

На правах рукописи

**Рогачев Николай Геннадьевич**

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В  
НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С  
НЕЧЕТКИМИ ЦЕЛЕВЫМИ ФУНКЦИЯМИ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Самара – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

**Научный руководитель**

**Рапопорт Эдгар Яковлевич,**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

**Официальные  
оппоненты:**

**Душин Сергей Евгеньевич,**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и процессов управления ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Французова Галина Александровна,**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Автоматики (АВТ) ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

**Ведущая организация –**

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

Защита состоится 14 декабря 2021 года в 12-30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://d21221703.samgtu.ru/> Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Первомайская, д. 18.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02; тел. (846) 337-04-43, e-mail: [zoteev-ve@mail.ru](mailto:zoteev-ve@mail.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Зотеев В.Е.

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

Диссертационная работа посвящена разработке методов синтеза оптимальных регуляторов с нечеткими целевыми функциями и способов их применения в многокритериальных задачах векторного управления нелинейными многомерными техническими объектами. Методам решения задач векторной (многокритериальной) оптимизации посвящено значительное число исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Исследованиями в области многокритериальной оптимизации занимались следующие отечественные авторы: Вилкас Э. Й., Гафт М. Г., Гермейер Ю. Б., Емельянов С. М., Жуковин В. Е., Краснекер А. С., Машунин Ю.К., Пиявский С.А., Полтавский А.В., Подиновский В. В., Поспелова И. И., Соболь И. М., Статников Р. Б., Хоменюк В. В. и многие другие. Большой вклад внесли зарубежные исследователи Дж. фон Нейман, Р. Беллман, Л. Заде, Т. Купмэнс, Х. Кун, А. Такер, А. Чарнс, С. Карлин, У. Купер, Б. Ройя, Т. Саати и другие.

Интерес к задачам векторного управления нелинейными многомерными техническими объектами связан с практической важностью применения современных сложных технических систем в промышленности, транспорте, связи и других областях. Одним из основных способов повышения надежности и эффективности функционирования сложных технических систем является учет при формировании алгоритмов управления в режиме реального времени всего комплекса, как правило, конфликтующих друг с другом критериев качества, действующих ограничений и возмущений. Анализ известных результатов свидетельствует о таких нерешенных проблемах в этой области, как несовершенство методик определения законов управления, оптимальных по совокупности качественных оценок работы системы, отсутствие явных аналитических зависимостей для определения в реальном времени алгоритмов управления при необходимости учета всей совокупности указанных факторов, существенно влияющих на качество работы технических объектов.

Наряду с многокритериальностью при вычислении законов управления необходим учет того факта, что одни цели и ограничения могут вступать в противоречие с другими. Требования к управляемым процессам на этапе постановки задачи могут быть представлены на естественном языке, описываться вербально, сформулированы нечетко. Для многооперационных процессов необходим учет требований к последовательности осуществления отдельных операций. Такие задачи управления не могут быть решены классическими методами из-за сложности математических моделей, описывающих объекты управления, неполноты информации о них, однако успешно решаются средствами нечеткой логики.

Таким образом, многокритериальная нечеткая оптимизация режимов работы многомерных многооперационных технических объектов в промышленных приложениях является актуальной задачей, решение которой позволяет повысить надежность и эффективность работы производственных систем и рационально расходовать ресурсы.

**Целью диссертационной работы** является разработка метода синтеза оптимальных регуляторов с нечеткими целевыми функциями и техники его применения в непрерывно-дискретных системах управления многомерными техниче-

скими объектами. Для достижения указанной цели в диссертации поставлены следующие **основные научные задачи**:

- системный анализ многооперационных многомерных нелинейных объектов управления (ОУ), выявление структуры, пространств параметров и состояний таких ОУ;
- разработка имитационных моделей гибридных непрерывно-дискретных систем управления с непрерывной частью в виде многооперационных нелинейных многомерных ОУ и дискретной частью, представленной цифровыми регуляторами;
- постановка задачи многокритериального нечетко-оптимального синтеза компьютерных систем управления многооперационными непрерывно-дискретными техническими объектами, учитывающая объективно существующие требования и условия;
- разработка методики редукции задачи нечетко-оптимального синтеза системы управления многооперационными ОУ к задаче определения набора продукционных правил ее работы;
- разработка методики и вычислительной технологии решения задачи параметрического синтеза многокритериальных нечетко-оптимальных законов управления;
- решение задач синтеза нечетко-оптимальных законов управления техническими объектами, в том числе в меняющихся условиях и при наличии ограничений на время принятия управленческих решений, исследование эффективности разработанных алгоритмов.

**Объект исследования:** процессы нечетко-оптимального управления многомерными многооперационными техническими объектами.

**Предмет исследования:** алгоритмы работы и цифровые модели систем нечетко-оптимального управления многомерными многооперационными техническими объектами

**Методы исследования.** В диссертационной работе использовались методы, основанные на системном подходе к решаемой проблеме, в том числе методы теории автоматического управления, математического анализа, математического моделирования, теории оптимального управления, нечеткой логики и эволюционных вычислений.

**Научная новизна полученных результатов:**

1. Поставлена задача многокритериальной оптимизации компьютерной системы управления многооперационными объектами с нечетким описанием критериев оптимальности и последовательности осуществления отдельных операций, отвечающая, в отличие от известных, типичным для сложных технических объектов условиям наличия конфликтующих друг с другом нечетко сформулированных целей и требований к процессу управления.

2. Предложены методика и вычислительная технология многокритериального синтеза компьютерной системы управления многооперационными объектами, осуществляемого путем реализации специальных продукционных правил нечетко-оптимального алгоритма работы регулятора, который, в отличие от известных аналогов, обеспечивает в условиях неполной информации об объекте выполнение необходимых требований по точности приближения к его заданному ко-

нечному состоянию, длительности процесса управления и выбору конструктивного способа определения начальных приближений.

3. Предложены постановка и численные методы решения задач многокритериальной нечеткой оптимизации перемещения мобильных роботов в гетерогенной среде, учитывающие, в отличие от известных, нечеткие формулировки маршрутов их перемещения и целей управления.

4. Предложены постановка и численные методы решения задач многокритериального нечетко-оптимального проектирования и управления объектом технологической теплофизики с распределенными параметрами на примере установок индукционного нагрева, учитывающие, в отличие от известных, нечеткий характер конкурирующих друг с другом критериев качества.

**Достоверность утверждений диссертационного исследования** подтверждается корректным применением современного аппарата теории управления, теории нечеткой логики, теории оптимизации. Справедливость выводов относительно адекватности построенных математических моделей подтверждается

- соответствием результатов представлениям об исследуемых процессах;
- совпадением частных случаев ряда полученных результатов с результатами моделирования других авторов;
- верификацией с помощью имитационного моделирования.

**Практическая значимость диссертации.** Практическая ценность работы состоит в том, что ее результаты могут служить основой для разработки программно-алгоритмического обеспечения процедуры нечетко-оптимального синтеза компьютерных систем управления многооперационными непрерывно-дискретными техническими объектами.

На основе результатов работы решен ряд задач, имеющих практическое значение:

- решена задача нечеткой оптимизации перемещений мобильных роботов в гетерогенной среде, в том числе при ограничении на время принятия управленческих решений;
- решена задача многокритериальной оптимизации объекта технологической теплофизики с распределенными параметрами на примере процесса индукционного нагрева парамагнитных оболочек.

**Практическая полезность полученных результатов** подтверждается использованием результатов исследований в следующих научно-исследовательских работах:

- при разработке и внедрении роботизированных систем управления перемещениями мобильных систем;
- при разработке и внедрении системы пространственно-временного управления процессом индукционного нагрева;
- при выполнении НИР по грантам РФФИ:

17-48-630410 р-а «Разработка систем поддержания работоспособности ресурсоснабжающих сетей за счет оптимизации периодичности их профилактики»;

18-08-00506 А «Разработка теории и методов синтеза регуляторов цифровых систем управления многооперационными, стохастическими, непрерывно-дискретными техническими объектами с требуемыми показателями качества»;

19-38-90061 Аспиранты «Разработка способов и программных средств оптимизации в задачах векторного управления многомерными многооперационными нелинейными процессами с нечеткими целями и ограничениями»;

– при проведении ПНИЭР по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы», соглашение № 075-15-2019-1364 «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57718X0286;

– при выполнении НИР по гранту СамГТУ «Разработка способов и программных средств оптимизации в задачах векторного управления многооперационными техническими объектами с нечеткими целями и ограничениями».

Теоретические положения, методики и вычислительные технологии синтеза многокритериальных нечетко-оптимальных законов управления объектами с сосредоточенными и распределенными параметрами используются в учебной деятельности ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам учебного плана подготовки бакалавров по направлениям 27.03.03 «Системный анализ и управление» и 27.03.04 «Управление в технических системах» и подготовки магистров техники и технологии по направлению 27.04.04 «Управление в технических системах», при выполнении курсовых и дипломных проектов.

**Личный вклад соискателя.** Большинство основных теоретических результатов, выносимых на защиту, получено соискателем самостоятельно. В работах, опубликованных совместно, соискателю принадлежат следующие результаты: [1, 3] – построение продукционной модели регулятора, модели мобильной киберфизической системы, вычисление оперативного и автономного вариантов алгоритма управления; [2] – постановка и решение задачи синтеза компьютерной системы управления группой мобильных роботов; [5] – расчет оптимального по быстродействию регулятора в задаче управления машиной Дубинса; [6, 7] – многокритериальная нечеткая оптимизация поведения мобильных роботов в изменяющейся среде; [4, 8, 9-11] – постановка задачи, построение модели, многокритериальная нечеткая оптимизация конструкции и режима работы индукционного нагревателя; [12, 13, 16, 17] – постановка и решение задач по программно-аппаратной реализации САУ техническими объектами.

#### **Апробация результатов работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многих научно-технических семинарах и конференциях, в том числе X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление» (Казань, 2012); XII Международной научной конференции «Интеллект и наука» (Железногорск, 2012); I и II Всероссийских научно-практических конференциях «Новые информационные технологии в экономике, управлении, образовании» (Самара, 2012, 2013); XII Международной конференции «Наука. Творчество» (Самара, 2016); семинарах по материалам и технике в аэронавтике (Workshops on Materials and Engineering in Aeronautics MEA, Москва,

2018, 2019, 2020); XXI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2019); семинаре по системному анализу (Seminar on Systems analysis, Москва, 2017); международных научных конференциях Far East Con, (Владивосток, 2018, 2020), VI Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (Тольятти, 2020).

### **Основные результаты, выносимые на защиту.**

1. Постановка задачи многокритериальной оптимизации компьютерной системы управления многооперационным объектом с нечетким описанием критериев качества и требований к последовательности осуществления отдельных операций.

2. Методика и вычислительная технология многокритериального синтеза компьютерной системы управления многооперационными объектами, осуществляемые путем реализации специальных продукционных правил нечетко-оптимального алгоритма работы регулятора в процессе численного решения максимальной задачи нечеткого математического программирования.

3. Постановка и численные методы решения задач многокритериальной нечеткой оптимизации перемещения мобильных роботов в гетерогенной среде.

4. Постановка и численные методы решения задач многокритериального нечетко-оптимального проектирования и управления объектом технологической теплофизики с распределенными параметрами на примере установок индукционного нагрева.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы полностью отражено в 17 научных и научно-технических работах автора, в том числе в четырех статьях в научных изданиях, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ, семи статьях из международных баз цитирования Web of Science и SCOPUS, шести работах в прочих журналах, сборниках научных трудов, материалах всероссийских и международных конференций. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615909.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованной литературы, приложения. Работа содержит 124 рисунка, 12 таблиц. Список использованной литературы включает 98 наименования. Объем работы составляет 149 страниц.

## **II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первом разделе** проведен системный анализ задач управления сложными нелинейными многомерными многосвязными многооперационными техническими объектами. Сделан обзор задач выработки управленческих решений и методов их решения. Проанализированы типовые особенности задач, возникающих в процессе управления: наличие различных целей управления, ограничений на ход процесса и на ресурсы управления (рисунок 1), полная или частичная неопределенность показателей качества, их многоуровневость и нестатистический характер, необходимость согласования противоречащих друг другу требований к отдельным составляющим процесса.

Гибридный дискретно-аналоговый характер рассматриваемых в работе систем управления обоснован тем, что компоненты с непрерывными сигналами отражают физические законы функционирования объектов управления, а дискретные элементы моделируют работу цифровых нечетко-оптимальных управляющих устройств. В работе рассмотрено два класса гибридных систем, системы программного управления (рисунок 2) и системы позиционного управления (рисунок 3). Их отличие в том, что применяемая для вычисления управляющих воздействий информация в виде модели объекта и среды дополняется в системах позиционного управления сигналами датчиков обратных связей.

Предложен учитывающий перечисленные особенности гибридных систем управления метод синтеза программ работы цифровых регуляторов гибридных непрерывно-дискретных систем управления. Метод базируется на способе организации на цифровых регуляторах алгоритмов управления в виде предлагаемых систем продукционных правил и на процедуре нечеткой оптимизации для определения алгоритмов работы регуляторов.

**В разделе 2** приводится обоснование нечетко-оптимального метода синтеза компьютерных систем управления нелинейными многомерными техническими объектами.

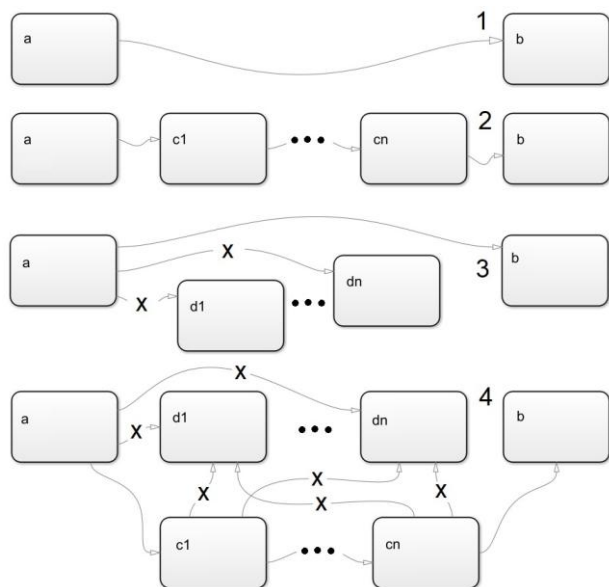


Рис. 1. Варианты требований к управляемым процессам: а – исходное состояние, b – требуемое конечное состояние, c1...cn – требуемые промежуточные состояния, d1...dn – недопустимые состояния

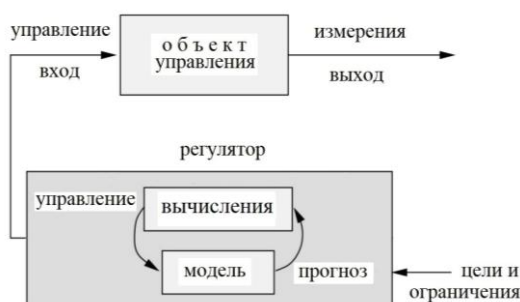


Рис. 2 Система программного управления

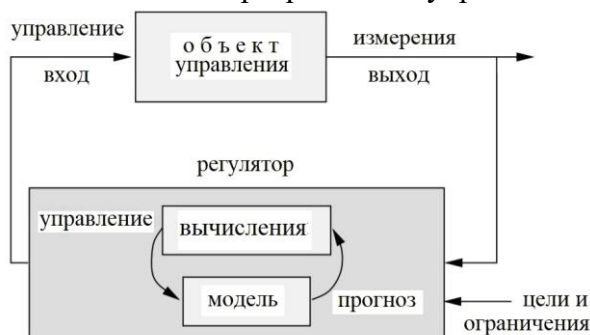


Рис. 3 Система позиционного управления

Приведена классификация наиболее распространенных функций принадлежности найденных решений соответствующим частным критериям. Обосновано использование унимодальной функции принадлежности  $\mu(x) = e^{-(x-c)^2/2\sigma^2}$  для описания нечеткого условия  $x \approx x_{зад}$ , где  $x_{зад}$  – требуемое значение переменной



$x$  и монотонной функции принадлежности  $\mu(x) = 1/(1 + e^{-a(x-c)})$  для описания требований  $x \geq x_{3AD}$ ;  $x \leq x_{3AD}$ ;  $x \rightarrow \max$ ;  $x \rightarrow \min$  в нечеткой постановке.

Рассмотрены подходы к агрегированию частных критериев с целью формирования обобщенного критерия. Показано преимущество минимаксного способа агрегирования.

Сформулирована задача синтеза системы правил работы программного регулятора как задача нечеткого математического программирования

$$\begin{aligned} \min_j (\mu_j(f_j(z^*))) &= \max_{z \in Z}, j = 1, 2, \dots, n \\ g_k(z^*) &\geq 0, k = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь решение  $z^* \in Z$  – алгоритм работы цифрового регулятора в виде набора управляющих сигналов (в общем случае векторных)  $U(t_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N$ , действующих на объект управления на временных интервалах  $[t_i, t_{i+1})$ ;  $f_1(z), f_2(z), \dots, f_n(z)$  – скалярные функции векторного аргумента  $z$ , каждая из которых является математическим описанием одного критерия оптимальности; функции принадлежности  $\mu_j(\cdot)$ ,  $j = 1, 2, \dots, k$ , устанавливают степени выполнения нечетких целей и ограничений;  $g_k(\cdot)$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$ , описывают «четкие» уравнения связи и ограничения. Задача (1) решается известными численными методами.

На тестовых задачах проведено сравнение численных алгоритмов определения нечетко-оптимального значения обобщенного показателя качества. Обосновано использование для оценки качества алгоритма таких показателей, как широта поиска (величина максимального разброса начальных приближений, обеспечивающая сходимость метода) и требуемое для достижения заданной точности количество вычислений целевой функции. Так, выбор начальной точки влияет на сходимость алгоритма поиска к точке экстремума. Скорость сходимости как количество вычислений критерия качества до момента останова решателя важна в рассмотренных в разделах 3, 4 и имеющих практический интерес задачах, поскольку даже однократное вычисление критерия качества по модели процесса является трудоемкой задачей.

Предложен «комбинированный» способ численного решения нечетко-оптимальной задачи, при котором на начальной стадии используется обладающий максимальной широтой поиска метод деформируемого многогранника, а при приближении к точке оптимума – минимизирующий количество обращений к целевой функции способ последовательного квадратичного программирования.

**Раздел 3** посвящен постановке и решению задач нечетко-оптимального синтеза систем управления мобильным роботом (в качестве которого выступает погрузчик) как нелинейным, многомерным и многосвязным объектом управления с сосредоточенными параметрами. Кинематическая модель этого ОУ – система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\dot{X} = [v \cdot \cos(\varphi), v \cdot \sin(\varphi), w \cdot |v|]^T. \quad (2)$$

Вектор состояний ОУ  $X = [x, y, \varphi]^T$ , где  $x, y$  – пространственные координаты,  $\varphi$  – направление движения. Вектор управляющих воздействий  $U = [v, w]^T$ , где  $w$  – скорость изменения направления движения,  $v$  – скорость прямолинейного движения,  $v = 1$  для машины Дубинса,  $v = \{-1, 1\}$  для машины Ридса-Шеппа. Соответствующие (2) системные связи мобильного погрузчика показаны на рисунке 4, имитационная Simulink-модель – на рисунке 5.

Для машины Дубинса и машины Ридса-Шеппа сформулирована как частный случай задачи (1) и решена проблема программного управления при отсутствии ограничений на траекторию. Функции принадлежности  $\mu_j, j=1, 2, 3$ , определяющие точность попадания в требуемую точку  $b$ , заданы аналитически,  $\mu_1(x) = e^{-2(b_1-x(t_{FIN}))^2}$ ,  $\mu_2(y) = e^{-2(b_2-y(t_{FIN}))^2}$ ,  $\mu_3(\varphi) = e^{-2(b_3-\varphi(t_{FIN}))^2}$ . Показано, что при увеличении числа интервалов нечетко-оптимального управления имеет место сходимость приближенного решения к точному по траектории (как погрешности достижения цели) и по управлению.

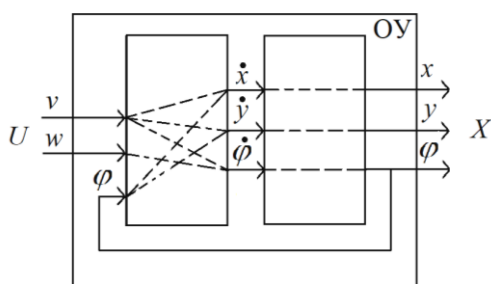


Рис. 4. Системные связи погрузчика

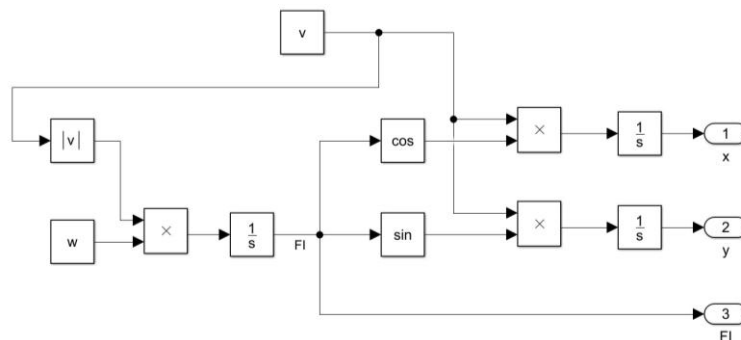


Рис. 5. Simulink-модель мобильного погрузчика

Сформулирован как частный случай (1) и решен ряд задач программного управления при наличии дополнительных условий, налагаемых на траекторию движения. В частности, решены задачи управления мобильной системой при наличии нескольких целевых областей (рисунок 6), требования попадания в каждую из них, заданы своими функциями принадлежности. Показано, что при решении таких задач как многоэтапных общая длина пути сокращается по сравнению с последовательной локальной оптимизацией (рисунок 7). Решены задачи программного управления мобильной системой при наличии дополнительных ограничений на траекторию в виде запретных состояний или областей, заданных монотонными функциями принадлежности вида  $\mu(x) = 1/(1 + e^{-a(x-c)})$ . Показано, что длина траектории за счет большего ресурса управления у машины Ридса-Шеппа сокращается по сравнению с машиной Дубинса (рисунки 8, 9).

Осуществлен нечетко-оптимальный синтез траекторий и систем правил работы регуляторов в задаче управления двумя роботизированными погрузчиками, одновременно перемещающимися навстречу друг другу по потенциально опасным траекториям.

Сформулирован и решен ряд проблем позиционного управления мобильной системой, при котором задача (1) решается на каждом шаге изменения управляющего воздействия.

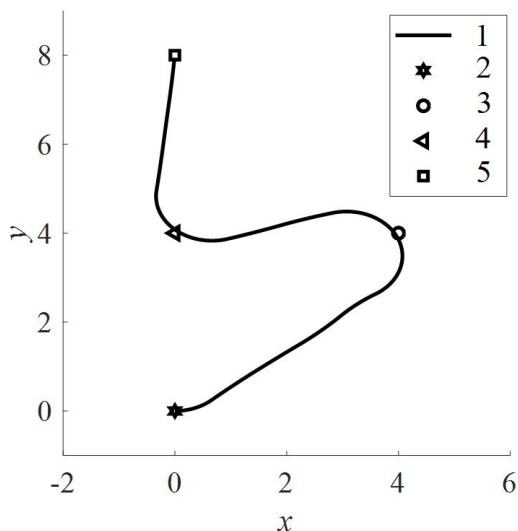


Рис. 6. Нечетко-оптимальная траектория

1—траектория, 2—начальная точка, 3—первая промежуточная точка, 4—вторая промежуточная точка, 5—конечная точка

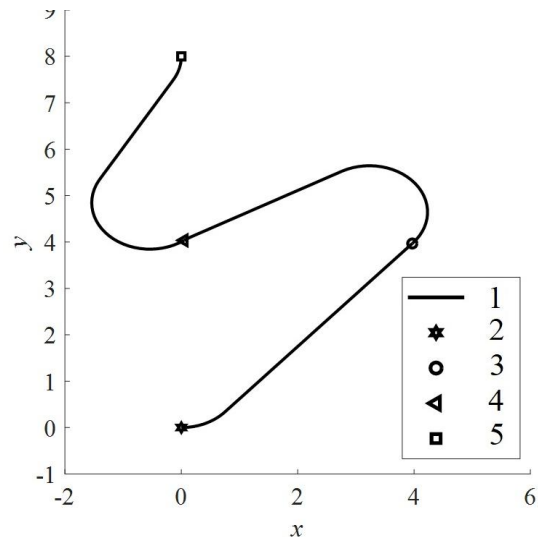


Рис. 7. Составная локально-оптимальная траектория

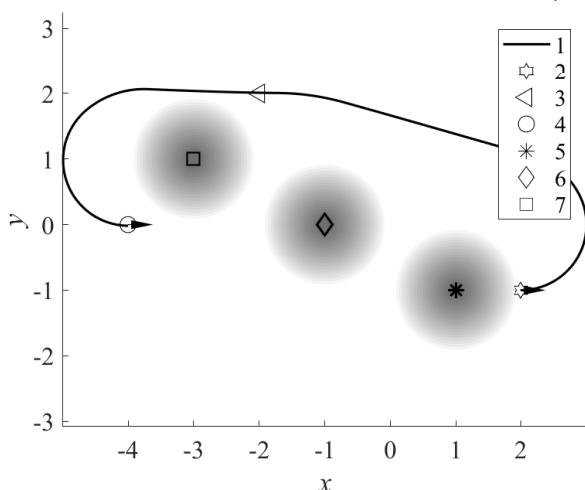


Рис. 8. Нечетко-оптимальная траектория машины Дубинса

1—траектория, 2—начальная точка, 3—промежуточная точка, 4—конечная точка, 5,6,7—запретные области

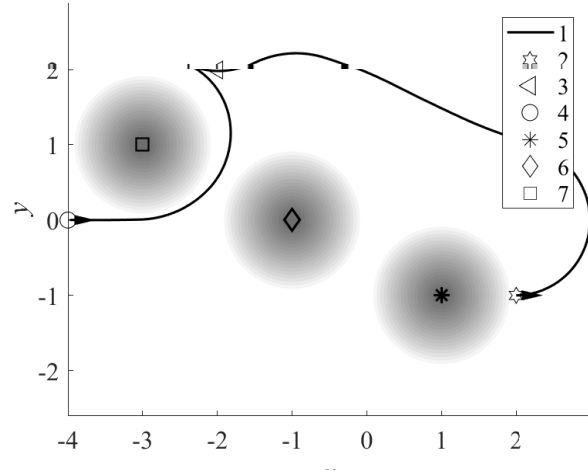


Рис. 9. Нечетко-оптимальная траектория машины Ридса-Шеппа

Сравнение результатов программного (рисунок 10) и позиционного (рисунок 11) способов нечетко-оптимального управления подтверждает большую эффективность последнего при действии возмущений.

В рамках общей проблемы (1) решен ряд задач управления мобильной системой при наличии ограничений на время принятия управленческих решений. Предложено при определении времени достижения мобильной системой цели учитывать не только время движения, но и время вычислений, необходимых для определения управляющих воздействий. Показан выигрыш во времени при локальном способе планирования по сравнению с глобальным способом, продемонстрированы преимущества использования в вычислениях алгоритма с отсечением по времени.

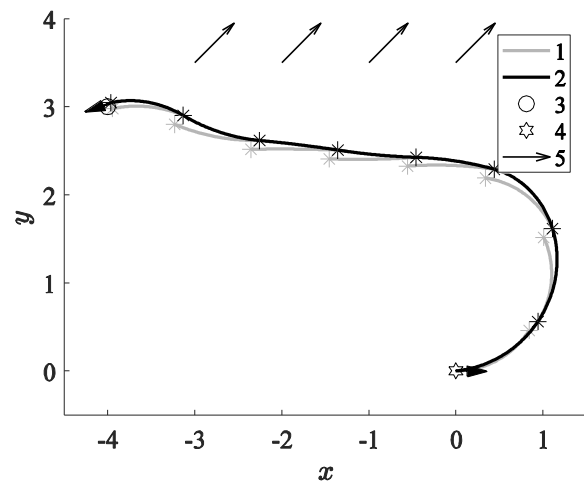
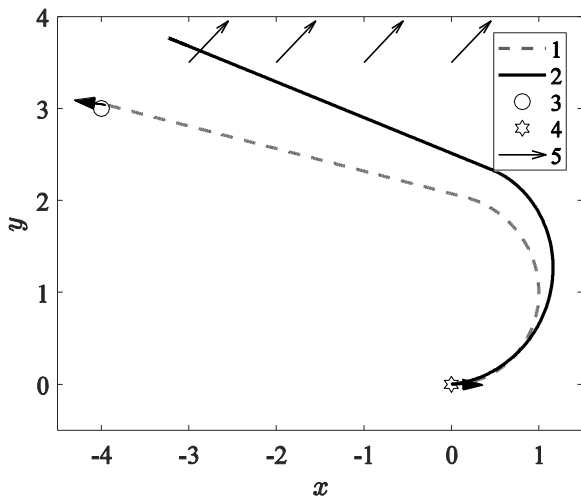


Рис. 10. Траектория при программном управлении

Рис. 11. Траектория при позиционном управлении

1 – предполагаемая траектория, 2 – реальная траектория, 3 – конечная точка, 4 – начальная точка, 5 – направление действия возмущения

Рассмотрен генетический алгоритм как процедура синтеза нечетко-оптимального по быстродействию программного регулятора в задачах управления мобильной киберфизической системой. Показаны преимущества локального способа планирования при решении задачи перемещения в однородной среде.

**В разделе 4** осуществлены системный анализ и моделирование установки индукционного нагрева – нелинейного, многомерного и многосвязного объекта управления с распределенными параметрами, решены задачи нечетко-оптимального синтеза конструкции и алгоритма управления установкой индукционного нагрева.

Дано описание технологической установки (рисунок 12) с коническим индуктором и устройствами выравнивания температуры по длине нагреваемого изделия. Методом индуктивно связанных контуров (рисунок 13), адаптированным для расчета рассматриваемой технологической установки, построена математическая модель электромагнитных процессов

$$[\dot{Z}] \cdot [i] = [U], \quad (3)$$

где  $[U] = [0 \ 0 \ \dots \ u_1]^T$ ,  $[\dot{Z}] = [R] + j\omega[X]$ ,  $X_{ij} = \begin{cases} L_i, i = k \\ M_{ij}, i \neq k \end{cases}$ ,  $L_i$  – индуктив-

ность  $i$ -го соленоида,  $M_{ik}$  – взаимная индуктивность  $i$ -го и  $k$ -го соленоидов,  $R_{ii}$  – активное сопротивление  $i$ -го соленоида. Вычисленные решением системы (3) токи соленоидов используются в тепловой модели для определения мощности внутренних теплоисточников,  $P_i = I_i^2 \cdot \text{Re}(\dot{z}_i)$ .

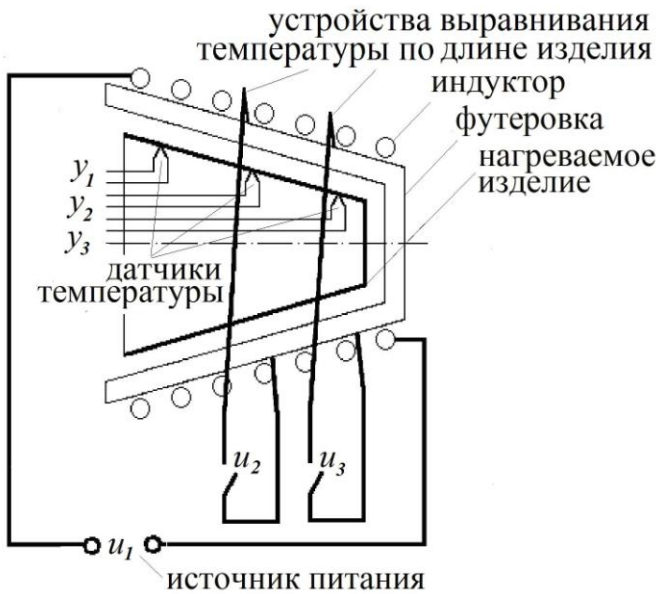


Рис. 12. Установка индукционного нагрева

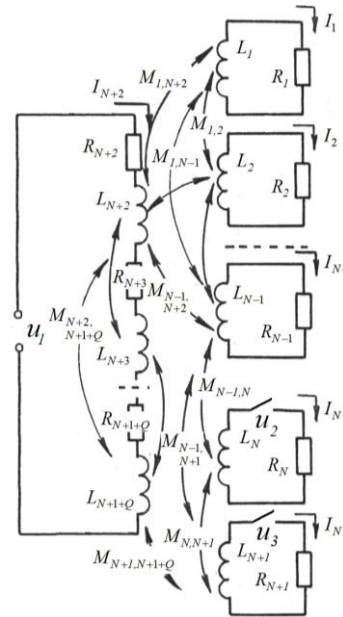


Рис. 13. Расчетная схема метода индуктивно связанных контуров для системы «конический индуктор – нагреваемое тело – устройства выравнивания температуры по длине нагреваемого изделия»

Для расчета тепловых процессов в работе использовался дифференциально-разностный метод, сводящий уравнение теплопроводности с произвольным характером изменения мощности внутренних теплоисточников  $P_{ob}(x)$  и нелинейными граничными условиями к системе

$$dT/dt = AT + P_{ob}u + F_1q_{x_2} + F_2q_{x_2}; y = CT; T|_{t=0} = T_0 \quad (4)$$

для температуры  $T = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n]^T$  в  $n$  узлах сетки. Системные связи установки индукционного нагрева представлены на рисунке 14.

Решена задача нечетко-оптимального по быстродействию цифрового управления индукционным нагревом длинномерного изделия в условиях действия ограничения на перепад температур по длине. Нагрев осуществляется в технологической установке (рисунок 12), зависимость формы кривой распределения мощности нагрева  $P_{ob}$  от величины вектора управляющих воздействий  $U = [u_1, u_2, u_3]$  приведена на рисунке 15. Результаты расчетов представлены на рисунках 16, 17. Степень удовлетворения полученного решения заданным условиям составляет от 0.8251 до 1.

Сформулирована и решена задача определения наилучшего сочетания параметров и режима работы нагревателя как задача нечеткой оптимизации. Технологические требования к индукционному нагреву выглядят следующим образом. Изделие необходимо нагреть до температуры  $T_{FIN} = 900 \text{ K}$  за минимальное время  $t_{FIN} \rightarrow \min$ , перепад температуры по длине должен быть минимальным,  $\varepsilon \rightarrow \min$ . Для максимальной эффективности процесса индукционного нагрева он должен выполняться с максимальным к.п.д.  $\eta \rightarrow \max$  с соблюдением ограничения со стороны высокочастотного источника питания  $P_T \leq 400 \text{ кВт}$ . Конфликт целей и ограничений преодолен за счет нечетко-оптимальной постановки задачи. Характеристики найденного решения и соответствующие им значения функций принадлежности приведены в работе, степень удовлетворения нечетких требований составляет 0,65.

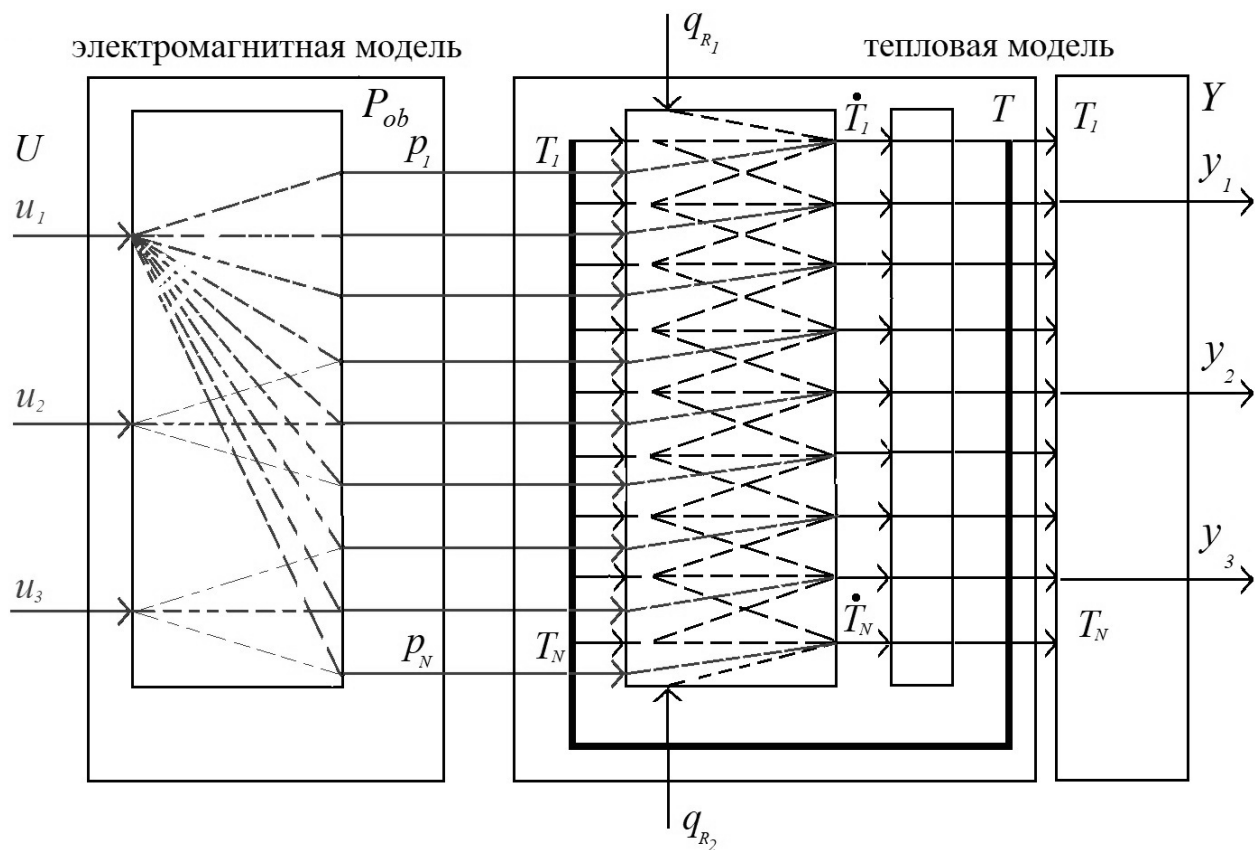


Рис. 14. Системные связи установки индукционного нагрева

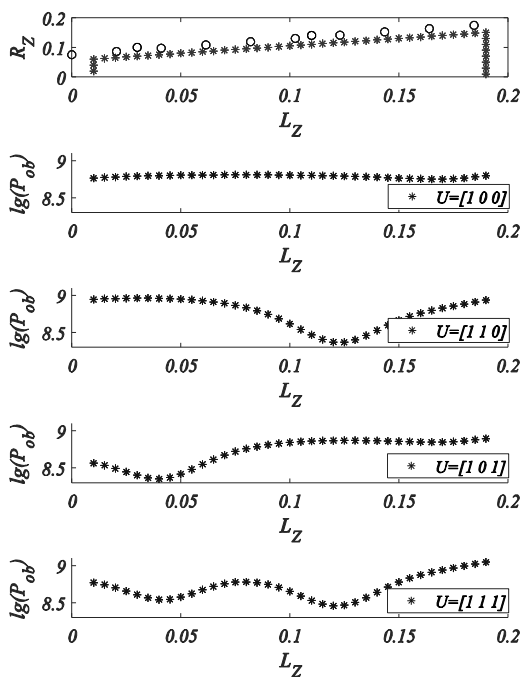


Рис. 15. Зависимость мощности нагрева  $P_{ob}$  от управления

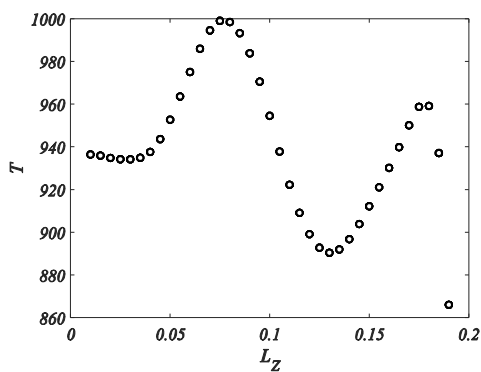


Рис. 16. Результирующее температурное поле в конце этапа нагрева

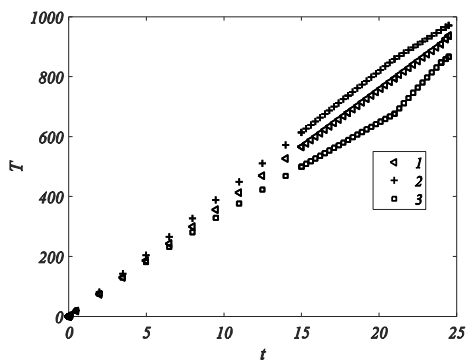


Рис. 17. Изменение температуры в нечетко-оптимальной задаче, 1–  $Y_3$ , 2–  $Y_2$ , 3–  $Y_1$

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. осуществлен системный анализ многооперационных многомерных нелинейных объектов управления, выявлены структура, пространство параметров и состояний таких ОУ;
2. разработаны имитационные модели гибридных непрерывно-дискретных систем управления с непрерывной частью в виде многооперационных нелинейных многомерных ОУ и дискретной частью, представленной цифровыми регуляторами;
3. поставлена задача многокритериального нечетко-оптимального синтеза компьютерной системы управления многооперационными непрерывно-дискретными объектами, учитывающая объективно существующие требования и условия;
4. разработана методика редукции задачи нечетко-оптимального синтеза системы управления многооперационными ОУ к задаче определения набора продукционных правил работы системы;
5. разработана методика и вычислительная технология решения задачи параметрического синтеза нечетко-оптимальных законов управления: сформулированы критерии эффективности различных численных алгоритмов определения нечетко-оптимального управления, предложен обладающий рядом преимуществ «комбинированный» метод поиска с использованием разных алгоритмов на разных стадиях поиска оптимума;
6. решен ряд задач синтеза многокритериальных нечетко-оптимальных законов управления перемещениями мобильных роботов в гетерогенной среде, в том числе в меняющихся условиях и при наличии ограничений на время принятия управленческих решений;
7. решены задачи многокритериального нечетко-оптимального проектирования и управления объектом с распределенными параметрами технологической теплофизики на примере установок индукционного нагрева, исследована эффективность разработанных алгоритмов.

### ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

**Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК России**

1. Паткин М.Л., Рогачев Г.Н., **Рогачев Н.Г.** Эволюционные вычисления реального времени в задачах управления мобильными киберфизическими системами// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2016, № 3 (51), С. 33-44.

2. Рогачев Г.Н., **Рогачев, Н.Г.** Нечеткая оптимизация в задачах планирования перемещений роботизированных складских погрузчиков// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2018, № 1 (57), С. 18-30.

3. Митрошин В.Н., Рогачев Г.Н., Чостковский Б.К., **Рогачев Н.Г.** Применение нечеткой логики в задачах оптимизации непрерывно-дискретных систем управления многооперационными технологическими процессами// Автометрия, 2019, Т. 55, № 4, С. 71-78 (включена в международные базы цитирования WoS и Scopus как Mitroshin V.N., Rogachev G.N., Chostkovskii B.K., **Rogachev N.G.** Fuzzy Optimization in Discrete-Continuous Control Systems for Multiple-Operation Technological Processes/ Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2019. Volume 55, Issue 4, pp. 376-382)

4. Рапопорт Э.Я., **Рогачев Н.Г.** Нечеткая оптимизация в задаче позиционного управления установкой индукционного нагрева// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2021, Т. 29, № 2, С. 61-75

#### **Публикации в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus**

5. Patkin M., Rogachev G., **Rogachev N.** Real-time evolutionary computation in the control of mobile cyber-physics system// 2017 Seminar on Systems analysis ITM Web of Conferences, 2017, V. 10, P. 02006

6. Patkin M., Rogachev G., **Rogachev N.** Fuzzy optimization in the problems of forklifts path planning// 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2018), 2018, pp. 1-5

7. Patkin M.L., Rogachev G.N., **Rogachev N.G.** Neural net based multi-agent mobile robots control system: practical implementation on different platform// 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019, V. 476, P. 12022

8. Rogachev G.N., **Rogachev N.G.** Model-Based Optimization in Induction Heating of Thin-Wall Shells// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, V. 714, P. 012025

9. Rogachev G.N., **Rogachev N.G.** Modeling and Fuzzy Optimization of Thin-Wall Shells Induction Heating// Proceedings-2019 21st International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems" CSCMP-2019, 2019, pp. 245-248

10. **Rogachev N.G.** Fuzzy-Optimal Online Control of a Mobile Robot in the Obstacle Avoidance Problem// 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2020), 2020, P. 282936

11. Rogachev G.N., **Rogachev N.G.** Fuzzy Joint Optimization of the Design and Operating Modes of the Induction Heater// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2021, V. 1027, No. 1, P. 012026

#### **Доклады на научных конференциях и другие научные публикации**

12. Рогачев Г.Н., **Рогачев Н.Г.** Синтез программных регуляторов в задачах управления с нечеткими целями и ограничениями// Материалы Всерос. научно-практ. заочн. конф. «Новые информац. технол. в экономике, управлении, образовании».- Самара: ООО «Издательство Ас Гард», 2012, С.17-27

13. Рогачев Г.Н., **Рогачев Н.Г.** Эволюционные вычисления в регуляторе реального времени для машины Дубинса// Аналитическая механика, устойчивость и управление. Труды X Межд. Четаевской конф. «Аналитическая механика, устойчивость и управление», т. 3.- Казань, 2012, С. 273-281



14. **Рогачев Н.Г.** Использование MATLAB-Simulink-Stateflow в робототехнических приложениях// Труды XII межд. научн. конф. «Интеллект и наука».- Красноярск: Центр информации, 2012, С. 82-83

15. **Рогачев Н.Г.** Stateflow-модель системы автоматического управления с нечетким регулятором// Материалы второй Всерос. научно-практ. заочн. конф. «Новые информац. технол. в экономике, управлении, образовании».- Самара: НОУ ВПО СИ ВШПП, 2013, С. 7-14

16. Рогачев Г.Н., **Рогачев Н.Г.** Моделирование информационно-измерительных систем автомобиля в Lego Mindstorms NXT// Информационно-измерительные и управляющие системы: вып. 1(9).- Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 2014, С. 95-99

17. Рогачев Г.Н., **Рогачев Н.Г.** Моделирование электротепловых процессов индукционного нагрева// Материалы VI Межд. научно-практ. конф. «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук».- Тольятти: ТГУ, 2020, С. 395-399

#### **Объекты интеллектуальной собственности**

18. Свидетельство 2021615909. Программа для расчета электромагнитных процессов при индукционном нагреве: программа для ЭВМ/ **Н.Г. Рогачев (RU)**; правообладатель **Н.Г. Рогачев (RU)**. № 2021615909; заявл. 26.01.2021; опубл. 14.04.2021, Бюл. № 4.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 9 от 6.10.2021 г.)

Заказ № \_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной полиграфии  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244