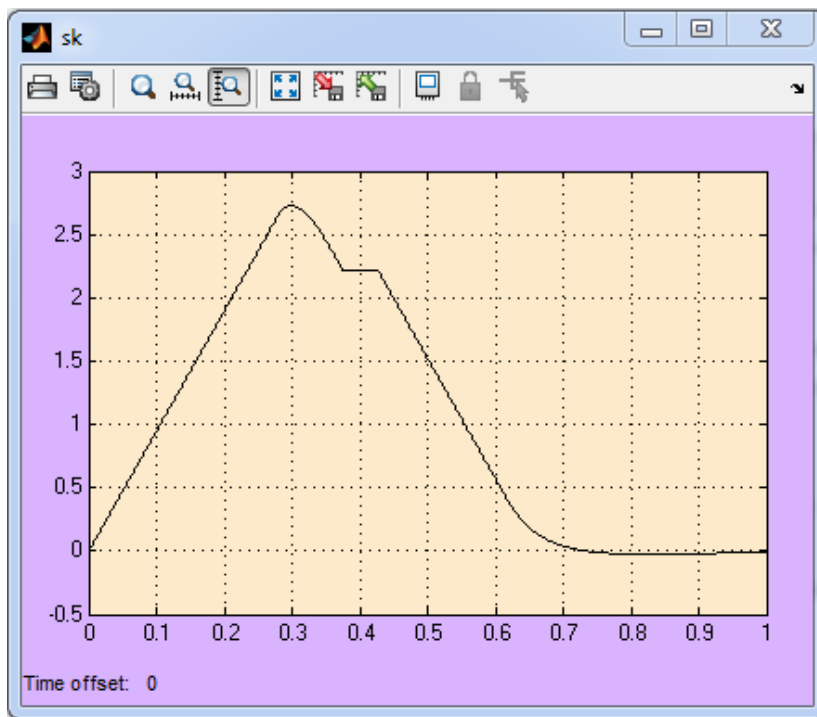


Рис. 12. Модель SimMechanics РМ с применением элементов НЛ

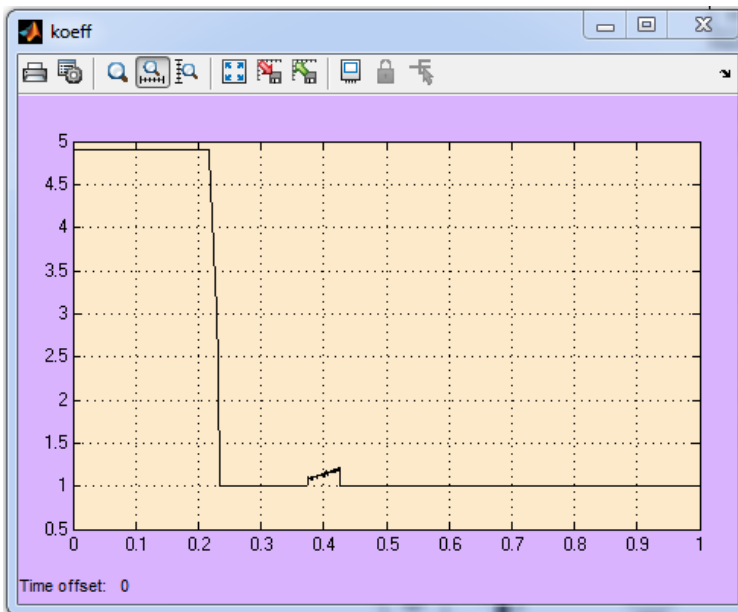


*a*



*б*

**Рис. 13.** Изменение углового положения (*a*), скорости (*б*) локтевого звена РМ и управляющего напряжения в процессе его движения (*в*) после применения НЛ



6

Рис. 13. Изменение углового положения (а), скорости (б) локтевого звена РМ и управляющего напряжения в процессе его движения (в) после применения НЛ

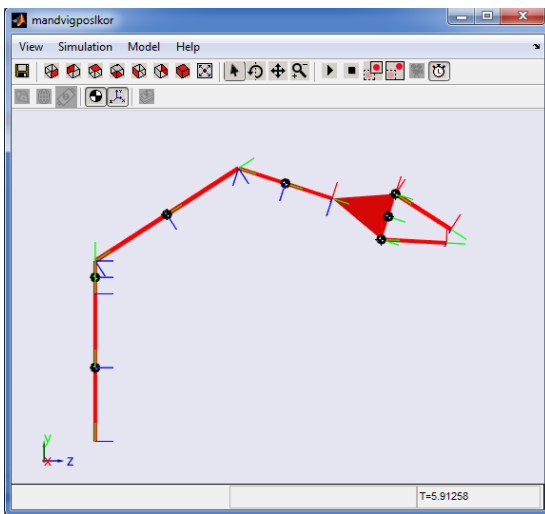


Рис. 14. Результаты моделирования РМ с захватом после введения НЛ

Время переходного процесса в этом случае составило 0,57 с, т. е. меньше, чем время без применения НЛ (8 с). Можно сделать вывод о том, что введение блоков, отвечающих за реализацию НЛ, ускорило перемещение звена на начальном этапе движения, что благоприятно повлияло на динамические характеристики РМ.

Проведем визуализацию движения РМ после введения в систему блоков НЛ. Результаты моделирования (рис. 14) показывают, что после введения дополнительных блоков в систему

управления время, за которое РМ достиг необходимого положения, снизилось до 6 с, т. е. теперь оно определяется характеристиками нескорректированных звеньев.

**Выводы.** Проведен анализ исходной системы и поставлена задача снижения времени переходного процесса. Введение в систему элементов НЛ позволило уменьшить это время с 8,1 до 0,57 с.

С помощью библиотеки SimMechanics пакета MATLAB выполнено математическое моделирование РМ.

Выявлено, что введение нечеткого регулятора в локтевом звене также обеспечивает снижение времени, за которое РМ достигает требуемого положения, т. е. улучшает динамику его работы в целом. Таким образом, применение НЛ дает возможность качественно изменить процесс управления и сделать его более адаптивным.

## Литература

- [1] Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений. Москва, Мир, 1976, 165 с.
- [2] Кудинов Ю.И. Нечеткие системы управления. Известия Академии наук. Техническая кибернетика, 1990, № 5, с. 196–206.
- [3] Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. Москва, Физматлит, 2001, 576 с.
- [4] Асаи К., Ватада Д., Иваи С. Прикладные нечёткие системы. Москва, Мир, 1993, 368 с.
- [5] Бошляков А.А., Рубцов В.И. Проектирование нечеткого регулятора следящей системы. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 8.  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/936.html>.
- [6] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2005, 736 с.
- [7] Захаров В.И., Ульянов В.С. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления: научно-организационные, технико-экономические и прикладные аспекты. Известия Академии наук. Техническая кибернетика, 1992, № 5, с. 171–196.
- [8] MATLAB. URL: <http://matlab.ru/> (дата обращения 28.06.2017).

**Голдинова Кристина Алексеевна** — студентка кафедры «Робототехнические системы и мехатроника». МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — В.И. Рубцов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника». МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## DESIGNING A CONTROLLER ON THE BASIS OF A FUZZY OUTPUT SYSTEM FOR GUIDING A LINK OF A ROBOTIC MANIPULATOR ARM

K.A. Goldinova

spaydervic@yandex.rucom

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

As an applied science, fuzzy logic boasts a wide range of applications and helps to solve a large number of control-related problems. In control engineering, fuzzy simulation makes it possible to obtain more relevant results as compared to those based on traditional control algorithms. We suggest a way to design a control system for the elbow joint of a robotic arm, based on fuzzy logic. We list the advantages of this method, its fundamentals and a specific application example. In order to assess the performance of the method, we present the results of simulating a robotic arm in the SimMechanics library before and after introducing a fuzzy controller.

### Keywords

Simulation, fuzzy logic, drive, rules, controller, control system, robotic manipulator arm, fuzzification

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

### References

- [1] Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning Elsevier, 1973. (Russ. ed.: Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye dlya prinyatiya priblizhennykh resheniy. Moscow, Mir publ., 1976, 165 p.).
- [2] Kudinov Yu.I. Fuzzy control systems. *Izvestiya Akademii nauk. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1990, no. 5, pp. 196–206.
- [3] Lokhin V.M. *Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Intelligence systems of automatic control]. Moscow, Fizmatlit publ., 2001, 576 p.
- [4] Asai K., Vatada D., Ivai p. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Fuzzy application systems]. Moscow, Mir publ., 1993, 368 p.
- [5] Boshlyakov A.A., Rubtsov V.I. Synthesis of fuzzy regulator for servo drive. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/936.html>.
- [6] Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy programming in MATLAB and fuzzyTECH]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg publ., 2005, 736 p.
- [7] Zakharov V.I., Ul'yanov V.S. Fuzzy models of intelligent industrial regulators and control systems: research organization, engineering economics, and application aspects. *Izvestiya Akademii nauk. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1992, no. 5, pp. 171–196.
- [8] MATLAB. Available at: <http://matlab.ru/> (accessed 28 June 2017).

**Goldinova K.A.** — student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — V.I. Rubtsov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.