

На правах рукописи



Майстренко Андрей Васильевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ  
СИГНАЛОВ, ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ  
В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Специальность 2.3.3 —  
Автоматизация и управление технологическими процессами  
и производствами

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Томск-2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научный консультант –** **Светлаков Анатолий Антонович,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Горюнов Алексей Германович,** доктор технических наук, доцент, профессор отделения ядерно-топливного цикла на правах кафедры Национального исследовательского Томского политехнического университета

**Мышляев Леонид Павлович,** доктор технических наук, профессор, директор ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (г. Новокузнецк)

**Ченцов Сергей Васильевич,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета (г. Красноярск)

**Ведущая организация –** Новосибирский государственный технический университет

Защита состоится 26 декабря 2024 года в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.02, созданного на базе ТУСУРа по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/a9v4ubut> и в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зайченко Татьяна Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** С целью повышения эффективности функционирования АСУТП, управляющие и информационно-измерительные подсистемы, являющиеся неотъемлемой частью любой АСУТП требуют непрерывного их совершенствования, а алгоритмы дифференцирования сигналов, являясь компонентами таких подсистем, играют критическую роль, поскольку оказывают прямое влияние на качество функционирования АСУ ТП. Задача дифференцирования сигналов является одной из тех задач, с которыми приходится сталкиваться в отраслях науки и техники, связанных с математическим моделированием различных динамических процессов и объектов, описываемых дифференциальными уравнениями, и с автоматизацией управления и регулирования данными процессами. Без умения эффективно решать данную задачу невозможно вести речь о создании цифровых регуляторов, обеспечивающих реализацию управления технологическими процессами в теплоэнергетике, металлургии, нефтехимии и т.п. в соответствии с заданными режимами и с достаточно высокой точностью. Без использования производных регулируемых переменных и знания оценок их значений невозможно создание автоматических регуляторов, обеспечивающих управление ТП в соответствии с заданными режимами и с высокой точностью.

Как известно из электро – и радиотехники, а также теории автоматического управления, основываясь на традиционных аналоговых дифференцирующих цепочках и усилителях, оказывается, невозможно создать идеальный или достаточно близкий к нему дифференциатор, позволяющий дифференцировать преобразуемый сигнал и получать достаточно точную оценку его производной. Основным препятствием, возникающем при создании таких дифференциаторов, является их физическая нереализуемость. Данное препятствие можно обойти, если при создании дифференциаторов основываться на современных средствах микропроцессорной техники и методах цифрового дифференцирования сигналов (ЦДС).

Задача ЦДС, значения которого заданы с ошибками, и получения точных оценок его производных является некорректной. Отмеченное выше делает очевидной актуальность проведения исследований существующих и создания новых методов ЦДС и выбора таких из них, которые наиболее пригодны для реализации с применением средств современной микропроцессорной техники и позволяющие достичь требуемых характеристик.

Анализ литературных источников, посвящённых различным проблемам и методам ЦДС, позволяет видеть, что в настоящее время имеется значительное число подобных методов и алгоритмов, основанных на использовании различных интерполяционных полиномов, аппроксимирующих функций, сплайнов и т.п. Основными требованиями, предъявляемыми к алгоритмам ЦДС, являются их быстрдействие, точность вычисляемых оценок производных и устойчивость вычисляемой производной к ошибкам задания дифференцируемого сигнала. В связи с противоречивостью данных требований, бывает сложно вос-

пользоваться каким–либо известным алгоритмом поэтому возникает потребность в алгоритмах, способных удовлетворить тем требованиям, которые необходимо выполнить при решении конкретной задачи.

### **Степень разработанности проблемы**

Теоретической основой исследований, обсуждаемых ниже, служили труды отечественных и зарубежных ученых и специалистов, в числе которых: Арсенин В.Я., Бабушка И., Бахвалов Н.С., Васин В.В., Грешилов А.А., Демидович Б.П., Ильин В.А., Коллатц Л., Марон И.А., Милн В.Э., Морозов В.А., Рабинер Л., Светлаков А.А., Сергиенко А.Б., Соболев С.К., Тихонов А.Н., Фаддеев Д.К., Фихтенгольц Г.М., Van der Schaft A., Schumacher H.

В настоящее время разработке новых алгоритмов ЦДС уделяется недопустимо мало внимания, причем данная тенденция сохраняется уже достаточно давно, и характерна как для российских, так и для зарубежных учёных.

**Цель и задачи исследования:** повышение эффективности управления технологическими процессами (ТП) различного уровня сложности в автоматических и автоматизированных системах управления (АСУ) путем обеспечения максимального быстродействия и повышения робастности свойств цифровых дифференциаторов в условиях, когда измеряемые сигналы содержат существенные ошибки. Изложенные выше проблемы и особенности задачи ЦДС явились стимулом для проведения дальнейших исследований с целью создания методов и алгоритмов ЦДС, которые бы в наиболее полной мере удовлетворяли описанным требованиям. Создание алгоритмов ЦДС, функционирующих в реальном масштабе времени, их исследование и практическая реализация и являются главной целью данной диссертации.

Таким образом, для достижения сформулированной цели исследования требуется решить важную научную проблему, суть которой заключается в необходимости создания АСУТП сложных ТП, а достижение данной цели возможно, только с применением методов и алгоритмов ЦДС, которые бы обладали высокими точностными характеристиками, были устойчивы к помехам и имели высокое быстродействие в режиме *on line*.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были сформулированы следующие задачи:

– выполнить аналитический обзор существующих АСУТП, позволяющий обосновать необходимость применения методов и алгоритмов ЦДС для массового их использования при производстве цифровых регуляторов и построения динамических АСУТП различного уровня сложности. Выбрать и обосновать направления исследований, математического аппарата и моделей, лежащих в основе синтеза регуляторов АСУТП;

– для линейных АСУ ТП с максимальным быстродействием разработать оригинальный способ регуляризации на примере алгоритма ЦДС, основанного на использовании решений интегральных уравнений В. Вольтерра, позволяющий повысить устойчивость вычисляемой производной сигнала к ошибкам его задания. Робастность и эффективность предлагаемого способа

регуляризации сравнить с методом регуляризации плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), предложенным академиком АН СССР Тихоновым А.Н. Разработать новые методы структурной регуляризации плохо обусловленных СЛАУ;

– для систем автоматического регулирования синтезировать метод и алгоритм ЦДС, основанный на применении многоточечного оценивания неизвестных величин по результатам их экспериментальных измерений и псевдообратных матрицах, позволяющий эффективно решать задачу дифференцирования, когда измерения в АСУТП поступают последовательно и имеющий более высокую помехоустойчивость, чем у традиционных методов вычисления производных;

– для нелинейных систем АСУТП, в качестве элемента математического обеспечения АСУТП, предложить модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений, обладающий более высокой скоростью сходимости вычисляемых решений к истинным решениям данных уравнений и требующий меньших объемов вычислений, необходимых для получения решений с желаемой точностью по сравнению с исходным методом;

– для АСУТП магистральными трубопроводами, синтезировать метод и алгоритм автоматизированного определения интервалов стационарности процессов, основанный на применении алгоритма ЦДС с использованием значений сигналов и значений их производных, имеющий высокую точность идентификации момента времени изменения состояния ТП на противоположное и позволяющий оператору АСУТП самостоятельно выбирать доверительные интервалы стационарности;

– для линейных АСУТП, в качестве элемента математического обеспечения АСУ ТП синтезировать модифицированный алгоритм Грама-Шмидта, позволяющий уменьшить неустойчивость решения СЛАУ по отношению к ошибкам задания ортонормируемых векторов и ошибкам вычисления решений, необходим для АСУТП, измерения в которую поступают последовательно в режиме реального времени;

– для тестирования алгоритмов матричных вычислений АСУТП синтезировать модифицированный метод обращения малых вещественных чисел, основанный на применении математики «длинных чисел», позволяющий получить характеристики матриц Гильберта, до сотого порядка и выше;

– разработать модифицированный ПИД-регулятор, основанный на применении алгоритма ЦДС, имеющий более высокую точность, минимальное перерегулирование, высокую скорость выхода на заданные режимы и обладающий более высокой помехоустойчивостью;

– синтезировать метод автоматического регулирования объектов, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнениях, описывающих связи между значениями регулируемой переменной объекта и управляющих воздействий, формируемых регулятором, позволяющий избежать от процедуры дифференцирования, обуславливающей неустойчивость

как ПИД– регулирования, так и других законов регулирования, в которых используется производная.

### **Объект и предмет исследования**

*Объектом исследования* являются управляющие и информационно-измерительные подсистемы АСУ ТП, методы и алгоритмы ЦДС, и их программная реализация, позволяющая реализовать синтез цифровых регуляторов, а также модифицированные методы и алгоритмы решения нелинейных скалярных уравнений и плохо обусловленных СЛАУ необходимых для синтеза алгоритмов ЦДС.

*Предмет исследования* – основные свойства синтезированных методов ЦДС, алгоритмов и методов оценки первой и более высокого порядка производных дифференцируемого сигнала в режиме реального времени. Исследование свойств и возможностей модифицированных методов и алгоритмов решения нелинейных скалярных уравнений и плохо обусловленных СЛАУ.

**Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, линейной алгебры, а также методы оптимизации и численного моделирования. При создании программного обеспечения для исследований синтезированных алгоритмов использовался пакет программ MATLAB, а также написанные специально для него модули, позволяющие в полной мере исследовать все основные характеристики и свойства предлагаемых алгоритмов.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается применением строгих математических методов решения задач, обоснованным использованием современных технологий разработки программного обеспечения, тестированием всех программных модулей, экспериментальным исследованием предложенных алгоритмов, а также результатами их внедрения и эксплуатации.

**Научная новизна** диссертации заключается в том, что:

– для линейных АСУТП с максимальным быстродействием разработан оригинальный способ регуляризации на примере метода ЦДС, основанного на использовании решений интегральных уравнений В. Вольтерра. Синтезированы два метода структурной регуляризации плохо обусловленных СЛАУ;

– для систем автоматического регулирования синтезирован и программно реализован метод ЦДС, основанный на применении многоточечного оценивания неизвестных величин по результатам их экспериментальных измерений и псевдообратных матрицах;

– для нелинейных систем АСУТП, в качестве элемента математического обеспечения АСУТП, разработан модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений, обладающий более высокой скоростью сходимости вычисляемых решений к их истинным решениям;

– для АСУТП магистральными трубопроводами, синтезирован метод и алгоритм автоматизированного определения интервалов стационарности про-

цессов, основанный на применении алгоритма ЦДС с использованием значений сигналов и значений их производных, имеющий высокую точность и позволяющий оператору АСУТП самостоятельно выбирать доверительные интервалы стационарности;

– для линейных АСУТП, в качестве элемента математического обеспечения АСУ ТП синтезирован модифицированный алгоритм Грама-Шмидта, позволяющий снизить неустойчивость решения по отношению к ошибкам задания ортонормируемых векторов и ошибкам вычисления решений и позволяющий обрабатывать значения входных переменных, поступающих в систему последовательно в режиме реального времени;

– для тестирования систем АСУТП синтезирован модифицированный метод обращения малых вещественных чисел, основанный на применении математики «длинных чисел», позволяющий получить характеристики матриц Гильберта, до сотого порядка и выше, ее применение позволяет тестировать алгоритмы матричных вычислений;

– синтезирован оригинальный ПИД-регулятор на базе алгоритма ЦДС, основанного на применении скользящей квадратичной аппроксимации дифференцируемого сигнала и псевдообратных матрицах, обладающий существенными преимуществами по сравнению с «классическим» регулятором;

– для автоматического регулирования объектов, синтезирован метод, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнениях, описывающих связи между значениями регулируемой переменной объекта управления (ОУ) и управляющих воздействий, формируемых регулятором.

**Соответствие шифру специальности.** Исследования, представленные в диссертационной работе, соответствуют специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, следующим его пунктам: 5. – научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами; 11. – методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия; 12. – методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени; 16. – средства и методы проектирования и разработки технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что в ней решена актуальная научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение. Для управляющих и информационно-измерительных подсистем АСУ ТП

синтезированы и реализованы новые методы и алгоритмы ЦДС, которые представляют высокую теоретическую ценность, так как на их основе можно создать целый ряд новых алгоритмов, позволяющих разрабатывать новейшие автоматические регуляторы, которые можно применять в АСУТП любой степени сложности. Теоретическая значимость подтверждена экспериментальным путем.

Предложен новый подход к синтезу методов автоматического регулирования объектов, основанный на использовании концепции обратных задач динамики, автоматизированному решению задач исследования, функционирования и проектирования сложных технических управляемых систем.

#### **Практическая значимость.**

В АО «ЭлеСи» алгоритмы ЦДС использованы при разработке регуляторов различного типа и назначения, там же разработан и программно реализован новый метод определения стационарности процессов, основанный на применении алгоритма ЦДС с использованием скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц используемый в АСУ магистральными нефтепроводами.

По заказу компании «Сибagro Мясопереработка» разработана АСУ вагонными камерами «Маутинг», для этого был изготовлен специализированный регулятор, при разработке которого был применен алгоритм, основанный на использовании скользящей аппроксимации дифференцируемого сигнала алгебраическими полиномами второго порядка.

Практическое использование алгоритма ЦДС, основанного на применении скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц, было реализовано в виде ПИД-регулятора, функционирующего в реальной автоматизированной системе управления шкафами автоматики в филиале «Новолипецкого Metallургического комбината» в г. Томске, там же был разработан и программно реализован адаптивный регулятор, в основе которого использован метод автоматического регулирования процессов, основанный на концепции обратных задач динамики, интегрированный в устройство автоматизированного управления прессом «Lindeman LIS-616».

По заказу ОАО АКБ «Якорь-2» (г. Москва) при синтезе регуляторов цифровой системы управления транзисторным преобразователем частоты был использован алгоритм ЦДС, основанный на использовании многоточечного оценивания неизвестных величин по их экспериментальным измерениям и псевдообратных матриц. Использование данного алгоритма позволяет упростить программную и аппаратную реализацию регулятора, а также повысить точность поддержания параметров выходной энергии системы СГА-ОН (Система автономного генерирования электроэнергии для поддержания летной годности воздушных судов Ту-214) в динамических режимах. Работы выполнены в рамках совместного с НГТУ х/д на тему «Разработка программного обеспечения для моделирования компонентов системы СГА-ОН, выдача рекомендаций для пользователя»

## **Положения, выносимые на защиту**

На основе проведенного анализа существующих АСУТП, методов ЦДС и решения задачи дифференцирования, получены следующие оригинальные результаты направленные на повышение эффективности функционирования АСУТП:

– оригинальный способ регуляризации, позволяющий повысить устойчивость вычисляемой производной сигнала к ошибкам его задания и имеющий высокое быстродействие. Два метода структурной регуляризации плохо обусловленных СЛАУ. Результаты экспериментальных исследований;

– синтезирован и программно реализован метод ЦДС, основанный на применении многоточечного оценивания неизвестных величин на основе экспериментальных измерений;

– модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений, обладающий более высокой скоростью сходимости вычисляемых решений и требующий меньших объемов вычислений, необходимых для получения решений с желаемой точностью;

– метод и алгоритм автоматизированного определения интервалов стационарности процессов для АСУТП магистральными трубопроводами, имеющий высокую точность, помехоустойчивость и позволяющий варьировать доверительные интервалы стационарности;

– модифицированный алгоритм Грама-Шмидта, позволяющий снизить неустойчивость решений и обрабатывать значения входных переменных, поступающих в систему последовательно;

– модифицированный метод обращения малых вещественных чисел, основанный на применении математики «длинных чисел», позволяющий получить характеристики матриц Гильберта, до сотого порядка и выше и его применения для тестирования алгоритмов матричных вычислений;

– оригинальный ПИД-регулятор, обладающий более высокой помехоустойчивостью, точностью и качеством регулирования по сравнению с «классическим» ПИД-регулятором, некоторые результаты моделирования;

– метод, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнений, описывающих связи между значениями регулируемой переменной ОУ и управляющих воздействий, формируемых регулятором, применим для управления как линейными ОУ, так и нелинейными;

– результаты практического применения синтезированных методов, алгоритмов и программ при проектировании различных устройств автоматического и автоматизированного управления в АО «ЭлеСи», в компании АО «Сибирская Аграрная Группа Мясопереработка», на предприятии «НЛМК Сибирь» в г. Томске и «Новосибирском государственном техническом университете» (подтверждено актами внедрения).

**Достоверность результатов.** Обеспечивается применением строгих математических методов решения задач, обоснованным использованием современных технологий разработки программного обеспечения, тестированием

всех программных модулей, экспериментальным исследованием предложенных алгоритмов, а также результатами внедрения и эксплуатации.

Исследования адекватности построенных моделей подтверждают достоверность полученных результатов. Численные методы были сравнены с результатами теоретических расчетов, а также с результатами, полученными в аналогичных комплексах программ.

### **Использование результатов исследований.**

Научные исследования по теме диссертационной работы велись:

1. в рамках проекта № 2249 «Разработка теоретических основ синтеза алгоритмов вычисления обобщенных обратных матриц для решения некорректных задач автоматического управления» 2009 – 2011 гг., выполняемого по заданию Рособразования по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)»;

2. научно – исследовательской работы, выполняемой в рамках государственного задания, за 2013 год, номер государственной регистрации НИР: 1.1874.2011 проект 5/12 «Создание методов и алгоритмов структурной регуляризации плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и их программная реализация» 2012-2014 гг.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах, семинарах: XXXIX научно – техническая конференция студентов, молодых ученых и аспирантов. – Уфа, 1988; II Всесоюзная научно – техническая конференция «Микропроцессорные системы автоматики». – Новосибирск, 1991; IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные средства и системы автоматизации» – Томск, 2003; межд. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ». – (Томск, 2004, 2006, 2009); межд. конф. "Научная сессия ТУСУР". – Томск, 2006; Всероссийской научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2008; IV научно-технической конференции с международным участием Электротехника, электроника и электротехнологии ЭЭЭ–2009, Новосибирск, 2009; межд. конф. «Силовая электроника и энергоэффективность». Украина, (Киев, 2009, 2010 СЕЕ, 2011, 2012, Харьков – 2013, Одесса – 2014); межд. конф. «Перспективные инновации, в науке, образовании, производстве и транспорте 2009». Одесса – 2009; межд. конф. «Проблемы современной электротехники – 2010», Украина, Киев – 2010; 34-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 08-14 сентября 2024. г. Севастополь, Россия.

**Публикации.** Основные результаты исследований по теме диссертации отражены в 51 публикациях, цитируемых по ходу изложения материала. Из них 16 (шестнадцать) в журналах, входящих в перечень периодических научных изданий, рекомендуемых ВАК, 5 (пять) в изданиях, индексируемых в международных цитатно–аналитических базах данных Web of Science и Scopus. Результаты исследования нашли отражение в 2 отчетах НИР, 2 монографиях, 2 учебных пособиях и одном учебнике.

**Структура и объем диссертации.** В состав диссертации входит введение, 6 глав, заключение, список литературы из 169 наим., приложения на 5 страницах. Объем диссертации без приложений – 333 с., в т.ч. 69 рисунков, 12 таблиц.

**Личный вклад.** Результаты диссертационной работы, соответствующие поставленным задачам и сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены автором лично. Диссертация написана с использованием результатов, полученных лично автором или при его участии на всех этапах решения поставленных задач. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее пятидесяти процентов.

Автор выражает глубокую признательность научному консультанту профессору Светлакову Анатолию Антоновичу за всестороннюю помощь и ценные замечания при выполнении и написании диссертационной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена актуальность работы, сформулированы задачи, научная новизна и защищаемые положения, отмечены теоретическая и практическая значимость исследований.

**В первой главе** приводится обоснование решения научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. Как известно, при создании сложных АСУТП необходимо использование первой и более высокого порядка производных регулируемых переменных и знания достаточно точных оценок их значений, иначе невозможно создать и реализовать автоматический регулятор, имеющий высокие быстродействие и точность регулирования. Разработка и реализация новых методов и алгоритмов ЦДС, открывают широкие возможности при создании новейших цифровых регуляторов и иных устройств функционирующих, с высоким быстродействием в современных АСУ ТП. Новые методы и алгоритмы ЦДС, представляют высокую теоретическую ценность, так как на их основе можно создать целый ряд новых алгоритмов, позволяющих разрабатывать новейшие автоматические регуляторы, которые можно применять в управляющих и информационно-измерительных подсистемах АСУ ТП любой степени сложности. Ниже на рисунке 1 изображена типовая схема АСУ ТП. В блоке - «Цифровой регулятор. Дифференциатор и иные средства контроля функционирования технических и программных средств АСУ ТП», располагаются разработанные в данной диссертационной работе, программные и аппаратные средства контроля и управления АСУ ТП, на основе синтезированных методов и алгоритмов ЦДС.

Формулируется постановка задачи ЦДС и осуществляется анализ ее особенностей. Проводится краткий обзор существующих методов решения рассматриваемой задачи, и анализируются их достоинства и недостатки. Известная особенность обсуждаемой задачи состоит в том, что она является одним из классических примеров некорректных задач. Сформулированы требования к алгоритмам ЦДС в реальном масштабе времени.



Рисунок 1. Типовая схема АСУ ТП

Постановка задачи ЦДС и анализ ее особенностей.

1. Интересующий нас сигнал  $S$  является некоторой функцией  $s$  времени  $t$ , удовлетворяющей равенству

$$s = s(t), \quad (1)$$

и эта функция является непрерывной и хотя бы один раз дифференцируемой.

2. Измерения сигнала  $S$  осуществляются в дискретные и равноотстоящие моменты времени  $t_k$ ,  $k=1, 2, 3, \dots$ , связанные рекуррентным соотношением

$$t_k = t_{k-1} + \Delta t, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – некоторый постоянный интервал времени  $t$ , а  $t_0 = 0$ .

3. Измеренные значения  $\tilde{S}_k = \tilde{S}(t_k)$  сигнала  $S$  являются аддитивной смесью истинных значений  $S_k = S(t_k)$  сигнала  $S$  и ошибок его измерения  $\varepsilon_k = \varepsilon(t_k)$  и удовлетворяют равенствам

$$\tilde{S} = s_k + \varepsilon_k, \quad k=0, 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

4. Ошибки измерения  $\varepsilon_k$  являются значениями случайных величин  $\mathcal{E}_k$ ,  $k=0, 1, 2, 3, \dots$ , удовлетворяющих условиям вида

$$\text{а) } M\{\mathcal{E}_k\} = 0; \quad \text{б) } D\{\mathcal{E}_k^2\} = \sigma_k^2 \quad \text{и} \quad \text{в) } K\{\mathcal{E}_k \mathcal{E}_{k-1}\} = M\{\mathcal{E}_k \mathcal{E}_{k-1}\} = 0, \quad (4)$$

где  $M\{\mathcal{E}_k\}$  и  $D\{\mathcal{E}_k^2\}$  – математическое ожидание и дисперсия случайной величины  $\mathcal{E}_k$ , а  $M\{\mathcal{E}_k \mathcal{E}_{k-1}\}$  – ковариация случайных величин  $\mathcal{E}_k$  и  $\mathcal{E}_{k-1}$ ;  $\sigma_k^2$  – некоторое ограниченное неотрицательное число. Данные условия означают соответственно, что  $\mathcal{E}_k$  являются центрированными случайными величинами, имеющими ограниченные дисперсии, равные  $\sigma_k^2$ , и случайные величины  $\mathcal{E}_k$  и  $\mathcal{E}_{k-1}$  при всех значениях  $k$  и  $k-1$  не коррелированы.

5. В каждый момент времени  $t_k$  у нас имеются  $m$  измеренных значений

$$\tilde{s}_{k-m+1}, \tilde{s}_{k-m+2}, \dots, \tilde{s}_{k-1}, \tilde{s}_k, \quad (5)$$

Сигнала  $S$ , полученных в моменты времени  $t_{k-m+1}, \dots, t_{k-1}, t_k$ . Здесь  $m$  – некоторое ограниченное натуральное число.

Сущность задачи ЦДС заключается в том, чтобы, используя имеющиеся в момент времени  $t_k$  измеренные значения (5), вычислять оценку  $\hat{p}_k$  его производной  $p_k$ , определяемой равенством

$$p_k = ds(t_k)/dt, \quad (6)$$

и делать это таким образом, чтобы разность  $\hat{p}_k$  и  $p_k$  имела как можно меньшее значение. Иначе говоря, оценка  $\hat{p}_k$  должна вычисляться так, чтобы имело место приближенное равенство

$$\hat{p}_k \approx p_k \quad (7)$$

и это равенство выполнялось как можно точнее.

Лучшим решением данной задачи является такая оценка  $\hat{p}_k$  производной  $p_k$ , при которой (7) превращается в строгое равенство. Однако получить такую оценку производной  $p_k$ , используя для её вычисления измеренные значения (3), содержащие в себе ошибки измерения, невозможно.

Анализ литературных источников, посвящённых различным проблемам и методам ЦДС  $s=s(t)$ , позволяет классифицировать данные методы и выделить следующие пять групп или классов методов ЦДС:

- 1) методы, основанные на использовании конечных приращений дифференцируемого сигнала и времени;
- 2) методы, основанные на использовании интерполяционных полиномов различных порядков;
- 3) методы, основанные на использовании сплайнов;
- 4) методы, основанные на использовании различных аппроксимирующих функций;
- 5) методы, основанные на использовании интегральных уравнений.

Ни один из этих методов не удовлетворяет в полной мере всем предъявляемым к ним требованиям и не является универсальным. Поэтому задача разработки новых методов ЦДС, заданных таблично, является весьма актуальной.

Под табличным заданием сигнала  $s=s(t)$ , будем понимать задание его таблицей вида

$$(t_i, s_i), i = \overline{1, m}, \quad (8)$$

где  $m$  – некоторое ограниченное натуральное число, а  $s_i = s(t_i)$  и при этом все заданные значения  $t_i$  аргумента  $t$  являются различными вещественными числами. Особенно актуальной она оказывается при решении задач, связанных с созданием новых цифровых регуляторов, создание которых невозможно без точных и быстродействующих цифровых дифференциаторов. Сегодня многие современные ПИД–регуляторы используют в своем алгоритме вторую и более высокого порядка производные.

В связи с тем, что решаемая задача ЦДС служит базисом для создания различного типа АСУ ТП. Поэтому любой алгоритм решения данной задачи, должен удовлетворять следующим трём требованиям:

а) он должен быть предельно экономичным и обладать высоким быстродействием;

б) его применение должно обеспечивать высокую точность вычисляемой с его помощью производной дифференцируемого сигнала;

в) он должен быть максимально робастным и обеспечивать высокую устойчивость вычисляемой производной к ошибкам задания дифференцируемого сигнала.

Приведенные требования, являются противоречивыми и удовлетворить в полной мере и одновременно им невозможно. При выборе алгоритма ЦДС в каждом конкретном случае необходимо учитывать то из требований, удовлетворение которому в данном случае оказывается наиболее важным.

Методы и алгоритмы ЦДС, основанные на применении простейшего алгоритма дифференцирования.

Под алгоритмом ЦДС, основанным на использовании конечных приращений дифференцируемого сигнала и времени, принято понимать алгоритм вида

$$\tilde{p}_t = \Delta \tilde{s}_t / \Delta t, t = 1, 2, 3, \dots, \quad (9)$$

где  $\tilde{p}_t$  – оценка производной,  $\Delta \tilde{s}_t = \tilde{s}_t - \tilde{s}_{t-1}$  – конечное приращение сигнала  $S$ ,  $\tilde{s}_t$  и  $\tilde{s}_{t-1}$  – его значения, измеренные в моменты времени  $t$  и  $t-\Delta t$ , являющиеся аддитивной смесью истинных значений сигнала и ошибки их измерения  $\varepsilon_t = \varepsilon(t)$  и соответственно, удовлетворяют равенствам

$$\text{а) } \tilde{s}_{t-1} = \tilde{s}(t - \Delta t) = s_{t-1} + \varepsilon_{t-1} \quad \text{и б) } \tilde{s}_t = \tilde{s}(t) = s_t + \varepsilon_t. \quad (10)$$

Анализируя равенства (9)–(10), можно видеть, что для вычисления оценки  $\tilde{p}_t$ , необходимо и достаточно иметь лишь два измеренных значения  $\tilde{s}_t$  и  $\tilde{s}_{t-1}$  дифференцируемого сигнала и выполнить арифметические операции вычитания и деления двух вещественных чисел. Поскольку дискретные моменты времени  $t$  являются равноотстоящими, то последнюю операцию можно заменить операцией умножения на число  $\Delta t^{-1}$ .

Сделаем следующие четыре замечания. Во – первых, если необходимо создать АСУ ТП, в которой должны использоваться алгоритмы ЦДС, и затратить на её создание как можно меньше ресурсов, необходимо ориентироваться именно на рассматриваемый алгоритм.

Во – вторых, достоинством данного алгоритма является то, что его практическое применение не требует каких – либо априорных сведений о дифференцируемом сигнале  $S$  и его производных. Для его применения необходимо и достаточно иметь лишь несколько значений переменных  $t$  и  $s$ .

В – третьих, если считать приращения  $\Delta t$  и  $\Delta s_t$  заданными точно и при этом пренебречь ошибками вычисления их отношения  $\Delta s / \Delta t$ , то можно считать, что оценка  $\hat{p}_t = \overset{\wedge}{ds/dt}$  производной  $p_t$  удовлетворяет равенству

$$\overset{\wedge}{p}_t = p_t + \Delta_t, \quad (11)$$

где  $\Delta_t$  – составляющая ошибки вычисления производной  $p_t$ , обусловленная использованием конечных приращений  $\Delta t$  и  $\Delta s$  вместо бесконечно малых  $dt$  и  $ds$ .

В – четвёртых, данный метод является весьма чувствительным как к ошибкам задания приращений  $\Delta t$  и  $\Delta s_t$ , так и к ошибкам вычислений. Действительно, пусть вместо точно заданных значений  $s_{t-1}$  и  $s_t$  сигнала  $S$  мы имеем значения  $\tilde{s}_t$ , удовлетворяющие равенствам (10). Составив отношение

$$\Delta \tilde{s}_t / \Delta t = (\tilde{s}_t - \tilde{s}_{t-1}) / \Delta t$$

и подставив в него значения  $\tilde{s}_t$  и  $\tilde{s}_{t-1}$  в соответствии с равенствами (10), будем иметь

$$\Delta \tilde{s}_t / \Delta t = (\tilde{s}_t - \tilde{s}_{t-1}) / \Delta t + \Delta_\varepsilon = p_t + \Delta_\varepsilon. \quad (12)$$

Слагаемое  $\Delta_\varepsilon$  в данном случае определяется равенством

$$\Delta_\varepsilon = (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}) / \Delta t \quad (13)$$

и является составляющей ошибки вычисления производной  $p_t$ , обусловливаемой наличием ошибок  $\varepsilon_t$  и  $\varepsilon_{t-1}$  в задании значений сигнала  $S$ .

Из равенств (12) и (13) видно, что если  $\varepsilon_t$  и  $\varepsilon_{t-1}$  имеют малые, но конечные значения, то при достаточно малых значениях  $\Delta t$  ошибка  $\Delta_\varepsilon$  может принять сколь угодно большое значение и оказаться по модулю существенно больше, чем производная  $p_t$ . Данное обстоятельство иллюстрирует необходимость регуляризации алгоритма, т.е. уменьшения его чувствительности к ошибкам в задании значений  $s_t$  дифференцируемого сигнала  $S$ . Это можно сделать за счёт увеличения  $\Delta t$ . Но, учитывая характер влияния приращения  $\Delta t$

на погрешность  $\Delta_t$ , можно видеть, что возможности увеличения  $\Delta t$  ограничены, так как при этом увеличивается и абсолютное значение ошибки  $\Delta_t$ , обусловливаемой использованием приращений  $\Delta t$  и  $\Delta s$  вместо бесконечно малых величин  $dt$  и  $ds$ . Отметим влияние величины  $\Delta t$  на погрешность формул ЦДС. Данный вопрос рассмотрен Бахваловым Н.С. и иллюстрируется рисунком 2. В данной работе показано что, суммарная погрешность формул ЦДС имеет две составляющие, первой из которых является погрешность аппроксимации дифференцируемого сигнала, а вторая – это погрешность оценки производной, обусловливаемая наличием шумов в измеряемом сигнале.

На рисунке 2 по оси абсцисс откладываются значения величины  $\Delta t$ , а по оси ординат - значения величины погрешности вычисления производной сигнала  $\varepsilon$ . При этом прямая 1 характеризует зависимость погрешности аппроксимации дифференцируемого сигнала от величины шага дискретизации и, как видно из рисунка 1, с увеличением  $\Delta t$  растет и погрешность.

Зависимость погрешности оценки производной, обусловливаемой наличием шумов в измеряемом сигнале от величины  $\Delta t$  представлена кривой 2, данная составляющая монотонно увеличивается с уменьшением величины  $\Delta t$  и при очень малых значениях  $\Delta t$ , может принимать очень большие значения. Величину  $\Delta t$  необходимо выбирать так, чтобы суммарная погрешность дифференцирования, представленная кривой 3, была минимальной.

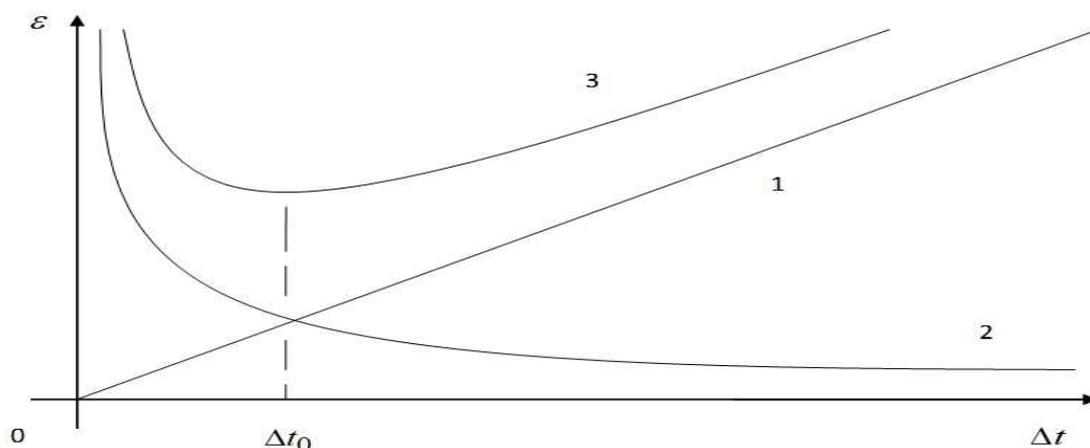


Рисунок 2. Выбор шага аппроксимации

Минимальная погрешность дифференцирования получается при таком  $\Delta t$ , при котором кривые 1 и 2 пересекаются, кривая 3, при этом, достигает своего минимума. Как видно из рисунка кривая 3 не имеет явно выраженного минимума, следовательно, достаточно выбрать значение  $\Delta t$ , таким образом, чтобы оно находилось в окрестности минимума кривой 3.

Предложен оригинальный способ регуляризации простейшего алгоритма ЦДС, основанный на использовании псевдообратных матриц и псевдорешений СЛАУ. Применение данных матриц и вариации вычисляемых оценок про-

изводной дифференцируемого сигнала позволило синтезировать алгоритм вычисления оптимальных значений параметра регуляризации, обеспечивающих наиболее высокую точность результатов дифференцирования.

Построена зависимость погрешности ЦДС от значений параметра регуляризации в окрестности его оптимальных значений, иллюстрирующая возможность реализации предложенного выбора численных значений параметра регуляризации, при оптимальном его значении погрешность вычисления производной дифференцируемого сигнала снижается минимум на 30%.

Результаты экспериментальных исследований предлагаемого способа регуляризации ЦДС позволяют заключить, что он вполне пригоден и доступен для применения в рамках различных АСУТП, систем контроля и т.п.

1. Предложенный нетрадиционный метод регуляризации задачи ЦДС позволяет решать данную задачу не менее успешно, чем это можно сделать с применением метода, предложенного академиком А.Н. Тихоновым.

2. Нетрадиционный метод регуляризации позволяет выбрать оптимальные значения параметра регуляризации, исходя из относительной ошибки измерения сигнала, указанной в эксплуатационно-технической документации измерительного устройства.

3. Для всех рассмотренных в работе видов сигналов предложенный метод регуляризации позволяет получить более точные оценки производных в сравнении с традиционным методом регуляризации. Для некоторых сигналов он позволяет снизить ошибку дифференцирования на 70%.

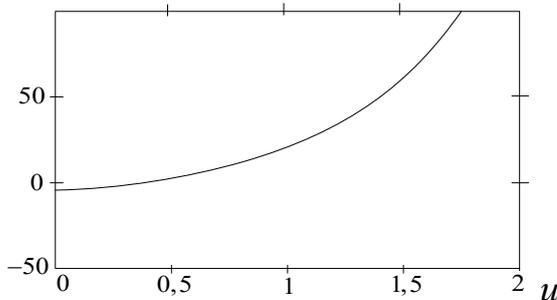
4. Важной особенностью нетрадиционного метода регуляризации является его идейная простота. Он не требует использования различного рода сглаживающих и стабилизирующих функционалов, позволяет достаточно просто использовать имеющуюся информацию об ошибках задания дифференцируемого сигнала и их вероятностно – статистических характеристиках.

**Вторая глава** посвящена методу дихотомии (МД), в ней приведены основные положения, проблемы терминологии и инспекционный анализ МД. Синтезирован модифицированный МД решения нелинейных скалярных уравнений (НСУ) и приведены некоторые результаты его исследований. При создании АСУ ТП часто приходится сталкиваться с задачей решения различного рода НСУ. МД обладает целым рядом достоинств, но в настоящее время не нашел широкого практического использования, причиной его малой популярности является низкая скорость сходимости последовательности приближенных решений, и большие объемы вычислений, необходимые для получения точных решений. В разделах 2.4 и 2.5 предложен модифицированный вариант МД, позволяющий получать более быстросходящиеся последовательности приближенных решений НСУ и требующий меньших объемов вычислений. Решением ряда НСУ проиллюстрирована более высокая скорость сходимости решений, вычисляемых с применением модифицированного МД и, обосновано преимущество нового метода для его использования при создании АСУТП. Рассмотрим результаты исследований, выполненных для сравнения

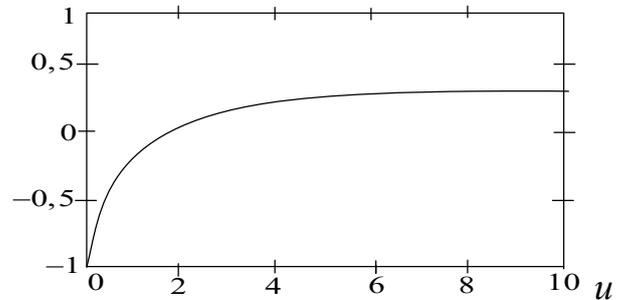
скорости сходимости и точности приближенных решений, вычисляемых методом деления отрезка пополам (МДОП) и модифицированным методом деления отрезка пополам (ММДОП), 4-х нелинейных уравнений, чтобы провести сравнение методов при всех возможных типах монотонных функций. Таких функций 4 и они характеризуются следующими особенностями:

1. монотонно возрастающие функции ( $d\varphi/du > 0$ ) с монотонно возрастающей скоростью ( $d^2\varphi/du^2 > 0$ );
2. монотонно возрастающие функции ( $d\varphi/du > 0$ ) с монотонно убывающей скоростью ( $d^2\varphi/du^2 < 0$ );
3. монотонно убывающие функции ( $d\varphi/du < 0$ ) с монотонно возрастающей скоростью ( $d^2\varphi/du^2 > 0$ );
4. монотонно убывающие функции ( $d\varphi/du < 0$ ) с монотонно убывающей скоростью ( $d^2\varphi/du^2 < 0$ ).

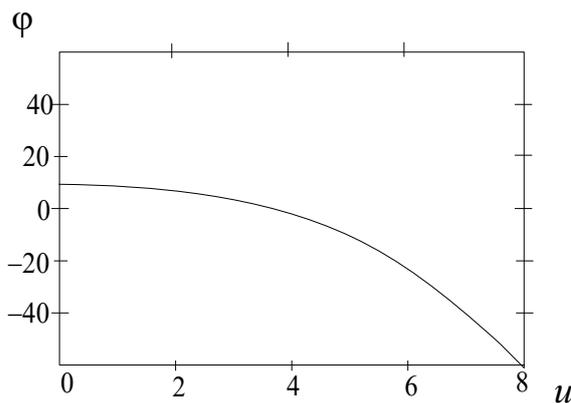
Конкретный вид соотношений, определяющих данные функции и их графики, приведены на рисунке 2.



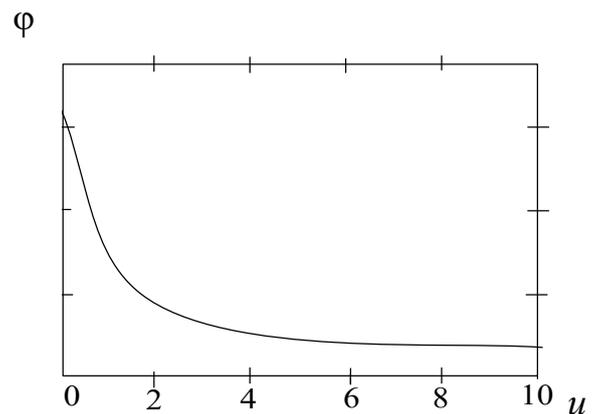
а)  $3u^4 + 4u^3 + 12u^2 - 5 = 0$



б)  $\arctg(u) - 1 = 0$



в)  $\varphi(u) = 10 - u \lg u$



г)  $\varphi(u) = \frac{3}{u^3 + u + 1} - 0,5$

Рисунок 2 – Аналитические и графические представления функций, использованных для получения уравнений.

Полученные при этом результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

№	Вид уравнения	Отрезок $I_{u0}$	Количество итераций		Вычисленное решение	
			ММДОП	МДОП	ММДОП	МДОП
$\Delta u = 1 \cdot 10^{-4}$						
1	$3u^4 + 4u^3 + 12u^2 - 5 = 0$	[0,1]	11	14	0,5722	0,5722
2	$\arctg(u) - 1 = 0$	[1,2]	10	14	1,5574	1,5573
3	$3/(u^3 + u + 1) - 0,5 = 0$	[1,2]	10	14	1,5160	1,5159
4	$10 - u^2 \cdot \log(u) = 0$	[3,5, 5]	7	14	4,0554	4,0555

Отметим некоторые факты, легко обнаруживаемые при рассмотрении представленных выше результатов.

**Во-первых**, точности приближенных решений  $u_k$ , вычисляемых сравнимыми методами решения нелинейных уравнений, при всех заданных погрешностях  $\Delta u$  оказываются практически одинаковыми для всех типов монотонных функций и эта равнозначность решений  $u_k$  имеет место при изменении задаваемых погрешностей  $\Delta u$  в пределах от  $\Delta u = 10^{-4}$  до  $\Delta u = 10^{-8}$

**Во-вторых**, количество итераций, необходимых для вычисления решений  $u_k$  с заданной точностью при использовании ММДОП оказывается на (20–50)% меньше, чем в случае использования МДОП и это неравенство имеет место как при всех задаваемых значениях  $\Delta u$ , так и при всех типах монотонных функций.

Отмеченные выше факты, характеризующие точность приближенных решений и количество итераций, потребовавшихся для их вычисления с применением ММДОП и МДОП, сохраняются и при уменьшении погрешности  $\Delta u$  до  $\Delta u = 10^{-13}$ .

Выявленные особенности ММДОП иллюстрируют привлекательность его применения в АСУ ТП и позволяют однозначно заключить, что:

1) из всех известных методов решения НСУ применение данного метода обеспечивает наиболее широкие возможности для создания робастных АСУ;

2) круг данных возможностей можно расширить, если приемлемым с точки зрения реализации в режиме реального времени способом увеличить скорость сходимости решений НСУ, вычисляемых с его применением.

Результаты исследований МДОП и ММДОП позволяют заключить, что:

3) предложенный ММДОП обладает всеми важнейшими свойствами МДОП и, таким образом, с точки зрения практических приложений он оказывается не менее полезным, чем МДОП;

4) применение ММДОП более предпочтительно по сравнению с МДОП во всех случаях, используемый метод решения НСУ должен обеспечивать более высокую скорость сходимости вычисляемых решений к истинным решениям данных уравнений;

5) предложенный ММДОП имеет высокую практическую значимость и может быть крайне полезен при создании современных АСУ ТП;

6) приведены результаты решения 4-х нелинейных уравнений, иллюстрирующие более высокую скорость сходимости решений, вычисляемых с применением предложенной модификации.

**Третья глава** посвящена разработке нетрадиционных и модификации существующих методов и алгоритмов ЦДС. Детально представлено описание метода ЦДС, основанного на скользящей аппроксимации дифференцируемого сигнала квадратичными полиномами и псевдообратных матрицах с предварительной фильтрацией сигнала, реализующей скользящее усреднение его значений. Изложена сущность предлагаемого метода, состав и последовательность вычислительных операций, которые необходимо выполнить для вычисления первой и второй производных сигнала  $s=s(t)$  в момент времени  $t$ .

Приводятся некоторые результаты исследований и сравнения двух методов вычисления первой и второй производной, способы решения условных СЛАУ и алгоритм вычисления псевдообратных матриц.

Опираясь на представленные результаты, сформулированы следующие выводы.

1. Предложенный метод ЦДС, когда аппроксимирующая функция является алгебраическим полиномом  $n$  – го порядка, не пользуясь штатными процедурами дифференцирования позволяет с высокой точностью вычислять, как значение самого сигнала, так и значения его производных.

2. Предложенный метод имеет в несколько раз более высокую помехоустойчивость, чем методы основанные на штатных процедурах дифференцирования.

3. Одновременно с перечисленными выше достоинствами, следует отметить простоту предлагаемого метода.

4. Изложенный нетрадиционный подход к постановке и решению задачи синтеза методов ЦДС, основанный на ее сведении к решению недоопределенной СЛАУ, является принципиально новым и позволяет получить не только все известные методы оценивания неизвестных величин по их непосредственным и косвенным экспериментальным измерениям, но и синтезировать сколь угодно много методов подобного назначения.

В данной главе синтезируется новый метод ЦДС, основанный на использовании многоточечного оценивания неизвестных величин по их экспериментальным измерениям и псевдообратных матриц. Приводятся нетрадиционный подход к математической постановке и решению задачи синтеза методов ЦДС и некоторые результаты аналитических исследований, вычисляемых с применением синтезированного метода и алгоритма, иллюстрирующие его пригодность для применения в АСУ ТП различного назначения.

Изложенные результаты исследований характеристик оценок производной позволяют заключить, что:

1) как и при традиционном подходе к постановкам и решению задачи ЦДС увеличение числа исходных данных позволяет увеличить точность получаемых оценок;

2) данное увеличение оказывается весьма существенным при изменении значений сигнала в пределах от 1 до 20;

3) синтезированный оригинальный метод ЦДС, крайне эффективен при использовании в АСУ ТП различного назначения и имеет помехоустойчивость вычисления первой и второй производных на 30–100% выше, чем традиционные методы вычисления производной.

**В четвертой главе** предложен новый метод определения стационарности процессов, основанный на применении алгоритма ЦДС с использованием скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц.

Одной из важных задач, которую необходимо решать при построении интегрированной математической модели магистральных трубопроводов, является задача определения стационарности различных процессов и режимов, протекающих в нем. Это обусловлено тем, что математическое описание и анализ стационарных и нестационарных процессов могут существенно отличаться. Стационарные процессы очень часто описываются СЛАУ, а в случае, когда процесс не стационарен, часто приходится иметь дело с системами дифференциальных уравнений различных порядков, решение которых является более сложной и трудоемкой задачей. Очевидно, что важно не только идентифицировать, стационарен процесс или нет, но и точно определить момент времени, когда он изменяет свое состояние на противоположное. Это связано с необходимостью своевременно задействовать в текущий момент времени математический аппарат, соответствующий характеру протекающего процесса. Сущность предлагаемого метода заключается в том, что при исследовании процессов на стационарность анализируются и используются не только значения самого сигнала, но и значения его первой и второй производных. Такой подход открывает широкие возможности не только для более точного определения границ режима контролируемого процесса, но и позволяет осуществлять прогноз изменения режима процесса во времени. Предлагаемый метод позволяет с высокой точностью вычислять как значения производных, так и определять режимы стационарности процессов реальных объектов и имеет значительно более высокую помехоустойчивость, чем методы, основанные на использовании статистических критериев стационарности. Для решения данной задачи известен целый ряд методов, наиболее популярным и часто используемым из которых является метод определения стационарности процессов, основанный на использовании критерия инверсий.

Количество измеренных значений сигнала, по которому возможно определение стационарных режимов для критерия инверсий ограничено снизу числом 10 с этого значения начинаются все известные таблицы распределений. Предлагаемый метод ЦДС для определения режимов лишен данного недостатка, и позволяет решать поставленную задачу при количестве измерений

сигнала больше или равным трем. При этом, чем больше значений сигнала обрабатывается одновременно, тем, выше точность вычисления производной и тем точнее можно идентифицировать, стационарен процесс или нет. Необходимо отметить, что с увеличением количества одновременно обрабатываемых измерений, увеличивается вычислительная сложность, а при фиксированных значениях приращений времени возможности увеличения количества измерений ограничены и с их увеличением размывается граница (момент времени) изменения состояния режима.

При проведении экспериментальных исследований количество одновременно обрабатываемых значений сигнала выбиралось из ряда от 10 до 80 с шагом 10 и осуществлялось в режиме «скользящего окна».

Для критерия инверсий использовался другой способ обработки сигнала, когда сигнал обрабатывался не в режиме «скользящего окна», а группами по 10 – 80 измерений. На границах данных групп осуществлялся анализ состояния сигнала, и либо процесс продолжал оставаться стационарным или нестационарным, либо менял свое состояние на противоположное.

При проведении экспериментов в качестве дифференцируемых сигналов использовались сигналы, полученные с датчиков давления на выходе магистрального насосного агрегата, приводимого в действие электродвигателем.

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рисунках 3 и 5, представляют собой функциональные зависимости сигнала и его производной от времени и обозначены символами  $s$  и  $ds$ , соответственно. На рисунках 4, 6 и 7 изображены участки стационарности сигнала, полученные в эти же моменты времени с помощью критерия инверсий и предлагаемого метода, которые располагаются в интервалах от 1 до 1.5 и от 0 до 0.5 по оси ординат и имеют обозначение  $Minv$  и  $Mnew$  соответственно. При этом стационарный режим соответствует верхнему уровню (1.5 и 0.5). В подрисуночных надписях литерой  $m$ , обозначено количество измерений, по которым осуществлялся анализ стационарности.

Параметр  $\beta$ , фигурирующий в названии рисунков, задает максимальное значение отклонений производной в текущий момент времени от значений в предыдущий момент и позволяет, самостоятельно выбирать границы, в которых сигнал будет считаться стационарным. Данная величина может выбираться, в соответствии с теми требованиями и ограничениями, которые характерны именно для конкретного процесса.

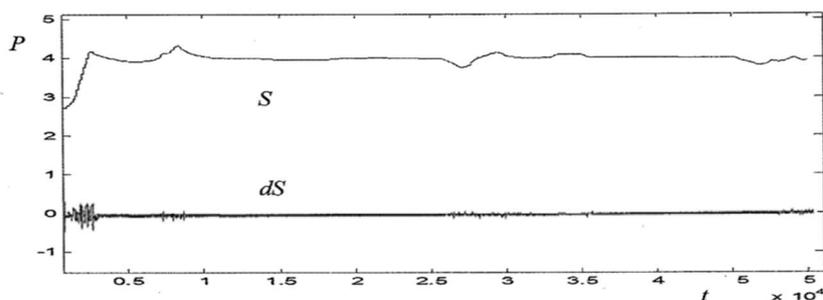


Рисунок 3 – Сигнал  $S$  и его производная  $dS$ , при  $m=80$

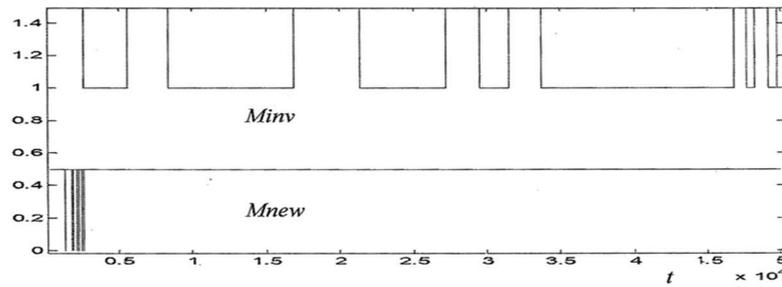


Рисунок 4 – Определение стационарности при  $m=80$

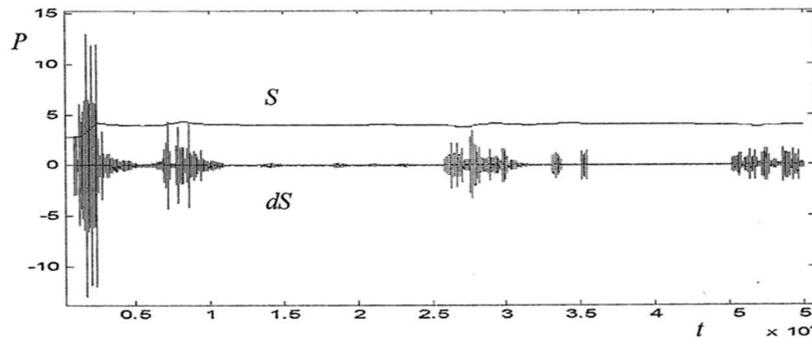


Рисунок 5 – Сигнал  $S$  и его производная  $dS$ , при  $m=10$

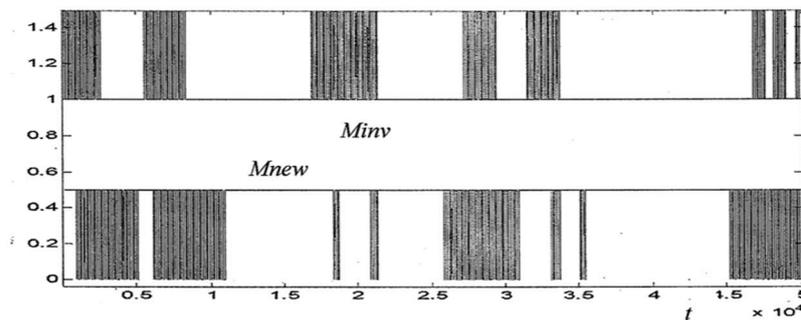


Рисунок 6 – Определение стационарности при  $m=10, \beta=0.1$

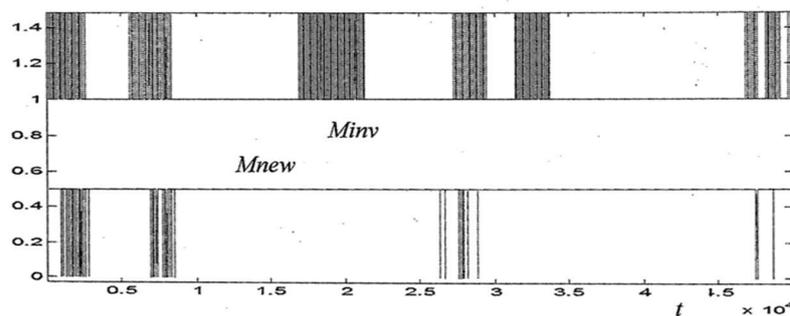


Рисунок 7 – Определение стационарности при  $m=10, \beta=0.01$ .

Из приведенных графиков видно, что чем больше количество одновременно обрабатываемых измерений, тем критерий инверсий работает лучше. Это присуще и предлагаемому методу, но у критерия инверсий есть один существенный недостаток, он позволяет определять состояния стационарности

строго в соответствии с таблицей распределения вероятностей и не допускает самостоятельного изменения условий стационарности.

Существенным отличием предлагаемого метода от традиционных методов определения стационарности, является то, что он позволяет в более широких пределах выбирать доверительные интервалы для выделения стационарных режимов, руководствуясь при этом теми или иными соображениями.

Метод обладает высокой устойчивостью к погрешностям измерений дифференцируемого сигнала и является более пригодным для работы с сигналами, измеряемыми в реальном масштабе времени, что не характерно для критериев стационарности, используемых в математической статистике.

Результаты исследований, позволяют сделать следующие выводы.

1. Предложенный метод определения стационарности процессов, позволяет с высокой точностью вычислять как значения производных, так и определять режимы стационарности процессов реальных объектов. Он имеет значительно более высокую помехоустойчивость, чем методы, основанные на использовании классических статистических критериев стационарности.

2. В отличие от критерия инверсий предложенный алгоритм позволяет в широких пределах варьировать доверительные интервалы стационарности процессов, что значительно упрощает процедуру настройки реализующего его алгоритма для корректного определения момента наступления и длительности стационарного либо нестационарного режимов.

3. Выбор интервалов изменения значений производной осуществляется, исходя из условий и особенностей, характерных конкретному процессу.

4. Алгоритм, реализующий предложенный метод, является достаточно простым и доступным для аппаратной и программной реализаций.

**В пятой главе** приведены методы решения некорректно поставленных задач. Даны основные понятия и термины плохо обусловленных СЛАУ детально рассмотрены способы их регуляризации. Вычислительная задача называется корректно поставленной или корректной задачей, если она удовлетворяет следующим трем условиям:

1. Решение задачи существует или, что то же самое, задача имеет хотя бы одно решение при любых допустимых исходных данных.

2. При каждом конкретном наборе исходных данных задача имеет одно и только одно или, что то же самое, единственное решение.

3. Решение задачи устойчиво по отношению к малым изменениям ее исходных данных или решение задачи непрерывно зависит от ее исходных данных.

Дано понятие прямых и обратных вычислительных задач. Признаком, в соответствии с которым осуществляется разбиение всего множества вычислительных задач являются отношения «причина-следствие» между величинами, значения которых фигурируют в постановках рассматриваемых задач. Результатом разбиения являются два подмножества задач, названных классом прямых и обратных вычислительных задач.

Классификация вычислительных задач на корректно и некорректно поставленные вычислительные задачи осуществляется в соответствии с признаком их классификации, которым является свойство корректности их математических формулировок.

С необходимостью решения некорректно поставленных задач можно столкнуться практически в любой области науки и техники.

Впервые в России и в мире подобные требования к вычислительным задачам сформулировал математик, академик АН СССР А.Н. Тихонов. Опираясь на новые требования, он сформулировал и новое определение корректности вычислительной задачи, которое в настоящее время общепринято называть корректностью задачи по А.Н. Тихонову. Применительно к решению СЛАУ данное определение формулируется следующим образом.

Задача решения СЛАУ называется корректно поставленной по А.Н. Тихонову, если она удовлетворяет следующим трем условиям:

1) априори известно, что данная система уравнений имеет решение и оно принадлежит некоторому заданному компактному множеству  $K$ , являющемуся некоторым ограниченным подмножеством векторного пространства;

2) решение задачи на компакте  $K$  единственно или матрица на данном множестве обратима и имеет единственную обратную матрицу;

3) решение задачи на компакте  $K$  непрерывно зависит от исходных данных, т.е. бесконечно малым вариациям исходных данных задачи, не выводящим ее решение за пределы множества  $K$ , соответствуют бесконечно малые вариации ее решения.

Компакт  $K$  в теории некорректно поставленных задач принято называть множеством корректности вычислительной задачи. В определении корректно поставленной вычислительной задачи, предложенном А.Н. Тихоновым, первым условием корректности ее постановки также является существование у нее решения. В данном случае оно постулируется, и не доказывается.

Целесообразность подхода к решению вопроса о существовании решения у вычислительной задачи обосновываются следующими соображениями.

Во – первых, учитывая предложенное определение обратной задачи, основанное на использовании причинно – следственных связей между явлениями, процессами и т.п., можно видеть, что: 1) правая часть решаемой СЛАУ является следствием, а причиной, обусловившей его появление и существование, является искомое решение данной СЛАУ; 2) поскольку следствие, дано и соответственно существует, то должна существовать и обусловившая его причина и мы должны считать, что решение СЛАУ существует.

Во – вторых, несуществование или отсутствие решения у СЛАУ может быть обусловлено следующими тремя причинами:

1) неадекватностью математической модели, описывающей количественные связи между причиной и следствием, с использованием которой сформирована решаемая СЛАУ;

2) неудачным выбором шага дискретизации аналоговых величин при формировании матрицы коэффициентов решаемой СЛАУ, наличием ошибок вычисления или задания данных коэффициентов;

3) наличием погрешностей задания или измерения правой части решаемой СЛАУ.

Предложен модифицированный алгоритм Грама–Шмидта ортонормирования конечномерных векторов, предназначенный для построения математических моделей линейных статических объектов на основе поступающих в систему измеренных значений их входных и выходных переменных. В синтезированном алгоритме существенно уменьшена неустойчивость решения по отношению к ошибкам задания ортонормируемых векторов и ошибкам вычислений. Существенным преимуществом предложенного алгоритма перед обобщенным алгоритмом Грама – Шмидта и Уилкинсона является то, что его применение позволяет обрабатывать измеренные значения входных переменных, поступающих в систему в режиме реального времени.

В данной главе приводится синтез нового алгоритма построения ортонормированной системы  $n$  – мерных векторов, являющегося модификацией алгоритма Грама-Шмидта, данный алгоритм является рекуррентным. Однако он оказывается малоустойчивым по отношению к ошибкам задания ортонормируемых векторов и ошибкам вычислений, что является его существенным недостатком. Это обстоятельство стимулировало к созданию алгоритма, который бы превосходил по своим характеристикам исходный алгоритм.

Неустойчивость данного алгоритма можно существенно уменьшить, воспользовавшись идеей, предложенной Дж. Уилкинсоном и лежащим в основе алгоритма построения ортонормированных векторов.

Обобщенный алгоритм Грама-Шмидта и Уилкинсона обладает уникальными возможностями и позволяет с высокой точностью вычислять устойчивые по отношению как к ошибкам задания ортонормируемых векторов, так и к ошибкам вычислений решения, однако и он не лишен недостатков. Один из них, заключается в том, что данный алгоритм сложно применять, когда измеренные значения векторов поступают в систему последовательно. В алгоритме Уилкинсона векторы входящие в базис обрабатываются одновременно.

Предлагаемый алгоритм работает в режиме «скользящего окна», по мере поступления новых векторов в систему, первый вектор в базисе «отбрасывается», и его место занимает второй, место второго занимает третий, последним в базисе будет новый вектор.

В качестве тестовых векторов для экспериментальных исследований были взяты строки матрицы Гильберта. Полученные результаты представлены на рисунке 8, при этом по оси абсцисс отложены значения размерности тестовой матрицы, а по оси ординат евклидова норма матрицы  $N$ , которая вычисляется в соответствии с формулами:

$$\text{а) } W_n = V_n * V_n'; \quad \text{б) } N = E_n - W_n \quad \text{и в) } \|N\| = \sqrt{\sum_i \sum_j |n_{ij}|^2}, \quad (14)$$

где  $W_n$  и  $N$  – матрицы порядка  $n$ , а матрица  $V_n$  – ортонормированная матрица, порядка  $n$ . Данная величина, в идеальном случае, когда  $V_n$  является строго ортонормированной матрицей, должна быть равна нулю, на практике же такая ситуация ввиду ряда других встречается крайне редко.

На рисунке 8 проиллюстрировано преимущество предлагаемого алгоритма перед алгоритмом Грама – Шмидта. На графике цифрой «1» обозначены результаты, полученные с помощью алгоритма Грама – Шмидта, а цифрой «2» – результаты, полученные с помощью предлагаемого алгоритма.

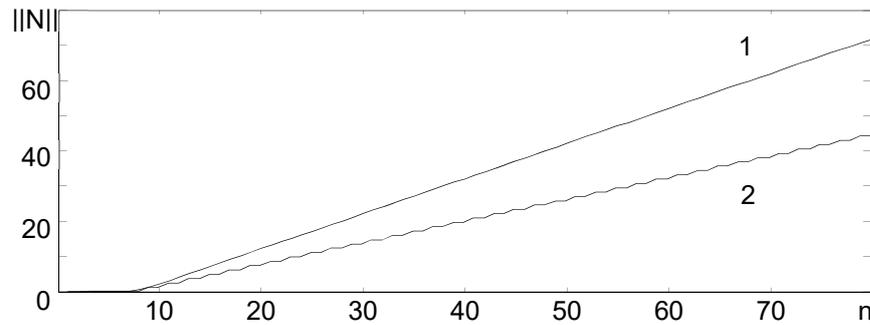


Рисунок 8 – Сравнительные результаты экспериментальных исследований алгоритмов, на примере матрицы Гильберта.

Из приведенных графиков видно, что кривая 2, характеризующая точность вычисления ортогональных векторов с помощью предлагаемого алгоритма, находится существенно ниже кривой 1, а величина  $\|N\|$  для предлагаемого алгоритма, приблизительно в два раза меньше, чем у алгоритма Грама – Шмидта. Очевидно, что данное преимущество в системах управления реального времени, будет играть весьма существенную роль.

Так же в данной главе рассмотрены основные свойства матрицы Гильберта и проведены теоретические и экспериментальные исследования, которые позволяют видеть, что результаты исследования основных характеристик матриц Гильберта очень сильно отличаются, в зависимости от того, какую использовать точность представления вещественных чисел при проведении экспериментальных исследований. При этом просматривается совершенно четкая зависимость, чем выше точность представления чисел, тем результаты точнее. Применение максимальной машинной точности расширяет возможности и позволяет получить исследуемые характеристики до 15 – го порядка включительно. Однако далее увеличивать порядок оказывается невозможно.

Применение математики «длинных чисел» позволяет получить основные характеристики матриц Гильберта до сотого порядка и выше; получить подобные результаты, используя одинарную, двойную или максимальную машинную точность, невозможно в принципе. Полученные результаты говорят об очень плохой обусловленности матриц Гильберта именно поэтому такие матрицы часто используются в качестве примеров и тестов для матричных вычислений.

Одним из способов улучшения обусловленности матриц является нормирование ее строк или столбцов. Из сравнения результатов исследований

матриц Гильберта до и после масштабирования можно сделать следующие выводы: масштабирование позволяет улучшить обусловленность матрицы при больших ее порядках и привести зависимость ее основных характеристик к более пригодному для практических и к более доступному для анализа виду. Однако оно не позволяет улучшить обусловленность матрицы кардинальным образом и сделать это при сколь угодно больших ее порядках.

**Шестая глава.** Практическое применение синтезированных алгоритмов ЦДС. В данной главе проводится анализ недостатков ПИД – регуляторов и возможностей их устранения. Рассматривается сущность ПИД – регулирования и выделяются два недостатка, связанные с практическим применением ПИД–регуляторов. Множество теоретических и экспериментальных исследований ПИД–регуляторов, а также практика их применения выявили две актуальные проблемы, существенно затрудняющие возможности практического использования ПИД–регуляторов. Первой из них является проблема настройки ПИД–регуляторов, сводящаяся к определению и заданию таких численных значений коэффициентов в законе регулирования, реализация которых позволяет вычислять управляющие воздействия.

Вторая проблема, ограничивающая возможности практического использования ПИД – регуляторов, обуславливается наличием в законе регулирования производной. Вычисление производной любого сигнала является одним из классических примеров некорректно поставленных задач. Характерная особенность данных задач состоит в том, что их решения оказываются чрезмерно чувствительными к малейшим изменениям их исходных данных, значение производной, в этом случае, может оказаться сколь угодно далеким от ее истинного значения неизбежно далеким от истинного значения окажется и вычисляемое в соответствии с ним значение управляющего воздействия. Учитывая отмеченное, можно видеть, во – первых, что и процесс регулирования переменных с применением ПИД – регулятора в целом неизбежно оказывается неустойчивым. Во – вторых, первопричиной неустойчивости данного процесса является использование производной по времени отклонения.

Некоторые результаты двух серий численных экспериментов, выполненных с целью исследования, синтезированного метода ЦДС и основанного на его использовании ПИД – регулятора ТП.

Целью каждого из экспериментов первой серии являлось исследование свойств метода ЦДС и сравнение его характеристик с аналогичными характеристиками простейшего метода ЦДС. Цель второй серии экспериментов заключалась в исследовании характеристик предлагаемого ПИД – регулятора и их сравнении с аналогичными характеристиками промышленного ПИД – регулятора. В качестве тестовых сигналов были использованы два типа сигналов, которые наиболее часто используются в данном качестве:

- 1) единичный скачок (функция Хэвисайда);

$$y(t) = 1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{и}$$

- 2) гармоническая функция  $y(t) = \sin(t)$ .

Исследование помехоустойчивости рассматриваемых алгоритмов проводилось в условиях, когда с ошибками задавались только значения сигнала.

Проведенные эксперименты показали, что предлагаемый метод вычисления производных оказывается более устойчивым к наличию шумов в дифференцируемом сигнале, чем метод, реализованный в пакете прикладных программ Matlab (основанный на применении простейшего алгоритма дифференцирования). Синтезированный алгоритм ЦДС позволяет, не пользуясь стандартными процедурами дифференцирования, с достаточно высокой точностью вычислять, как значение самого сигнала, так и значения его первой и второй производных. Предложенный метод имеет в 2 – 10 раз более высокую помехоустойчивость, чем методы, основанные на стандартных процедурах дифференцирования. Так среднеквадратическое отклонения (СКО) истинного значения первой производной от её вычисленного значения, при уровне шумов в дифференцируемом сигнале равном 5%, в 10 раз ниже при использовании предлагаемого метода ЦДС, а для второй производной данный показатель равен уже 50.

Эксперименты второй серии иллюстрируют преимущество предлагаемого ПИД – регулятора и содержат результаты выполненных в работе исследований его характеристик и сравнение их с характеристиками стандартного ПИД – регулятора, реализованного в виде блока Simulink в пакете Matlab. Для объективного сравнения предлагаемого регулятора с регулятором, реализованным в пакете Matlab, коэффициенты данных регуляторов вычислялись с помощью одной и той же, стандартной процедуры, входящей в данный пакет. Вычисленные указанным способом коэффициенты настроек сравниваемых регуляторов во всех случаях оказываются равными и, тем самым, обеспечивается возможность оценивания влияния погрешности дифференцирования регулируемой величины на точность ее регулирования.

Экспериментальные исследования проводились для двух типов объектов управления, являющихся безынерционными звеньями первого и второго порядков. Сравнительные результаты проведенных экспериментальных исследований изображены на рисунках 9 и 10 и сведены в таблицы 2 и 3. На рисунках 9 и 10 изображены зависимости выходной величины  $h(t)$  объекта управления второго порядка. Выходная величина объекта управления  $h(t)$  синтезированного регулятора изображена черным цветом, а регулятора реализованного в Matlab, серым. Из них видно, что новый регулятор, существенно превосходит регулятор Matlab по «качеству» регулирования, это видно и из таблиц 2 и 3, где приведены СКО вычисленных значений выходной величины  $h(t)$  от их идеальных значений, в таблице 2 для объекта управления первого порядка, а в таблице 3, соответственно для второго. Как видно из таблицы 2 СКО вычисленных значений величины  $h(t)$  от их идеальных значений для объекта управления первого порядка практически в два раза ниже у предлагаемого ПИД – регулятора, чем у «классического» ПИД – регулятора. Рисунки, иллюстрирующие поведение выходной величины  $h(t)$  объекта управления первого по-

рядка здесь, не приводятся. Для объекта управления второго порядка СКО вычисленных значений выходной величины  $h(t)$  от их идеальных значений в 6 – 8 раз меньше у предлагаемого регулятора, чем у регулятора Matlab. Новый регулятор имеет существенное преимущество с точки зрения «качества» регулирования и обладает более высокой помехоустойчивостью, дифференцируемый сигнал содержал ошибки измерения равные 2,5%, а закон их распределения был равномерным.

Таблица 2

Объект 1–го порядка.

Сигнал	СКО синтезированного ПИД	СКО ПИД Matlab
$y(t) = 1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$	0.0395	0.0663
$y(t) = \sin(t)$	0.0393	0.0662

Таблица 3

Объект 2-го порядка.

Сигнал	СКО синтезированного ПИД	СКО ПИД Matlab
$y(t) = 1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$	0.0213	0.136
$y(t) = \sin(t)$	0.0171	0.139

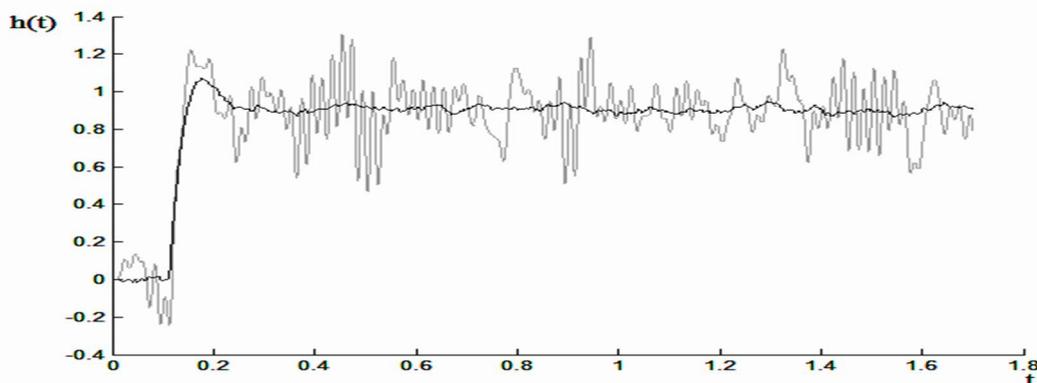


Рисунок 9 – Сигнал  $y(t) = 1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$ , объект 2–го порядка.

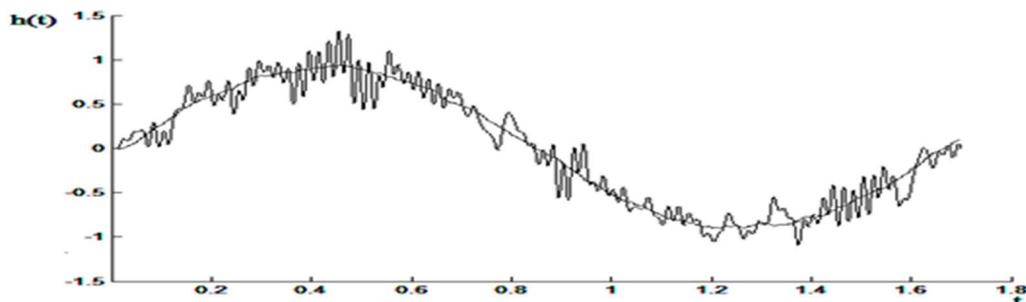


Рисунок 10 – Сигнал  $y(t) = \sin(t)$ , объект 2-го порядка.

Во втором разделе главы предложен новый подход к синтезу методов автоматического регулирования объектов, основанный на использовании концепции обратных задач динамики. Обусловлена необходимость поиска методов автоматического регулирования, являющихся альтернативными ПИД–регулированию, и изложен, названный выше подход к синтезу методов автоматического регулирования объектов.

В соответствии с данной концепцией всякое изменение поведения регулируемого объекта рассматривается как следствие, причиной которого является изменение управляющего воздействия, формируемого и подаваемого на управляемый объект автоматическим регулятором. При этом задача формирования управляющего воздействия  $u_t$  в каждый момент времени  $t$  формируется как обратная вычислительная задача, т.е. как задача отыскания неизвестной причины, исходными данными которой являются заданное значение  $y_{t+1,z}$  регулируемой переменной  $Y$  управляемого объекта в последующий момент времени  $t+1$  и разностное уравнение, связывающее ее значения  $y_{t+1}, y_t, y_{t-1}, \dots$ , со значениями  $u_t, u_{t-1}, u_{t-2}, \dots$ .

Синтез метода автоматизированного регулирования процессов и объектов, основанного на использовании разностных уравнений и концепции обратных задач динамики. Для упрощения последующих рассмотрений будем считать, что:

1. Значения  $y_{t+1}, y_t, y_{t-1}, y_{t-2}$  регулируемой переменной  $Y$  объекта управления (ОУ) в моменты времени  $t+1, t, t-1, t-2$  связаны между собой и со значениями  $u_t, u_{t-1}$  его входа  $U$  разностным уравнением вида:

$$y_{t+1} = \alpha_1 y_t + \alpha_2 y_{t-1} + \alpha_3 y_{t-2} + \alpha_4 U_t + \alpha_5 U_{t-1}, \quad (15)$$

коэффициенты  $\alpha_1 - \alpha_5$  которого являются некоторыми постоянными числами, не зависящими от значений  $u_t, u_{t-1}$  входа  $U$  ОУ и от значений,  $y_t, y_{t-1}, y_{t-2}$  его выхода  $Y$ .

2. Задан желаемый закон изменения во времени значений  $y_{zt}$  регулируемой переменной  $Y$  объекта управления, определяемых равенствами:

$$y_{zt} = \varphi(t), t = 1, 2, 3, \dots, \quad (16)$$

где  $\varphi(t)$  – некоторая заданная функция времени  $t$ .

Значения  $u_t$  управляющих воздействий должны выбираться так, чтобы значения  $y_t$  выхода  $Y$  ОУ в каждый момент времени  $t$  удовлетворяли равенствам:

$$y_t = y_{zt}, t = 1, 2, 3, \dots, \quad (17)$$

и при этом выполнялось равенство (15).

Исходные данные, представленные равенствами (15) – (17), являются необходимым и достаточным условием для синтеза метода автоматизированного регулирования процессов. В самом деле, равенство (15) связывает в каждый

момент времени  $t$  значения  $y_{t+1}, y_t, y_{t-1}$  регулируемой переменной  $Y$  со значениями  $u_t$  и  $u_{t-1}$  управляющего  $U$  и, таким образом, используя данное равенство и равенство (15) для вычисления желаемых значений  $u_{zt}, t=1,2,3,\dots$ , можно составить уравнение относительно неизвестного значения  $u_t$ :

$$\alpha_1 y_t + \alpha_2 y_{t-1} + \alpha_3 y_{t-2} + \alpha_4 u_t + \alpha_5 u_{t-1} = y_{zt}. \quad (18)$$

Входящие в данное уравнение значения  $y_t, y_{t-1}, y_{t-2}$  и  $y_{zt}$ , а также значение  $u_{t-1}$  нам известны, и, как видно из (18), неизвестным здесь является только значение  $u_t$ . Перенеся известные слагаемые  $\alpha_1 y_t, \alpha_2 y_{t-1}, \alpha_3 y_{t-2}$  и  $\alpha_5 u_{t-1}$  в его правую часть, представим данное уравнение в следующем виде:

$$\alpha_4 u_t = \Delta z_t, \quad t = 1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

Здесь  $\Delta z_t = y_{zt+1} - \alpha_1 y_t - \alpha_2 y_{t-1} - \alpha_3 y_{t-2} - \alpha_5 u_{t-1}$ . Полученное уравнение является линейным алгебраическим уравнением относительно искомого значения  $u_t$ . Его решение определяется следующим равенством:

$$u_t = \Delta z_t / \alpha_4, \quad t = 1, 2, 3, \dots \quad (20)$$

Проверяем соответствие вычисленного значения  $u_t$  условиям его физической реализуемости, представленным соотношением вида:

$$u_t \in I_t \equiv [u_t^{\min}, u_t^{\max}], \quad (21)$$

где  $u_t^{\min}$  и  $u_t^{\max}$  – заданные числа, выбираемые с учетом ограничений, налагаемых в момент времени  $t$  на значения управляющих воздействий  $u_t$ .

Если вычисленное значение  $u_t$  удовлетворяет данному соотношению, то полагаем, что оно является желаемым управляющим воздействием  $u_{zt}$  и полагаем

$$u_{zt} = u_t. \quad (22)$$

В противном случае, т.е. если вычисленное значение  $u_t$  данным соотношением не удовлетворяет, то используем его для вычисления желаемого значения  $u_{zt}$ , и вычисление последнего осуществляем в соответствии с равенством:

$$u_{zt} = \begin{cases} u_t^{\min}, & \text{если } u_t \leq u_t^{\min}, \\ u_t^{\max}, & \text{если } u_t \geq u_t^{\max}. \end{cases} \quad (23)$$

Здесь  $u_t^{\min}$  и  $u_t^{\max}$  некоторые заданные функции времени  $t$  такие, что  $u_t^{\min} < u_t^{\max}$ . В простейшем случае данные функции определяются равенствами  $u_t^{\min} = u^{\min}$  и  $u_t^{\max} = u^{\max}$ , где  $u^{\min}$  и  $u^{\max}$  – некоторые заданные постоянные числа, удовлетворяющие неравенству  $u^{\min} < u^{\max}$ .

В завершение синтеза предлагаемого метода автоматизированного регулирования объектов приведем комментарии, более полно раскрывающие его сущность, особенности и возможности практической реализации.

1. Как видно из равенств (16)–(20), ни в одном из них не фигурирует производная  $d(\Delta y_t)/dt$  отклонения  $\Delta y_t$  и, таким образом, в предлагаемом методе отсутствует основная причина, обуславливающая неустойчивость как ПИД – регулирования, так и других законов регулирования, в которых данная производная используется.

2. Изложенный выше синтез предлагаемого метода автоматического регулирования объектов осуществлен применительно к частному случаю ОУ, когда связь между значениями регулируемой переменной и значениями управляющих воздействий описывается разностным уравнением (15).

3. В настоящее время известен целый ряд способов преобразования обыкновенных дифференциальных уравнений, часто используемых в современной теории и практике управления, в разностные уравнения.

Синтезированный метод и алгоритм автоматического регулирования объектов, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнений, был положен в основу адаптивного регулятора, который был реализован в виде  $S$  – функции и блока в пакете MatLab Simulink.

Алгоритм предназначен для оценивания параметров линейных моделей, в том числе и разностных уравнений, которыми могут быть описаны различные динамические процессы и объекты. Использование разностных уравнений позволяет достаточно просто и с минимальными затратами формулировать и решать, как задачу подстройки параметров математической модели объекта, так и задачу вычисления управляющих воздействий при минимальных требованиях к вычислительной системе.



Рисунок 11. – Общая укрупненная структурная схема адаптивной системы управления с подстраиваемой моделью объекта управления

На схеме приняты обозначения:  $y_t^*$  – желаемое значение выхода  $Y$  ОУ;  $v_t$  – значения возмущений, действующих на ОУ;  $y_t$  – измеренное значение выхода ОУ;  $u_t$  – значение управляющего воздействия, подаваемого на ОУ;  $a_t$  – оценки параметров  $\alpha$  математической модели ОУ;  $t$  – дискретное время.

В отличие от традиционных (неадаптивных) СУ, включающих в свой состав только ОУ и управляющее устройство, в рассматриваемую систему входит еще один блок – идентификатор, он в процессе функционирования ОУ,

используя имеющиеся значения управляющего воздействия  $u_t, u_{t-1}, u_{t-2}, \dots$ , измеренные значения выхода объекта  $y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, \dots$ , и имеющиеся оценки  $a_{t-1}^\downarrow$  параметров  $\alpha$ , непрерывно вычисляет новые оценки  $a_t^\downarrow$  параметров  $\alpha$  математической модели ОУ и передает их в блок управляющего устройства. Используя эти оценки, управляющее устройство формирует управляющие воздействия  $u_t$  и передает их на исполнительные устройства.

Основное предназначение идентификатора состоит в том, чтобы по мере поступления в систему значений выхода объекта  $y_t$  и управляющих воздействий  $u_t$  уточнять оценки параметров объекта в соответствии с равенством (23). Наличие системы слежения за меняющимися параметрами нестационарного объекта делает всю систему с значительно менее чувствительной к изменениям объекта. Такие системы называются с двойной инвариантностью, поскольку они нечувствительны к возмущениям  $v_t$  и к изменению передаточных функций каналов, по которым действуют эти возмущения.

Процесс функционирования системы: на каждом  $t$  – м такте управления, где  $t$  – дискретные и равноотстоящие друг от друга моменты времени,  $t = 1, 2, \dots$ , производятся измерения значений  $y_t$  и  $u_t$ , которые передаются в блок подстройки параметров математической модели ОУ – идентификатор. На основе поступивших значений  $y_t$  и  $u_t$  и уже хранящихся в нем значений  $y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, \dots$ , и  $u_t, u_{t-1}, u_{t-2}, \dots$ , поступивших в него в предыдущие моменты времени  $t-1, t-2, \dots$ , в данном блоке осуществляется уточнение вектора оценок  $a_{t-1}^\downarrow$  неизвестных параметров объекта  $\alpha$  с помощью некоторого алгоритма оценивания. Затем полученные новые оценки  $a_t^\downarrow$  передаются в управляющее устройство. На основе поступивших в управляющее устройство оценок  $a_t^\downarrow$  и измеренных значений  $y_t$  и  $u_t$ , а также с учетом заданного значения  $y_t^*$  в данном блоке вычисляются управляющие воздействия  $u_{t+1}$  и передаются на исполнительное устройство. На этом  $t$ -й такт функционирования завершается и начинает реализовываться следующий  $(t+1)$  – й такт.

Предложенный метод синтеза цифровых регуляторов является универсальным и позволяющим синтезировать регуляторы для всех ОУ, функционирование которых может быть описано как обыкновенными дифференциальными уравнениями, так и разностными уравнениями различных порядков.

В разделе 6.3 приведены некоторые результаты экспериментальных исследований предложенного метода автоматического регулирования процессов на примере – эксплуатации системы электроснабжения на воздушных судах, где возможны отказы ее элементов, приводящие к нарушению нормального режима работы отдельных каналов или всей системы. При изменении значения одного или нескольких основных параметров канал системы, работавший до этого в нормальном режиме, под воздействием непредвиденного возмущения внешних факторов переходит в новое состояние – ненормальный режим

работы. Для предотвращения опасных последствий ненормальных режимов защита отключает неисправный канал генерирования.

В результате экспериментальных исследований было выявлено, что при любых возмущающих факторах (нештатных ситуациях) время переходных процессов для обоих видов регулирования составляет не более 35 мс, что удовлетворяет предъявляемым требованиям к быстродействию системы управления. Анализируя графические зависимости и массивы выходных значений напряжений и токов от времени, можно сделать следующие выводы:

– при использовании в составе системы управления ПИД-регулятора регулируемые переменные имеют пульсации, наличие которых является крайне нежелательным явлением на реальных ОУ, а это, в свою очередь, указывает на то, что регулирование осуществляется не совсем корректно. Еще одним недостатком такой системы управления является то, что регулируемые сигналы не всегда попадают в требуемый диапазон значений;

– при использовании в составе СУ адаптивного регулятора пульсации и искажения формы регулируемых сигналов (напряжения и токов) практически отсутствуют, а там, где они есть, находятся в допустимом диапазоне. При любых штатных ситуациях в любой момент времени синтезированный регулятор в полной мере и предельно корректно выполняет свои функции, поддерживая требуемые значения тока и напряжения в заданном диапазоне.

Основываясь на вышеизложенных замечаниях и выводах, можно однозначно утверждать, что АСУ дополнительной системой генерирования электрической энергией с использованием адаптивного регулятора является более устойчивой к внешним воздействиям, как минимум на 20%, имеет более высокую точность и скорость регулирования не менее 20%, чем АСУ, основанная на применении ПИД-регулятора.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа явилась обобщением научных исследований автора. В ней подробно изложены вопросы построения сложных АСУ ТП с высокой помехозащищенностью, быстродействием и точностью регулирования. Теоретически обоснована необходимость проведения исследований с целью создания методов и алгоритмов ЦДС, являющихся неотъемлемой частью таких АСУ ТП, которые бы в полной мере удовлетворяли предъявляемым требованиям. Создание такого рода алгоритмов ЦДС, функционирующих в реальном масштабе времени, их исследование и практическая реализация и являлись главной целью данной диссертации, таким образом, для достижения сформулированной цели исследования была решена важная научная проблема, суть которой заключалась в создании АСУ ТП сложных технологических процессов за счет применения новых методов и алгоритмов ЦДС, обладающих высокими точностными характеристиками, более устойчивых к помехам и способны функционировать в режиме реального времени.

В рамках данной работы, были поставлены и успешно решены следующие задачи, результаты которых имеют самостоятельное научное и практическое значение:

1. Выполнен аналитический обзор существующих АСУ ТП, позволивший обосновать необходимость применения методов и алгоритмов ЦДС для массового их использования при производстве автоматических адаптивных регуляторов и построения динамических АСУТП различного уровня сложности. Выбраны и обоснованы направления исследований, математического аппарата и моделей, лежащих в основе синтеза регуляторов АСУТП.

2. Для линейных АСУТП с максимальным быстродействием разработан оригинальный способ регуляризации на примере метода ЦДС, основанного на использовании решений интегральных уравнений В. Вольтерра. Регуляризованная модификация, позволила повысить помехоустойчивость вычисляемой производной сигнала к ошибкам его задания на 30–70% по отношению к не регуляризованному методу. Синтезированы два метода структурной регуляризации плохо обусловленных СЛАУ.

3. Для систем автоматического регулирования синтезирован и программно реализован метод ЦДС, основанный на применении многоточечного оценивания неизвестных величин по результатам их экспериментальных измерений и псевдообратных матрицах, предназначенный для использования в АСУТП значения сигналов в которую поступают последовательно и имеющий на 30-100% более высокую помехоустойчивость, чем у традиционных методов вычисления производных. Алгоритм был использован при разработке программного обеспечения для моделирования компонентов системы СГА-ОН, позволил повысить точность поддержания параметров выходной энергии системы СГА-ОН в динамических режимах.

4. Для нелинейных систем АСУТП, в качестве элемента математического обеспечения АСУТП, разработан модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений, обладающий более высокой скоростью сходимости вычисляемых решений к их истинным решениям и требующий на 20-50% меньших объемов вычислений, необходимых для получения решений с желаемой точностью по сравнению с исходным методом дихотомии, что позволяет увеличить быстродействие АСУТП в целом.

5. Для АСУТП магистральными трубопроводами, синтезирован метод и алгоритм автоматизированного определения интервалов стационарности процессов, основанный на применении алгоритма ЦДС с использованием значений сигналов и значений их производных, имеющий высокую точность идентификации момента времени изменения состояния ТП на противоположное, время реакции составляет не более 30-40 мс., обладает более высокой, в 2–4 раза, помехоустойчивостью по сравнению с классическими методами и позволяющий оператору АСУТП самостоятельно выбирать доверительные интервалы стационарности. Алгоритм нашел практическое применение в АО «Элеси».

6. Для линейных АСУТП, в качестве элемента математического обеспечения АСУ ТП синтезирован модифицированный алгоритм Грама-Шмидта, позволяющий фактически в 2 раза снизить неустойчивость решения по отношению к ошибкам задания ортонормируемых векторов и ошибкам вычисления решений, преимуществом перед обобщенным алгоритмом Грама-Шмидта и Уилкинсона является то, что его применение позволяет обрабатывать значения входных переменных, поступающих в систему последовательно в режиме реального времени. Разработаны новые методы структурной регуляризации плохо обусловленных СЛАУ, применение регуляризации позволяет повысить точность оценивания производных сигналов на 56-70%.

7. Для тестирования алгоритмов матричных вычислений в АСУТП синтезирован и программно реализован модифицированный метод обращения малых вещественных чисел, основанный на применении математики «длинных чисел». Метод позволяет получить характеристики матриц Гильберта, до сотого порядка и выше, а ее применение позволяет тестировать алгоритмы в АСУТП.

8. Разработан модифицированный ПИД-регулятор, основанный на применении скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матрицах, имеющий более высокую точность, минимальное перерегулирование и высокую скорость выхода на заданные режимы и обладающий более высокой помехоустойчивостью. Скорость достижения заданных режимов регулирования возросла на 20-30%, перерегулирование снизилось на 10-20%, а помехоустойчивость выросла в 2-10 раз по сравнению с «классическим» регулятором. Разработанный алгоритм внедрен в АСУТП камерами варки и охлаждения «Mauting». На предприятие холдинга «Сибирская аграрная группа». Используется АО «Элеси» при создании цифровых регуляторов.

9. Для автоматического регулирования объектов, синтезирован метод, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнений, описывающих связи между значениями регулируемой переменной ОУ и управляющих воздействий, формируемых регулятором. Применение метода позволяет избавиться от основной причины, обуславливающей неустойчивость как ПИД-регулирования, так и других законов регулирования, в которых данная производная используется и существенно повысить точность. Предложенный метод является универсальным и позволяет синтезировать регуляторы для ОУ, функционирование которых может быть описано как обыкновенными дифференциальными, так и разностными уравнениями. Разработан и программно реализован адаптивный регулятор, интегрированный в АСУ прессом «Lindeman LIS-616» на предприятии «Новолипецкий металлургический комбинат» в г. Томске.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Монографии и учебные пособия**

1. Методы и алгоритмы цифрового дифференцирования сигналов в системах реального времени / **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков. – Томск: Монография.

Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2009. – 139 с. ISBN 978-5-86889-509-8.

2. Ортогонализация конечномерных векторов и ее применение в задачах управления / А.Е. Карелин, **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков. – Томск: Монография. Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 164 с. ISBN 978-5-86889-651-1.

3. Лабораторный практикум по дисциплине «Технические средства автоматизации» / **А.В. Майстренко**. – Томск: Учебное пособие. Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2009. – 58 с.

4. Обобщенные обратные матрицы и их применение в задачах автоматизации технологических процессов и производств // А.Е. Карелин, **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2010. – 147 с.

5. Рекуррентная идентификация процессов и объектов и ее применение в построении адаптивных систем управления / А.Е. Карелин, **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков. – Томск: Учебник. Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2011. – 180 с. ISBN 978-5-86889-554-8.

#### **Статьи в зарубежных и отечественных журналах из списка Scopus**

1. **Maysrenko A.V.** Application of numerical signal differentiation methods to determine stationarity of a process / N.V. Aksenova, T.V. Gandzha, V.M. Dmitriev, A.A. Svetlakov // Petroleum and Coal (2017); 59(3): 311-318 ISSN 1337-7027 an open access journal.

2. **Maysrenko A.V.** Indirect measurement of flow of liquid pumped with pump packages / N.V. Aksenova, T.V. Gandzha, A.A. Svetlakov // Petroleum and Coal (2017); 59(2): 244-249 ISSN 1337-7027 an open access journal.

3. **Maysrenko A.V.** Synthesis of an automatic control method for major oil pipelines based on inverse dynamics problem concept / N.V. Aksenova, T.V. Gandzha, A.E. Karelin, A.A. Svetlakov // Petroleum and Coal (2018); 59(2): 244-249 ISSN 1337-7027 an open access journal.

4. **Maysrenko A.V.** Some problems in approximating processes and objects related to major oil pipelines with algebraic polynomials // N.V. Aksenova, T.V. Gandzha, V.M. Dmitriev, A.A. Svetlakov // Petroleum and Coal (2019); 59(2): 244-249 ISSN 1337-7027 an open access journal.

5. **Maysrenko A.V.** Evaluating the Parameters of a Differential Equating Describing Start-up and Shutdown of a Pumping Unit // N.V. Aksenova, T.V. Gandzha, V.M. Dmitriev, A.A. Svetlakov // Pet Coal (2022); 64(2): 325-328 ISSN 1337-7027 an open access journal.

#### **Статьи в отечественных журналах из перечня ВАК**

1. **Майстренко А.В.** Цифровое дифференцирование сигналов в реальном масштабе времени с применением скользящей квадратичной аппроксимации / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // Омский научный вестник. №7(43), 2006.-С.106-108.

2. **Майстренко А.В.** Регуляризация простейшего алгоритма цифрового дифференцирования сигналов. / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. №4 (25), 2006. – С. 53-67.

3. **Майстренко А.В.** Цифровое дифференцирование сигналов с применением многоточечных методов в системах автоматического регулирования процессов / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // - Томск: Доклады ТУСУР №2(20), 2009. - С. 86-89.
4. **Майстренко А.В.** Синтез многоточечного метода цифрового дифференцирования сигналов / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков // Омский научный вестник. №3(83), 2009.- С.201-204.
5. **Майстренко А.В.** Исследование свойств матрицы Гильберта и причин ее плохой обусловленности / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Р.О. Черепанов // Омский научный вестник. №3(103), 2011.- С.265-269.
6. **Майстренко А.В.** Цифровое дифференцирование измеряемых сигналов с применением интегральных уравнений В.Вольтерра и его регуляризация / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // Омский научный вестник. №2 (120), 2013. – С. 308 – 313.
7. **Майстренко А.В.** Модифицированный алгоритм Грама–Шмидта ортонормирования конечномерных векторов и некоторые результаты его исследования / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Р.О. Черепанов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. № 3 (52), 2013. –С. 63-70
8. **Майстренко А.В.** Косвенное измерение расхода жидкости, перекачиваемой насосными агрегатами / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков // Доклады ТУСУР №4 (34), 2014. -С. 215-220.
9. **Майстренко А.В.** Применение методов цифрового дифференцирования сигналов для определения стационарности процессов / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. № 2 (59), 2015. – С. 7-19
10. **Майстренко А.В.** Цифровое дифференцирование сигналов на основе скользящей квадратичной аппроксимации и его применение в синтезе ПИД – регуляторов / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // Омский научный вестник. №1 (145), 2016. –С. 73-77
11. **Майстренко А.В.** Синтез метода автоматического регулирования процессов, основанного на концепции обратных задач динамики / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, С.А. Харитонов // Омский научный вестник. №4 (154), 2017. –С. 83-87.
12. **Майстренко А.В.** Экспериментальные исследования метода автоматического регулирования процессов, основанного на концепции обратных задач динамики // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. № 27, 2018. –С. 175-194.
13. **Майстренко А.В.** Синтез модифицированного метода обращения малых вещественных чисел / А.В. Майстренко, А.Е. Карелин, А.М. Малышенко, А.А. Светлаков, С.П. Сущенко // doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-50-55 Доклады ТУСУР, 2019, том 22, № 4.
14. **Майстренко А.В.** Дихотомия. Дихотомия? Дихотомия! основные положения, проблемы терминологии и инспекционный анализ метода дихотомии / А.В. Майстренко, К.А. Майстренко, А.А. Светлаков // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4(80). – С. 93–110.DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-93-110.

15. **Майстренко А.В.** Дихотомия. Дихотомия? Дихотомия! Модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений и некоторые результаты его исследований / А.В. Майстренко, К.А. Майстренко, А.А. Светлаков // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 85–102. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-85-102.

16. **Майстренко А.В.** Оценивание параметров дифференциального уравнения, описывающего процессы запуска и останова насосного агрегата / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (84). – С. 85–102. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-85-102.

### **Тезисы и доклады в трудах конференций**

1. **А.В. Майстренко.** Рекуррентный алгоритм подстройки модели объекта управления, основанный на применении псевдообратных матриц / Материалы докладов XXXIX всесоюзной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа. Изд-во УНИ, 1988.

2. **А.В. Майстренко.** Синтез адаптивной системы управления дилатометром и некоторые результаты ее исследования / **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков // Материалы докладов II Всесоюзной научно-технической конференции «Микропроцессорные системы автоматизации». Новосибирск, из-во НЭТИ, 1991, с.157-158.

3. В.Т. Антропов. Цифровое дифференцирование сигналов с применением скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообращения матриц / В.Т. Антропов, А.Е. Карелин, **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков // Материалы научно-практической конференции «Современные средства и системы автоматизации»/ - Томск. - 2003. 21-23 октября Изд-во ТУСУР.

4. В.Т. Антропов. Цифровое дифференцирование функций с применением конечных разностей / В.Т. Антропов, А.Е. Карелин, **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков // Труды X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» посвященная 400-летию г. Томска, 29 марта - 2 апреля 2004 г. в 2-х томах – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2004.

5. В.Т. Антропов. Цифровое дифференцирование сигналов с применением скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообращения матриц / В.Т. Антропов, А.Е. Карелин, **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков // Материалы научно-практической конференции «Современные средства и системы автоматизации» 21-23 октября 2004. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2004.

6. **А.В. Майстренко.** Цифровое дифференцирование сигналов с применением скользящей аппроксимации и псевдообратных матриц / **А.В. Майстренко**, Н.В. Старовойтов // Труды XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». 27 марта – 21 марта, 2006, Томск. Изд-во ТПУ, 2006.

7. **А.В. Майстренко.** Некоторые результаты исследования алгоритма цифрового дифференцирования сигналов, основанного на применении квадратичной ап-

проксимации / **А.В. Майстренко**, Н.В. Старовойтов // Материалы докладов межрегиональной научно-технической конференции "Научная сессия ТУСУР" 4-7 мая 2006, Томск, Россия. ТУСУР, 2006.

8. **А.В. Майстренко**. Применение регуляризации для простейшего метода цифрового дифференцирования на конечных приращениях сигнала и времени / **А.В. Майстренко**, Н.В. Старовойтов // Труды XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». 27 марта – 21 марта, 2006, Томск. Изд-во ТПУ, 2006.

9. **А.В. Майстренко**. Цифровое дифференцирование сигналов с применением многоточечных интегральных уравнений В. Вольтерра и его регуляризация / **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 5–8 мая 2008 г., Томск.

10. **А.В. Майстренко**. Применение модифицированного алгоритма чувствительности для построения разгонной характеристики асинхронного двигателя / **А.В. Майстренко**, Н.В. Старовойтов // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сборник трудов в 3 томах. – Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. - С. 291-293.

11. **А.В. Майстренко**. Определение коэффициентов математической модели разгонной характеристик асинхронного двигателя с помощью алгоритма чувствительности. / **А.В. Майстренко**, Н.В. Старовойтов // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сборник трудов в 3 томах. – Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. - С. 289-291.

12. **А.В. Майстренко**. Математическая модель электропривода переменного тока / **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // Электротехника, электроника и электротехнологии ЭЭЭ-2009 материалы IV научно-технической конференции с международным участием. - Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009 С. 147-153.

13. А.Г. Гарганеев. Применение модифицированного алгоритма чувствительности для построения математической модели скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя / А.Г. Гарганеев, **А.В. Майстренко**. // По материалам международной научно-технической конференции «Силовая электроника и энергоэффективность». Украина, Киев-2009, часть 4, -С.78-80.

14. **А.В. Майстренко**. Цифровое дифференцирование сигналов в реальном масштабе времени с применением скользящей линейной аппроксимации / **А.В. Майстренко**, В.Л. Савчук, А.А. Светлаков // Международная научно-практическая конференция «Перспективные инновации, в науке, образовании, производстве и транспорте 2009». – Одесса: Изд-во Черноморье, 2009. Том 2.

15. А.Г. Гарганеев. Цифровое дифференцирование сигналов с применением многоточечных методов в системах автоматического регулирования процессов /

А.Г. Гарганеев, **А.В. Майстренко**. // По материалам международной научно-технической конференции «Проблемы современной электротехники-2010» Украина, Киев-2010, -С.132-138.

16. А.Г. Гарганеев. Цифровое дифференцирование сигналов на основе скользящей квадратичной аппроксимации и его применением в синтезе ПИД – регуляторов / А.Г. Гарганеев, **А.В. Майстренко**. // По материалам международной научно-технической конференции «Силовая электроника и энергоэффективность». Украина, Киев – 2010, СЕЕ, часть 1, -С.205-208.

17. А.Г. Гарганеев. Применение методов цифрового дифференцирования сигналов для определения стационарности процессов /А.Г. Гарганеев, **А.В. Майстренко**. // По материалам международной научно-технической конференции «Силовая электроника и энергоэффективность». Украина, Киев – 2011, часть 1, - С.199-204.

18. А.Г. Гарганеев. Некоторые проблемы аппроксимации алгебраическими полиномами процессов и объектов в силовой электронике / А.Г. Гарганеев, **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков // По материалам международной научно-технической конференции «Силовая электроника и энергоэффективность». Украина, Киев – 2012, часть 2, - С.131-137.

19. А.Г. Гарганеев. Цифровое дифференцирование сигналов с использованием интегральных уравнений Вольтерра, и его применение для моделирования систем управления и контроля в силовой электронике / А.Г. Гарганеев, **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков // По материалам международной научно-технической конференции «Силовая электроника и энергоэффективность» Украина, Харьков-2013, часть 1, - С.111-116.

20. **А.В. Майстренко**. Косвенное измерение расхода перекачиваемой жидкости через насосный агрегат / **А.В. Майстренко**, А.А. Светлаков // По материалам международной научно-технической конференции «Силовая электроника и энергоэффективность» Украина, Одесса-2014, часть 1, - С.100-107.

21. **А.В. Майстренко**. Аналитическая модель и алгоритм синтеза распределенно-сосредоточенных цепей с несимметричными нагрузками / **А.В. Майстренко**, Г.А. Малютин, Т.А. Чепко, Т.Т. Чинь // 34-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь-2024, Вып. 6. — С. 47-49. (ISSN 2587-9936).