

На правах рукописи



Раскина Анастасия Владимировна

**НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ДУАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(космические и информационные технологии)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена на кафедре информационных систем Института космических и информационных технологий Сибирского Федерального Университета.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Медведев Александр Васильевич

Официальные
оппоненты:

Перепелкин Евгений Александрович
доктор технических наук, профессор
Алтайский государственный технический
университет, г. Барнаул
профессор кафедры прикладной математики

Гендрина Ирина Юрьевна
кандидат физико-математических наук, доцент
Национальный исследовательский
Томский государственный университет
доцент кафедры исследования операций

Ведущая организация:

Красноярский филиал Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Института вычислительных технологий Сибирского
отделения Российской академии наук —
Специальное конструкторско-технологическое бюро
«Наука»

Защита состоится 30 ноября 2018 в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева по адресу: 660037 г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева и на сайте <http://www.sibsau.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Панфилов
Илья Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Одной из актуальных задач системного анализа является создание интеллектуальных систем управления динамическими объектами. В настоящее время накоплен большой опыт по управлению динамическими объектами, в частности наиболее широкое распространение получили типовые алгоритмы регулирования, использование которых в ряде случаев оказывается недостаточно эффективным. Также в рамках современной теории управления были разработаны алгоритмы оптимального управления. Однако, для их применения, как правило, необходимо иметь достаточные априорные знания о структуре и параметрах управляемого объекта. В условиях, когда априорные сведения отсутствуют, либо незначительны актуальной задачей является разработка новых алгоритмов регулирования, способных эффективно управлять динамическим объектом при малой априорной информации.

Недостаток информации об объекте исследования приводит к необходимости совмещать изучение объекта и управление им. Управление, при котором управляющие воздействия носят двойственный характер, называют дуальным управлением. Дуальное управление было предложено А.А. Фельдбаумом и развито на основе теории статистических решений. Дальнейшее развитие теория дуального управления получила в исследованиях различных авторов, в частности В. Виттенмарка. Следует отметить, что система, в которой для вычисления управляющих воздействий используются алгоритмы дуального управления является адаптивной системой, так как по мере поступления текущей информации от управляемого объекта, она способна повышать свои рабочие характеристики, т. е. качество функционирования.

Решение задачи управления неотъемлемо связано с решением задачи идентификации исследуемого объекта. Данной проблеме посвящено большое количество трудов различных отечественных и зарубежных ученых. В частности, эти вопросы широко освещены в работах Эйкхоффа, Л. Льюнга, Я.З. Цыпкина, Х. Унбегауэна, Т. Седерстрема, Г.С. Гудвина, О. Неллеса и др. Решение задачи идентификации обычно выполняется в два основных этапа. Первым этапом является структурная идентификация, в ходе которой осуществляется выбор структуры модели с точностью до параметров. При этом динамический объект может быть описан, например, в виде дифференциального или разностного уравнения, передаточной функцией, набора типовых звеньев, интегрального уравнения в свертках и др. Вторым этапом является определение параметров модели по текущим экспериментальным данным.

Наиболее изученными на сегодняшний день являются методы параметрической идентификации, в которых ещё на этапе постановки задачи структура модели исследуемого процесса предполагается известной и определению подлежат только ее параметры. В условиях, когда невозможно обоснованно подобрать структуру модели использование вышеупомянутых алгоритмов не представляется возможным. В этом случае целесообразным является использование непараметрических методов, для применения которых необходимо знание только о качественных характеристиках исследуемого объекта. На сегодняшний день непараметрические методы широко используются для решения различных задач системного анализа, в том числе задач идентификации и управления. Поэтому разработка и исследование непараметрических моделей и алгоритмов управления, в том числе и для случая динамических объектов, является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Непараметрическая теория берет свое начало с работ М. Розенблатта, в дальнейшем непараметрические методы рассматривались в работах Э. Парзена, Э.А. Надарая, В. Хардле, В.П. Живоглядова, Ф.П. Тарасенко и др. Вопросы сходимости непараметрических оценок обсуждались в работах В. Добровидова и Г. М. Кошкина. Последними был предложен метод фильтрации полезных сигналов на фоне помех в условиях непараметрической неопределенности. Непараметрические модели и алгоритмы управления для линейных динамических объектов были предложены Медведевым А.В, в которых для описания динамической системы использовался интеграл Дюамеля. В дальнейшем задача сводилась к непараметрическому оцениванию весовой функции по результатам наблюдений «входа-выхода» объекта. Вопросы применения непараметрической теории для

нелинейных объектов обсуждались в работах Чайки С.Н, где задача решалась в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности, так как параметрическая структура нелинейного блока предполагалась известной.

Цель работы состоит в повышении эффективности непараметрических методов для решения задач идентификации динамических систем по данным наблюдений и дуального управления динамическими системами в условиях недостатка априорной информации.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1) выполнить анализ существующих методов решения задач идентификации и управления динамическими объектами по данным наблюдений;

2) разработать и исследовать непараметрический алгоритм определения структуры линейного динамического объекта с точностью до параметров;

3) разработать и исследовать непараметрический алгоритм идентификации для динамических объектов в условиях недостатка априорной информации;

4) разработать непараметрический алгоритм дуального управления динамическими объектами, в котором при формировании управляющих воздействий учитывается порядок разностного уравнения;

5) подтвердить эффективность разработанных непараметрических алгоритмов для решения задач идентификации и управления динамическими объектами в ходе проведения численного исследования;

6) подтвердить практическую значимость и эффективность алгоритмов идентификации и дуального управления путем моделирования процесса кислородно-конвертерной плавки стали на примере работы кислородно-конвертерного цеха №2 ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат».

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1) Разработан непараметрический алгоритм определения структуры модели линейного динамического объекта с точностью до параметров, отличающийся от известных непараметрических алгоритмов, тем, что позволяет определить порядок разностного уравнения линейного динамического объекта в условиях недостатка априорной информации.

2) Предложена новая модификация непараметрического алгоритма дуального управления, отличающаяся предварительным определением порядка разностного уравнения и дальнейшим использованием этой информации при вычислении управляющих воздействий, что позволяет повысить эффективность управления.

3) Впервые предложено использование непараметрических алгоритмов для решения задач идентификации и управления динамическими объектами, у которых при описании в разностном виде в правой части уравнения отсутствуют запаздывающие выходные переменные.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы состоит в разработке и исследовании нового непараметрического алгоритма, позволяющего определять запаздывающие компоненты выходной переменной динамического объекта, и как следствие порядок его разностного уравнения. Использование предложенного алгоритма позволяет увеличить точность прогноза с использованием непараметрических моделей, а также повысить эффективность применения непараметрических алгоритмов дуального управления.

Практическая значимость результатов настоящей диссертационной работы состоит в том, что предложенные непараметрические алгоритмы идентификации и дуального управления могут быть использованы при разработке систем моделирования и управления динамическими процессами в различных отраслях промышленности. Результаты диссертационной работы используются на предприятии ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» при разработке дополнений к технологическим инструкциям для выплавки и подготовки стали к непрерывной разливки в ККП №2.

Результаты работы использовались при выполнении НИОКР «Разработка интеллектуальной двухконтурной системы управления технологическими процессами» по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. В ходе выполнения

диссертационной работы было разработано 5 программ для ЭВМ, на которые получены свидетельства Роспатента о регистрации.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы системного анализа, теории идентификации, математического анализа, теории управления, теории адаптивных и обучающихся систем, математической статистики и статистического моделирования, теории оптимизации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Разработанный непараметрический алгоритм определения структуры модели линейного динамического объекта с точностью до параметров позволяет определить порядок разностного уравнения в условиях малой априорной информации;

2) Модифицированный непараметрический алгоритм дуального управления динамическими объектами, в котором при вычислении управляющих воздействий учитывается информация о порядке разностного уравнения, позволяет повысить качество управления, в том числе уменьшить время регулирования по сравнению с другими известными алгоритмами управления.

3) Предложенные в работе алгоритмы обеспечивают большую эффективность решения задач идентификации и управления динамическими объектами, у которых при описании в разностном виде отсутствуют в правой части уравнения запаздывающие выходные переменные, чем известные непараметрические алгоритмы.

Степень достоверности. Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается корректным использованием аппарата теории идентификации и управления, а также положительными результатами проверки работоспособности предлагаемых непараметрических алгоритмов идентификации и управления в ходе проведения экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XVI Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах - 2014» (Самара, 2014); Международная научная конференция «Теория вероятностей, случайные процессы, математическая статистика и приложения-2015» (Минск, 2015); X Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '15 (Москва, 2015); Международная конференция «Applied methods of statistical analysis. Nonparametric approach», (Новосибирск-Белокуриха, 2015); XX Международная научная конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем М.Ф. Решетнева (Красноярск, 2016); Международная конференция, посвященная памяти академика А.В. Кряжмского «Системный анализ: моделирование и управление» (Екатеринбург, 2016); Всероссийская конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2017» (Новокузнецк, 2017); III Международная научно-практическая конференция «Роль технических наук в развитии общества», (Кемерово, 2018).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 20 печатных работ, в том числе 8 статей в научных изданиях, рекомендуемых ВАК, 4 - в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, и 8 публикаций тезисов докладов в трудах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 107 наименований. Общий объем работы – 122 страницы, включая 92 рисунка и 6 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследования, рассмотрены вопросы научной новизны и практической ценности, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы посвящена рассмотрению вопросов, связанных с решением задачи идентификации динамических объектов при различном объеме априорной информации. В главе дается общая постановка задачи и схема идентификации, характеристика

основных уровней априорной информации. Приведены параметрические и непараметрические алгоритмы идентификации динамических объектов.

В случае, когда структура модели динамического объекта остается неизвестной предлагается следующий подход к идентификации. В работе рассматриваются классы объектов управления, допускающие описание разностными уравнениями вида:

$$x_t = F(x_{t-1}, \dots, x_{t-k}, u_t, \xi_t). \quad (1)$$

Здесь F – неизвестный функционал, x_t – выход объекта, u_t – вход объекта, ξ_t – случайное внешнее воздействие, имеющее нулевое математическое ожидание и ограниченную дисперсию, t – дискретное время, k – порядок разностного уравнения, который ограничен $k \leq k_{\max}$. Вход и выход динамического объекта представлен измерениями, формирующими выборку вида $\{u_i, x_i\}, i = \overline{1, s}$, где s – объем выборки, u_i, x_i – измерения входа и выхода объекта в момент времени t_i .

Введем следующие обозначения:

$$z_t = (z_1, \dots, z_{k+1}) = (x_{t-1}, \dots, x_{t-k}, u_t), \quad (2)$$

тогда

$$x_t = F(z_t). \quad (3)$$

Таким образом, задача идентификации динамического объекта сводится к задаче идентификации статического объекта за счет введения математического переобозначения (2).

В рассматриваемых условиях в качестве непараметрической модели объекта может быть принята следующая непараметрическая оценка функции регрессии по данным наблюдений $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$:

$$x_s^f = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \cdot \Phi\left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u}\right) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s^{x[j]}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u}\right) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s^{x[j]}}\right)}, \quad (4)$$

где $\Phi(\cdot)$ – колоколообразная функция, $c_s^u, c_s^{x[j]}$ – коэффициенты размытости ядра, которые при наличии обучающей выборки находится из задачи минимизации показателя соответствия выхода объекта и выхода модели, основанного на методе скользящего экзамена, когда в непараметрической модели (4) по индексу i исключается q -е наблюдение переменной, предъявляемой для экзамена:

$$R(c_s^u, c_s^{x[1]}, \dots, c_s^{x[k]}) = \sum_{q=1}^s \left(x_s(u_q, x_{q-1}, \dots, x_{q-k}) - x_q \right)^2 = \min_{c_s^u, c_s^{x[1]}, \dots, c_s^{x[k]}} , q \neq i, \quad (5)$$

где индекс i фигурирует в непараметрической модели (4). В качестве алгоритма оптимизации был выбран метод многомерной оптимизации – метод Нелдера — Мида, так как данный метод является эффективным при работе с негладкими и зашумленными функциями. Для выбора начальных вершин деформируемого многогранника была задана область возможных значений коэффициентов размытости ядерной функции $c_s \in [0.01, 4]$, из которой произвольным образом выбрана $n+k+1$ точка, где n – количество входных переменных, k – порядок разностного уравнения, которые образуют симплекс $n+k$ -мерного пространства

Следует отметить, что рассмотрение динамического объекта в виде (1) не является единственным и не охватывает всех особенностей реально протекающих процессов, зависящих от их характера, свойств, средств контроля и т. п. Так, разностное уравнение объекта (1) может не содержать некоторых запаздывающих компонент выхода объекта в правой части уравнения. Характерной отличительной особенностью рассматриваемых объектов, является тот факт, что при их описании не могут быть использованы разностные аналоги дифференциальных

уравнений, принятые в классической теории идентификации и управления. Эта особенность является главным отличием объектов с памятью от традиционных динамических объектов, рассматриваемых в теории.

Подобного рода объекты, ранее описывались рядом авторов в виде сезонных моделей (Д. Бокс, Г. Дженкинс), циклических временных рядов (Р.Л. Рао, А. Р. Кашьяп). Общим является тот факт, что процессы, протекающие в такого рода объектах, характеризуются выраженным циклическим поведением. Для идентификации в этом случае могут применяться интегрированные модели авторегрессии, модели авторегрессии, которые содержат члены вида $x(t-T)$, где T определяется из имеющейся априорной информации, либо же используются модели, содержащие детерминированный тренд, в качестве которого могут выступать функции $\sin(t\omega), \cos(t\omega)$, отражающие циклическое поведение. Для использования вышеперечисленных моделей необходимо иметь достаточную априорную информацию об исследуемом объекте для выбора той или иной структуры модели.

Непараметрическая модель для объектов с памятью будет содержать только те запаздывающие выходные переменные, непосредственно от которых зависит выход объекта. Например, если динамический объект можно описать разностным уравнением вида $x_t = F(x_{t-1}, x_{t-3}, u_t)$, где F – неизвестный функционал, то соответствующая ему непараметрическая модель будет иметь вид:

$$x_t^s = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \cdot \Phi\left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s^{x[1]}}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-3} - x_{i-3}}{c_s^{x[k]}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s^{x[1]}}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-3} - x_{i-3}}{c_s^{x[k]}}\right)}. \quad (6)$$

Таким образом, для построения моделей вида (4) и (6) необходимо знание не только о порядке разностного уравнения динамического объекта k , но и информация о том от каких именно запаздывающих переменных зависит выход x_t . Для решения задачи предложен алгоритм, основанный на применении правила выделения существенных переменных на основе измерения коэффициента размытости c_s ядерной функции $\Phi(\cdot)$ в непараметрической модели. В оценке (4) в соответствие каждой запаздывающей выходной переменной x_{s-1}, \dots, x_{s-k} ставится свой коэффициент размытости ядра $c_s^{x[1]}, \dots, c_s^{x[k]}$. Суть правила состоит в следующем, чем больше коэффициент размытости ядра при некоторой переменной, тем меньшее влияние эта переменная оказывает на выходную характеристику объекта. Поэтому задача состоит в нахождении запаздывающих выходных переменных x_{t-1}, x_{t-2}, \dots , которые необходимо учесть в модели (4). Алгоритм вычисления значимых переменных x_{s-j} строится по следующей схеме. Сначала задается начальное значение k . Далее следует этап построения модели по формуле (4) и вычисление относительной ошибки моделирования W_0 :

$$W = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_i - x_i^s)^2 / \sum_{i=1}^s \frac{1}{s-1} (m_x - x_i)^2}$$

где m_x - математическое ожидание.

Далее на каждой i – ой итерации выполняется следующий набор действий:

1. Для каждого коэффициента $c_s^{x[1]}, \dots, c_s^{x[k]}$ находится оптимальное значение: $c_s^{x[1]} = c_s^{*x[1]}, c_s^{x[2]} = c_s^{*x[2]}, \dots, c_s^{x[k]} = c_s^{*x[k]}$.
2. Из полученных значений выбирается максимальное - $c_{max_s}^{x[j]}$.

3. Осуществляется построение модели по формуле (4), где исключается множитель $\Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s^{*x^j}}\right)$, где j- номер при $c_{max_s}^{x[j]}$.

4. Вычисление относительной ошибки моделирования W_i .

Действия будут повторяться, до тех пор пока $W_i \geq W_{i-1}$.

Предложенный алгоритм может быть применим к различным классам динамических объектов. В случае отношения объекта к классу линейных алгоритм позволяет определить структуру модели объекта с точностью до параметров. Это справедливо и для динамических объектов, разностные уравнения которых содержат все выходные переменные x_{t-1}, \dots, x_{t-k} до k – того порядка, и для объектов, у которых в правой части разностного уравнения отсутствуют некоторые переменные из x_{t-1}, \dots, x_{t-k} . В случае, если динамический объект описывается уравнением (1) где F – нелинейный неизвестный функционал, то алгоритм позволяет повысить точность прогноза непараметрических моделей за счет определения порядка разностного уравнения динамического объекта.

Точность предложенного алгоритма была проверена в ходе проведения многочисленных вычислительных экспериментов, в которых исследуемые динамические объекты описывались различными разностными уравнениями. Для иллюстрации работоспособности предложенного алгоритма ниже будет рассмотрен пример определения структуры линейного динамического объекта с точностью до параметров.

Пример. Для вычислительного эксперимента был выбран объект, описывающийся уравнением вида:

$$x_t = 2.69 \cdot x_{t-1} - 2.46x_{t-2} + 0.73x_{t-3} + 0.015u_t \quad (7)$$

Зададим значение $k_{max} = 6$. Результаты моделирования с использованием формулы (4) представлены на рисунке 1а). Относительная ошибка моделирования: $W_0 = 0,017$. После выполнения всех этапов алгоритма были исключены переменные: $x_{t-4}, x_{t-5}, x_{t-6}$. Таким образом полученная структура динамического объекта равна: $x_s = \alpha_1 x_{s-1} + \alpha_2 x_{s-2} + \alpha_3 x_{s-3} + \beta u_t$, что соответствует структуре разностного уравнения объекта (7), а непараметрическая модель имеет вид:

$$x_t^s = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \cdot \Phi\left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s^{x[1]}}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s^{x[2]}}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-3} - x_{i-3}}{c_s^{x[3]}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s^{x[1]}}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s^{x[2]}}\right) \Phi\left(\frac{x_{s-3} - x_{i-3}}{c_s^{x[3]}}\right)} \quad (8)$$

Результаты моделирования с использованием формулы (8) представлены на рисунке 1б)

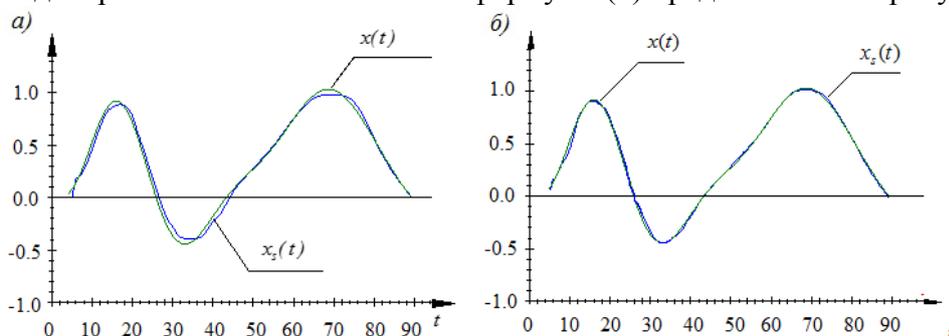


Рис. 1 – а) - Результаты моделирования объекта (7) при значении $k = 6$
 б) Результаты моделирования объекта (7) при использовании модели (8)

Относительная ошибка моделирования для эксперимента, показанного на рисунке 1б) равна $W = 0,005$. Таким образом можно сделать вывод, что использование предлагаемого алгоритма позволяет улучшить точность прогноза с использованием непараметрической модели путем

определения порядка разностного уравнения динамического объекта, если последний из априорной информации неизвестен.

Известные методы определения структуры линейного динамического объекта представляют собой решение задачи выбора порядка разностного линейного уравнения. В этой области можно выделить несколько алгоритмов, позволяющих определить истинный порядок линейной модели k или же хотя бы ограничить число возможных порядков модели k_{\max} . К последним относится так называемый тест на нормальность распределения (Normality test), а также алгоритм, основанный на вычислении коэффициента детерминанта (Determinant ratio test). Среди алгоритмов, позволяющих определить точный порядок k можно выделить: статистический F-тест (Statistical F-test), тест на независимость (Independence test), и алгоритм, основанный на вычислении ошибки сигнала (Signal error test). Для оценки эффективности разработанного непараметрического алгоритма было произведено сравнение с перечисленными методами, а также с алгоритмом, осуществляющим перебор возможных порядков модели, в котором лучшим порядком является тот порядок модели, при котором относительная ошибка моделирования будет минимальной. В качестве исследуемого объекта был взят объект, описываемый разностным уравнением (7). Исследования проводились в условиях действия внешних помех ξ . Порядок k определялся из диапазона 1-10. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение эффективности работы алгоритмов определения k

	Допустимый уровень помех, %	Время вычисления точного порядка k , мсек	Возможность определения k в условиях нормального функционирования
Statistical F-test	14	5923	Да
Independence test	8	4997	Да
Signal error test	9	5320	Нет
Перебор	14	4377	Да
Непараметрический алгоритм	16	3209	Да

Таким образом, предлагаемый непараметрический алгоритм более устойчив к внешним помехам, а также позволяет определить порядок модели динамического объекта за меньшее время, в условиях нормального функционирования объекта. Также следует отметить, что представленные выше алгоритмы позволяют определить только порядок линейной модели, что говорит о том, что они не могут быть применимы при идентификации объектов с памятью, в отличие от разработанного непараметрического алгоритма.

Вторая глава диссертационной работы посвящена проблеме управления динамическими объектами в условиях непараметрической неопределенности. Здесь приводятся общие сведения о задаче управления, различных типах управляющих устройств, а именно типовых регуляторах, к которым относятся П, ПИ, ПИД регуляторы, адаптивных устройств регулирования, а также некоторые сведения из теории дуального управления. Приводится постановка задачи управления. Для динамического объекта, который может быть описан разностным уравнением (1) задача управления состоит в нахождении функций управления $u(t)$, которая переводит выход объекта $x(t)$ в заданное значение $x^*(t)$ за некоторое конечное время t_p . При этом также, как и в случае идентификации функционал F предполагается неизвестным из априорной информации, но имеется выборка наблюдений вида $\{u_i, x_i\}, i = \overline{1, s}$.

Общий вид непараметрического алгоритма дуального управления имеет вид:

$$u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1}, \quad (9)$$

где u_s^* – слагаемое, отвечающее за изучение и накопление информации об объекте, представляющее собой оценку обратного оператора динамического объекта, а $\Delta u_{s+1} = \varepsilon(x_{s+1}^* - x_s)$ – поисковые шаги. Схема дуального управления представлена на рисунке 2.

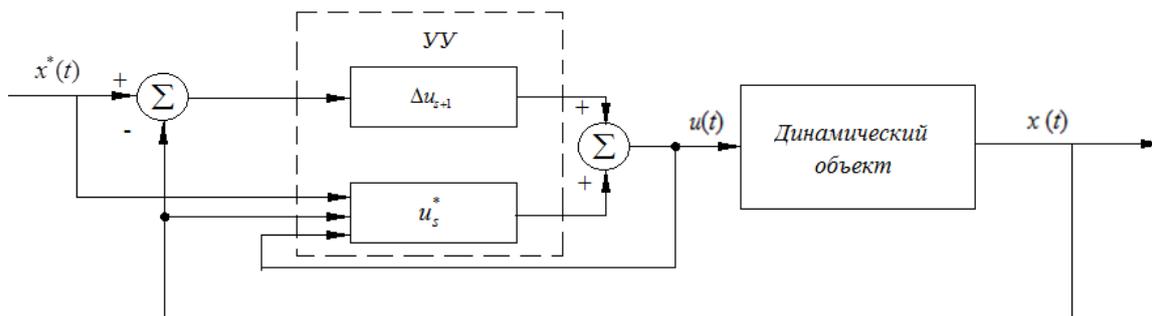


Рис. 2 – Схема дуального управления динамическим объектом

На рисунке 2 УУ – устройство управления. Вид u_s^* зависит от типа регулируемого объекта. В условиях, когда порядок разностного уравнения объекта (1) является известной величиной первое слагаемое из (9) может быть представлено в виде качества оценки обратного оператора объекта:

$$u_s^* = \frac{\sum_{i=1}^s u_i \cdot \Phi\left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s}\right) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s^{x[j]}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s}\right) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s^{x[j]}}\right)}. \quad (10)$$

Дуализм алгоритма (9) заключается в следующем. На первых тактах управления основную роль при формировании управляющих воздействий играет слагаемое Δu_{s+1} из формулы (9). Но уже по мере накопления информации об объекте возрастает роль слагаемого u_s^* .

Результаты управления динамическим объектом с использованием непараметрического дуального алгоритма управления (9) сравнивались с результатами управления типовым алгоритмом регулирования (ПИД), а также с известными результатами использования квазиоптимальной по быстродействию системы управления высокого порядка (КСУ). Качество управления оценивалось по времени регулирования (t_p) – время с начала управления до момента, когда выходная величина отличается от задания не более некоторой заданной величины α . ($\alpha = 0,05$ хуст.). В качестве примера приведем работу трех алгоритмов управления при изменяющемся задающем воздействии. Объект управления представляет собой последовательное соединение трех аperiodических звеньев. Подробные результаты управления приведены в таблице 2.

Таблица 2 – «Результаты сравнения непараметрического алгоритма дуального управления с ПИД – регулятором и КСУ»

Тип регулятора	t_p
ПИД	7.9
Непараметрический алгоритм дуального управления	8.1 (на этапе накопления информации) 1.2 (после прохождения этапа накопления информации)
Квазиоптимальная по быстродействию система управления высокого порядка (КСУ)	3.5

Рассмотрим работу непараметрического дуального алгоритма управления подробнее. Обучение управлению начинается с первой диады наблюдений x_1, u_1 . На начальной стадии управления необходимо некоторое время (накопление выборки) для приведения объекта в

заданное состояние. На этом этапе большую роль при формировании управляющего воздействия играет переменная Δu_{s+1} из формулы (9). В дальнейшем большее значение имеет слагаемое u_s^* . После прохождения этапа обучения, выходная переменная объекта $x(t)$ почти мгновенно достигает задающего воздействия $x^*(t)$. Таким образом, использование предлагаемого непараметрического алгоритма после прохождения этапа накопления информации позволяет сократить время регулирования при равных условиях внешних помех и объема выборок по сравнению с типовым ПИД-регулятором и квазиоптимальной по быстродействию системой управления высокого порядка.

В главе также приводится решение задачи управления нелинейными динамическими объектами, которые могут быть описаны разностными уравнениями (1), где F – неизвестный нелинейный функционал. Здесь эффективность непараметрических алгоритмов дуального управления оценивалась по относительной ошибке управления W_p , равной суммарному отклонению фактического выхода процесса от задающего воздействия в течении всего времени регулирования по отношению к задающему воздействию, выраженной в относительных величинах

$$W_p = \frac{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s |x_i - x_i^*|}{x^*}.$$

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных для динамических объектов, описываемых различными разностными уравнениями вида (1) представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость относительной ошибки управления W_p от вида уравнения объекта

Вид уравнения	Относительная ошибка управления
I. Линейное уравнение: $x_t = 0,2 \cdot x_{t-1} - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,076
II. Нелинейные уравнения (алгебраические)	
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1}^{1,2} - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,085
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1} - 0,3 \cdot x_{t-2}^{1,2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,088
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1} - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3}^{1,2} + 1,5u_t$	0,113
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1}^{1,2} - 0,3 \cdot x_{t-2}^{1,2} + 0,4 \cdot x_{t-3}^{1,2} + 1,5u_t$	0,124
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1}^{1,5} - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,115
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1}^2 - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,66
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1} - 0,3 \cdot x_{t-2}^2 + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,78
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1} - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot \sqrt{x_{t-3}} + 1,5u_t$	0,082
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1}^{1,5} - 0,3 \cdot \sqrt{x_{t-2}} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,23
$x_t = 0,2 \cdot \frac{1}{x_{t-1}} - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,456
III. Нелинейные уравнения (трансцендентные)	
$x_t = 0,2 \cdot \sin(x_{t-1}) - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,105
$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1} - 0,3 \cdot \log_{10}(x_{t-2}) + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,128
$x_t = 0,2 \cdot e^{x_{t-1}} - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1,5u_t$	0,89
$x_t = 0,2 \cdot \cos(x_{t-1}) - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot \sin(x_{t-3}) + 1,5u_t$	0,117

Практически для всех тестовых уравнений были получены удовлетворительные результаты, за исключением уравнений, содержащих степенную функцию при показателе степени больше либо равным 2 ($W_p = 0.66$), а также при присутствии экспоненциальной функции ($W_p = 0.89$). В рассматриваемом случае большое значение W_p связано также с тем, что исследуемый объект относился и к классу неустойчивых систем. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что непараметрический алгоритм управления (9) может быть использован и для некоторых динамических объектов, для которых принцип суперпозиции уже не выполняется.

Во второй части настоящей главы обсуждаются проблемы использования многоконтурных систем управления. Введение дополнительных контуров управления связано с реализацией той или иной функции, к которым могут относиться, например, функции идентификации системы, настройки параметров, компенсации возмущений, стабилизации объекта и другие функции. Необходимость введения внешнего контура вызвана двумя факторами. Во-первых, типовые регуляторы при формировании управляющих воздействий $u(t)$ используют информацию об отклонении выходной величины $x(t)$ от задающего воздействия $x^*(t)$, при этом данные о неуправляемых входных воздействиях $\mu(t)$, которые также влияют на выход объекта $x(t)$, не учитываются. Во-вторых, типовые регуляторы, не являются обучающими, адаптивными. Это означает, что при переводе объекта от одного задающего воздействия к другому, регулятор не будет улучшать своих рабочих характеристик. Это значительно увеличивает время регулирования, и как следствие, повышает возможность выхода за пределы технологического регламента. Для применения многоконтурной системы управления, в которой внешний контур регулирования определяет задающие воздействия (уставку) для внутреннего контура, необходимым условием является наличие в системе соответствующих исполнительных механизмов, позволяющих реализовать вычисляемую непараметрическим регулятором уставку.

В третьей главе диссертационной работы исследуется процесс кислородно-конвертерной плавки стали на примере работы кислородно-конвертерного цеха №2 (ККЦ№2) ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат». Для исследования процесса кислородно-конвертерной плавки использовалась выборка «входных-выходных» переменных $\{u_i, \mu_i, x_i\}, i = \overline{1, 200}$, где $u_1(t)$ - садка, т., $u_2(t)$ - известь т., $u_3(t)$ - электродный бой т., $u_4(t)$ - флюс ФОМИ т., $u_5(t)$ - агломерат офлюсованный т., $u_6(t)$ - уголь ССО т., $\mu_1(t)$ (расход чугуна, т.), химический состав заливаемого чугуна, (%) ($\mu_2(t)$ - кремний Si, $\mu_3(t)$ - магний Mn, $\mu_4(t)$ - сера S, $\mu_5(t)$ - фосфор P), $\mu_6(t)$ (температура чугуна, $^{\circ}\text{C}$), $\mu_7(t)$ (расход лома, т.), $x_1(t)$ - алюминий Al, $x_2(t)$ - углерод C, $x_3(t)$ - магний Mn, $x_4(t)$ - сера S, $x_5(t)$ - фосфор P, $x_6(t)$ - CaO, $x_7(t)$ - SiO₂, $x_8(t)$ - FeO, $x_9(t)$ - MgO, $x_{10}(t)$ - Al₂O₃, $x_{11}(t)$ - S, $x_{12}(t)$ - MnO, $x_{13}(t)$ - P₂O₅, $x_{14}(t)$ - температура металла на повалке, $^{\circ}\text{C}$. К помехам $\xi(t)$, действующим на процесс, можно отнести состояние сталевыпускного отверстия, качество лома, угар и усвоение присадок. Выборка представляла собой измерения, полученные при выплавке стали марки GT в ККЦ№2 ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат».

Процесс кислородно-конвертерной плавки стали относится к классу динамических процессов, однако вследствие недостатка соответствующих средств контроля «входных-выходных» переменных в работе рассматривается как безынерционный процесс с запаздыванием. Недостатком существующей на предприятии системы управления является то, что в процессе кислородно-конвертерной плавки стали выходные переменные $x(t)$ не контролируются в ходе выплавки, а становятся известны лишь на повалке при взятии пробы. В этой связи управление технологическим процессом по выходным переменным не осуществляется, хотя именно они определяют качество и, соответственно, стоимость выпускаемой продукции. На практике управление процессом осуществляется оператором в соответствии с показаниями газоанализатора ($\omega_1(t), \omega_2(t)$), где: ω_1 (состав конвертерных газов) и ω_2 (температура конвертерных газов, $^{\circ}\text{C}$).

В ходе исследований может быть предложена следующая двухконтурная схема управления процессом кислородно-конвертерной плавки стали (рис. 6).

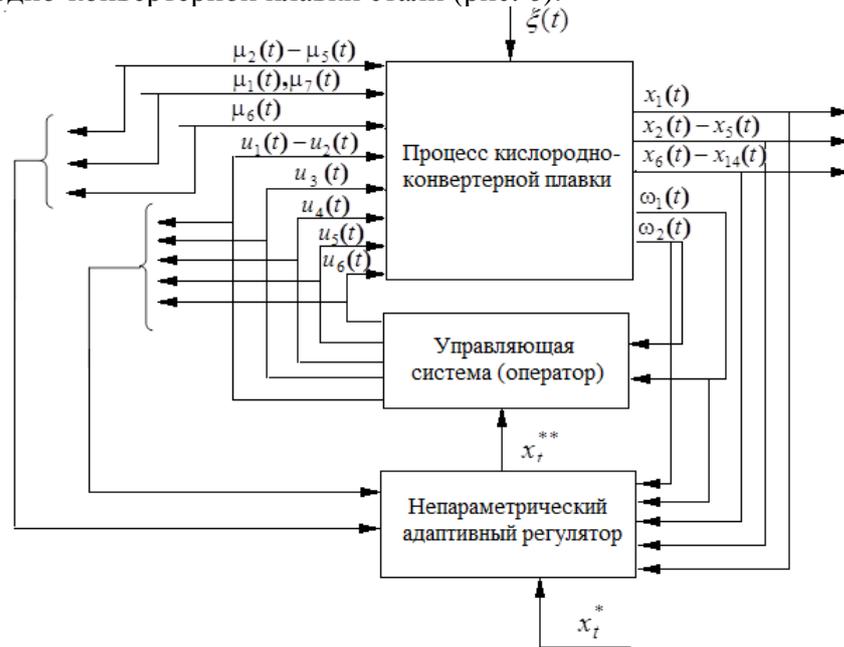


Рис. 6 – Двухконтурная схема управления процессом кислородно-конвертерной плавки стали

В предлагаемую схему введен внешний контур управления, содержащий непараметрический адаптивный регулятор. Особенностью схемы является способ включений внешнего контура в общую систему управления: предлагаемое устройство не будет заменять существующую систему (формирование управляющих входных воздействий продолжает осуществлять оператор). Непараметрический адаптивный регулятор введен как внешнее устройство по отношению к оператору. Алгоритм управления осуществляется по формуле:

$$x_s^{**} = \frac{\sum_{i=1}^s u_i \cdot \prod_{q=1}^7 \Phi \left(\frac{\mu_s^q - \mu_i^q}{c_s^{\mu^q}} \right) \Phi \left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s^x} \right)}{\sum_{i=1}^s \Phi \prod_{q=1}^7 \Phi \left(\frac{\mu_s^q - \mu_i^q}{c_s^{\mu^q}} \right) \Phi \left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s^x} \right)}. \quad (11)$$

Основная задача непараметрического устройства управления – это вычисление задающих воздействий для внутреннего контура регулирования, с целью повышения эффективности управления. Полученные данные соответствуют случаю, когда существующая на предприятии система управления, а именно оператор уже производил управление процессом. В связи с этим, включение внешнего контура в соответствии с рисунком 6 невозможно. В настоящем эксперименте внешний контур управления будет вычислять непосредственно управляющие воздействия $u(t)$.

В следствии сложности проведения вычислительных экспериментов по управлению непосредственно на конвертере, для верификации предложенных алгоритмов предлагается следующее численное исследование. Для вычисления управляющего воздействия \bar{u}_t в формуле (11) в качестве задающего воздействия будет выступать значение выхода объекта на определенном моменте времени t : $x_t = x_t^*$. Вычисленные значения \bar{u}_t сравниваются с реальными значениями входной переменной u_t . На рисунке 7 показан эксперимент по вычислению управляемой переменной известь $u_3(t)$:

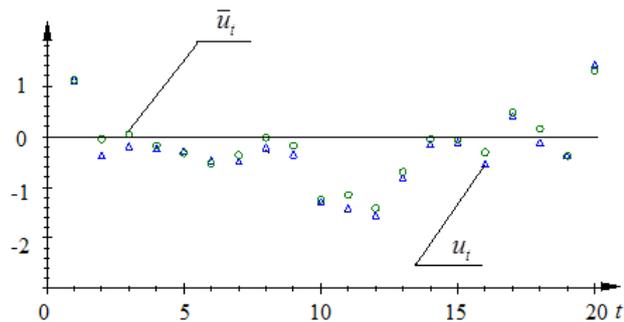


Рис. 7 – Сравнение вычисленных управляющих воздействий \bar{u}_i с реальными значениями u_i

Как показывают результаты численного исследования, вычисленные с использованием непараметрического алгоритма управления (11) значения \bar{u}_i , близки с реальными значениями u_i , в выбранный момент времени t , что говорит о том, что непараметрические алгоритмы могут быть использованы для управления исследуемым процессом.

Заключение. В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты и выводы работы:

1) В ходе диссертационной работы был выполнен анализ существующих алгоритмов идентификации и управления динамическими объектами, приведены описания соответствующих алгоритмов, а также указаны условия и основные особенности применения для различных классов динамических систем, в результате чего были поставлены задачи повышения эффективности непараметрических алгоритмов идентификации и управления динамическими объектами.

2) Разработан и исследован непараметрический алгоритм определения структуры линейного динамического объекта, основанный на правиле выделения существенных переменных. Данный подход связан с определением оптимальных коэффициентов размытости ядерной функции при использовании непараметрической оценки функции регрессии по наблюдениям. Задача определения структуры линейного динамического объекта более эффективно решается с использованием предлагаемого алгоритма по сравнению с известными алгоритмами определения порядка разностного уравнения линейного динамического объекта.

3) Разработан непараметрический алгоритм идентификации динамических объектов, представляющий собой непараметрическую оценку функции регрессии по наблюдениям, в которой помимо входных воздействий учитываются также значения выхода объекта в предыдущие моменты времени. Разработанный алгоритм может быть применим как для линейных динамических объектов, так и для объектов, относящихся к категории нелинейных.

4) Разработан непараметрический алгоритм дуального управления динамическими объектами, основное отличие которого заключается в использовании информации о порядке разностного уравнения динамического объекта при вычислении управляющих воздействий. Задача управления динамическими объектами наиболее эффективно решается предложенным алгоритмом, по сравнению с типовыми алгоритмами регулирования, в частности ПИД – алгоритмом и квазиоптимальной по быстродействию системой управления высокого порядка.

5) В результате проведения численных исследований была подтверждена эффективность разработанных непараметрических алгоритмов идентификации и управления динамическими объектами. Эксперименты проводились в условиях действия внешних помех, при задающих воздействиях различного вида.

6) Практическая значимость и эффективность разработанных алгоритмов управления была подтверждена путем моделирования процесса кислородно-конвертерной плавки стали на примере работы кислородно-конвертерного цеха №2 ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Применение непараметрического алгоритма во внешнем контуре управления позволяет существенно улучшить качество регулирования технологическим процессом.

Таким образом, в диссертационной работе предложены, реализованы и проверены на тестовых и прикладных задачах новые непараметрические алгоритмы, позволяющие успешно решать задачи идентификации и управления динамическими объектами в условиях малой априорной информации, что имеет существенное значение для теории и практики системного анализа.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Банникова А.В. (Раскина А.В.)** / О непараметрическом моделировании стохастических объектов с памятью // А.В. Банникова, Н.А. Сергеева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева., Выпуск 2 (54). Красноярск, 2014 // с. 6-11 (ВАК)

2. **Банникова А.В. (Раскина А.В.)** / О непараметрическом управлении стохастическими объектами с памятью / А.В. Банникова, А.А. Корнеева, М.Е. Корнет, Н.А. Сергеева. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, Выпуск 3 (55). Красноярск, 2014. с. 28-34 (ВАК)

3. **Банникова А.В. (Раскина А.В.)** / О непараметрическом управлении линейными динамическими процессами в условиях неопределенности / А.В. Банникова, М.Е. Корнет, А.В. Медведев // Системы управления и информационные технологии № 1 (59) г. Воронеж, 2015 с. 4-8 (ВАК)

4. **Банникова А.В. (Раскина А.В.)** / О непараметрической идентификации линейных динамических процессов в условиях неопределенности / А.В. Банникова, Чжан Е.А. // Экономика и менеджмент систем управления №4.2(18) г. Воронеж, 2015 с.246-251 (ВАК)

5. **Раскина А.В.** / О непараметрическом управлении неустойчивыми линейными динамическими процессами / А.В. Раскина., А.В. Медведев // Системы управления и информационные технологии № 3 (65) г. Воронеж, 2016 с. 13-19 (ВАК)

6. **Раскина А.В.** / Определение структуры линейного динамического объекта в задачах непараметрической идентификации // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева // Том 17. №4., 2016, с. 891-898 (ВАК)

7. **Raskina A.V.** / On nonparametric identification and dual control of Quasilinear dynamic processes / Medvedev A.V., Raskina A.V. // Сибирский журнал науки и технологий // Том 18. №4., 2017, с. 754-764 (ВАК)

8. **Raskina A.V.** / Comparative analysis of typical regulation algorithms and nonparametric dual control algorithm // Сибирский журнал науки и технологий // Том 18. №4., 2017, с.804-810 (ВАК)

В других изданиях:

9. **Bannikova A.V. (Raskina A.V.)** / Nonparametric identification and dual control of dynamic processes / A.V. Bannikova, M. E. Kornet // Steel in Translation, April 2015, Volume 45, Issue 4, pp 262-265 (Scopus)

10. **Raskina A.V.** / On the nonparametric identification and dual adaptive control of dynamic processes / A.V. Raskina, A.V. Medvedev // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2017, T10, №1, с. 96-107 (Scopus)

11. **Raskina A.V.** / Determination of the Structure of Linear Dynamic Objects in the Condition of Incomplete Information // Applied methods of statistical analysis. Nonparametric methods in cybernetics and system analysis Proceedings Of the international workshop 18-22 September 2017 pp. 115-120 (Scopus)

12. **Raskina A.V.** / On the Adaptive Control of Group of the Technical Processes under Incomplete Information / M. Kornet, A. Raskin, A. Raskina // Applied methods of statistical analysis. Nonparametric methods in cybernetics and system analysis Proceedings Of the international workshop 18-22 September 2017 pp. 104-108 (Scopus)

13. **Bannikova A.V. (Raskina A.V.)** / About the identification of dynamic processes. Computer data analysis and modeling: theoretical and applied stochastics / A.V. Bannikova, A.V. Medvedev, M. E. Kornet. // Proceedings of the International Conference. Minsk, 23-26 February, 2015 pp. 378-38

14. **Банникова А.В. (Раскина А.В)** / О непараметрических алгоритмах управления динамической системой / А.В. Банникова, А.В. Медведев // Труды XVII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах - 2015» г. Самара с.43-45

15. **Банникова А.В. (Раскина А.В)**/ О непараметрическом дуальном управлении многомерным объектом с запаздыванием / А.В. Банникова, А.А. Корнеева, М.Е. Корнет // Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '15 Москва 26-29 января 2015 г.

16. **Банникова А.В. (Раскина А.В)**/ О непараметрическом дуальном двухконтурном управлении динамическими процессами / А.В. Банникова, Корнет М.Е. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве as' 2015 труды x всероссийской научно-практической конференции с. 110-115

17. **Bannikova A.V. (Raskina A.V.)** / About the Dual Non-parametric Control of Dynamic System / A.V. Bannikova, M. E. Kornet, A.A. Korneeva // Proceeding of the international workshop. Applied methods of statistical analysis. Nonparametric approach // 14 – 19 September 2015 . Novosibirsk and Belokurikha с. 30-38

18. **Raskina A.V.** / About Nonparametric Dual control Algorithm / A.V.Raskina, A.A. Korneeva, A.V. Medvedev // System Analysis: Modeling and Control abstracts of the International conference in memory of Academician Arkady Kryazhimskiy. 2016. с. 69-71

19. **Раскина А.В.** / О непараметрическом управлении неустойчивыми динамическими системами / Медведев А.В., Раскина А.В. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2017. Труды всероссийской конференции, с.88-92

20. **Раскина А.В.** / Восстановление параметрической структуры модели линейного динамического объекта в условиях недостатка априорной информации // Материалы XXI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (08–11 ноября 2017, г. Красноярск) с. 245-247

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

21. Исследование процесса настройки параметров типовых регуляторов с использованием непараметрической модели. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014616687 дата 20.07.2014

22. Программа настройки параметров регуляторов с использованием непараметрической модели по реальным данным. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014661730 дата 11.11.2014

23. Непараметрические модели и двухконтурное адаптивное управление процессом кислородно-конвертерной плавки стали. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016611617 дата 09.12.2015

24. Непараметрическая идентификация технологических процессов производственного цикла. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017614092 дата 06.04.2017

25. Определение порядка линейного дифференциального уравнения с помощью непараметрической оценки регрессии. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017663508 дата 06.12.2017