

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Майстренко Андрея Васильевича «Методы и алгоритмы цифрового дифференцирования сигналов, их реализация и применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

**Актуальность темы.** Диссертационная работа Майстренко Андрея Васильевича посвящена решению научной проблемы повышения эффективности функционирования АСУ ТП и совершенствованию управляющих и информационно-измерительных подсистем АСУ ТП. В частности, в работе рассмотрены научные задачи создания методов и алгоритмов цифрового дифференцирования сигналов (ЦДС). Эти алгоритмы имеют решающее значение как при реализации алгоритмов управления технологическими процессами, так и при реализации алгоритмов обработки сигналов в измерительных системах. Совершенствование алгоритмов ЦДС в части повышения быстродействия и помехоустойчивости позволяет существенно повысить надежность и быстродействие элементов АСУ ТП, что имеет важное значение для автоматизации и управления технологическими процессами и производствами. Все это подтверждает актуальность темы диссертационной работы.

**Содержания диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы содержащем 169 наименований, имеет 344 страницы основного текста, содержит 69 рисунков и 12 таблиц, список сокращений и приложения на 11 страницах.

Автореферат диссертации написан и оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Он полностью отражает содержание диссертационной работы.

Во **введении** отражена актуальность темы диссертационной работы, представлена основная характеристика работы, поставлены цели и задачи исследования, сформулирована новизна, теоретическая и практическая значимость результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится обоснование решения научной проблемы и необходимости использования первой и более высокого порядка производных управляемых переменных систем управления сложными динамическими процессами и объектами. Приведена постановка научных задач ЦДС, проблемы повышения эффективности функционирования АСУ ТП и осуществлен анализ ее особенностей. Проведен обзор существующих методов решения задач ЦДС. Сформулированы требования к алгоритмам ЦДС в реальном масштабе времени. Синтезирован способ регуляризации на примере метода ЦДС, основанного на использовании решений интегральных уравнений В. Вольтерра.

**Вторая глава** посвящена методу дихотомии (МД). В ней приведены основные положения МД, рассмотрены его недостатки и преимущества. Синтезирован модифицированный МД решения нелинейных скалярных уравнений, который позволяет получать более быстросходящиеся последовательности приближенных решений нелинейных скалярных уравнений и требует значительно меньших объемов вычислений. На примерах ряда уравнений проиллюстрирована более высокая скорость сходимости решений, вычисляемых с применением модифицированного МД и обосновано преимущество синтезированного метода для использования при создании АСУ ТП.

**В третьей главе** представлены новые методы и алгоритмы ЦДС. Приводится математическая постановка метода ЦДС, основанного на скользящей аппроксимации дифференцируемого сигнала квадратичными полиномами и псевдообратных матрицах. Изложена сущность предлагаемого метода, состав и последовательность вычислительных операций, которые

необходимо выполнить для вычисления первой и второй производных сигнала.

Детально рассмотрен алгоритм Гревилля вычисления псевдообратных матриц и обоснован выбор данного алгоритма по сравнению с другими подобными алгоритмами.

**В четвёртой главе** синтезирован оригинальный метод определения стационарности процессов, основанный на применении, одного из синтезированного автором алгоритма ЦДС. Отличительной особенностью разработанного метода от традиционных методов определения стационарности, является то, что он обладает высокой устойчивостью к погрешностям измерений сигнала и, в отличие от методов используемых в математической статистике, позволяет определять стационарность процесса уже по трем измерениям, пригоден для работы с сигналами, измеряемыми в реальном масштабе времени, позволяет в широких пределах выбирать доверительные интервалы для того, чтобы установить является ли текущий режим стационарным, руководствуясь, при этом, теми или иными правилами (опытом эксплуатации).

**В пятой главе** приведены методы решения некорректно поставленных задач. Даны основные понятия и термины плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) рассмотрены способы их регуляризации. Синтезирована модификация алгоритма Грама–Шмидта и Уилкинсона ортонормирования конечномерных векторов, имеющая приблизительно в два раза меньшую неустойчивость решения по отношению к ошибкам задания ортонормируемых векторов и ошибкам вычисления решений. Разработанный алгоритм позволяет существенно упростить получение математических моделей линейных статических объектов. Представлены экспериментальные исследования основных характеристик матриц Гильберта при различной точности представления вещественных чисел. Синтезирован алгоритм, основанный на применение математики

«длинных чисел» позволяет получить основные характеристики матриц Гильберта до сотого порядка и выше.

**В шестой главе** проводится анализ недостатков ПИД-регуляторов и возможностей их устранения. Рассмотрены основные положения ПИД-регулирования объектов и выявлены проблемы его практического использования. Синтезирован ПИД-регулятор, обладающий существенными преимуществами по сравнению со стандартными регуляторами. К преимуществам нового ПИД-регулятора относятся, простая программная реализация, более высокая точность и помехоустойчивость регулирования. Изложена сущность концепции обратных задач динамики применительно к задаче автоматического регулирования объектов. Разработаны методы и алгоритмы автоматического управления объектами, основанные на концепции обратных задач динамики и разностных уравнениях, описывающих связи между значениями управляемой переменной и управляющих воздействий объекта, формируемых алгоритмом управления. Применение метода позволяет избавиться от основной причины, обуславливающей неустойчивость как ПИД-регулирования, так и других законов регулирования, в которых используется ЦДС и существенно повысить точность. Разработанный метод является универсальным и позволяет синтезировать регуляторы для объектов управления, функционирование которых может быть описано как обыкновенными дифференциальными, так и разностными уравнениями различных порядков.

**В заключении** соискателем сформулированы основные результаты выполненного диссертационного исследования и выводы по работе. В приложения вынесены тексты программ и сведения об использовании результатов в промышленности.

**Публикации диссертационной работы.** По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 51 работа, в том числе 5 монографий и учебных пособий, 5 статей в журналах, индексируемых в SCOPUS, 16 статей в журналах из перечня ВАК.

## **Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научной новизной обладают следующие результаты диссертации:

1) Для линейных АСУ ТП с максимальным быстродействием разработаны: а) оригинальный способ регуляризации на примере метода ЦДС, основанного на использовании решений интегральных уравнений В. Вольтерра и два метода структурной регуляризации плохо обусловленных СЛАУ; б) в качестве элемента математического обеспечения АСУ ТП синтезирован модифицированный алгоритм Грама-Шмидта и Уилкинсона, 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.

2) Для систем автоматического регулирования синтезирован и реализован в Matlab Simulink метод ЦДС, основанный на применении многоточечного оценивания неизвестных величин по результатам их экспериментальных измерений и псевдообратных матрицах.

3) В качестве элемента математического обеспечения АСУ ТП, для нелинейных систем управления, разработан модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений, обладающий более высокой скоростью сходимости вычисляемых решений к их истинным решениям.

4) Для АСУ ТП 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, позволяющий обрабатывать входные сигналы по мере их поступления и самостоятельно выбирать доверительные интервалы стационарности.

5) Для тестирования алгоритмов матричных вычислений систем АСУ ТП синтезирован модифицированный метод обращения малых вещественных чисел, основанный на применении математики «длинных чисел», позволяющий получить характеристики матриц Гильберта, до сотого порядка и выше.

6) На базе алгоритма ЦДС, основанного на применении скользящей квадратичной аппроксимации дифференцируемого сигнала и псевдообратных матрицах разработан ПИД-регулятор, обладающий существенными преимуществами по сравнению со стандартным ПИД-регулятором.

7) Для автоматического управления объектами, синтезирован метод, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнениях, описывающих связи между управляемыми переменными и управляющими воздействиями объекта управления, формируемых алгоритмом управления. Применение метода позволяет избавиться, как от ПИД-регулирования, так и других законов регулирования, в которых используется производные сигналов.

### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность и достоверность результатов диссертационного исследования 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 на реальных объектах автоматизации в РФ.

Для решения поставленных задач использованы методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, линейной алгебры, методы оптимизации и численного моделирования. При создании программного обеспечения для исследований синтезированных

алгоритмов использовался пакет моделирования MATLAB, для него были разработаны модули, реализующие как технические средства автоматизации, так и подпрограммы вычисления различных математических процедур, позволяющие в полной мере исследовать все основные характеристики и свойства разработанных алгоритмов.

### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

**Теоретическая значимость** диссертации Майстренко Андрея Васильевича 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 / алгоритмы, которые можно применять в АСУ ТП любой степени сложности. Теоретическая значимость подтверждена экспериментальным путем.

Предложен новый подход к синтезу методов автоматического управления, основанный на использовании концепции обратных задач динамики, автоматизированному решению задач исследования, функционирования и проектирования сложных технических управляемых систем в том числе и нелинейных.

### **Практическая значимость.**

В АО «ЭлеСи» алгоритмы ЦДС используются при разработке автоматических регуляторов, для автоматизации управления магистральными нефтепроводами разработан и реализован метод определения стационарности процессов, основанный на применении алгоритма ЦДС с использованием скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц.

По заказу компании «Сибagro Мясопереработка» разработана АСУ варочными и охлаждающим камерами «Маунтинг», для этого был разработан и интегрирован в устройство управления специализированный регулятор, основанный на применении алгоритма ЦДС со скользящей аппроксимацией дифференцируемого сигнала полиномами второго порядка.

Практическое использование алгоритма ЦДС, основанного на применении скользящей квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц, реализовано в виде ПИД-регулятора, функционирующего в АСУ шкафами автоматики в филиале «Новолипецкого Металлургического комбината» г. Томск, там же был разработан и реализован адаптивный регулятор, базирующийся на использовании метода автоматического регулирования процессов, основанного на концепции обратных задач динамики, интегрированный в АСУ 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 в динамических режимах.

### **Замечания по диссертации**

1. В диссертации неоднократно упоминается о том, что синтезированные методы и алгоритмы ЦДС реализованы в пакете Matlab Simulink, но при этом, нет иллюстраций моделей, с помощью которых исследовались основные свойства и характеристики данных алгоритмов, хотя совершенно очевидно, что они существуют.

2. В главе 4 отсутствует информация о реализации интерфейса оператора для SCADA-системы с параметрами алгоритма ЦДС на основе скользящей



квадратичной аппроксимации и псевдообратных матриц. В результате затруднительно оценивать удобство его использования и квалификационные требования к обслуживающему персоналу.

3. Из диссертации неясно как изменятся показатели грубости систем автоматического управления от применения предложенных в диссертации алгоритмов, таких как алгоритм цифрового дифференцирования и алгоритм с адаптивным регулятором.

4. Из текста диссертации неясно как себя поведет система управления с предложенным ПИД-регулятором относительно типовых решений с цифровыми регуляторами при исследовании грубости системы. Например, при изменении параметров объекта управления в пределах  $\pm 20\%$ .

5. В главе 6 приведены примеры практического применения синтезированных в диссертации методов и алгоритмов ЦДС, на их основе разработаны цифровые регуляторы и системы управления, но нет информации о том, какие контроллеры были использованы при решении данных задач, каковы их возможности и технические характеристики.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Майстренко Андрея Васильевича.

### **Заключение**

Оценивая диссертационную работу Майстренко Андрея Васильевича, необходимо отметить ее высокий уровень, научную обоснованность и новизну разработанных методов и алгоритмов, а также программно-технических решений, актуальность и ценность результатов с теоретической и практической точек зрения.

Диссертационная работа Майстренко Андрея Васильевича «Методы и алгоритмы цифрового дифференцирования сигналов, их реализация и применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами» является законченной научно-квалификационной работой, в

которой изложены новые научно-обоснованные решения проблемы повышения эффективности функционирования АСУТП путем совершенствования управляющих и информационно-измерительных подсистем, внедрение синтезированных методов и алгоритмов ЦДС вносит существенный вклад в развитие и совершенствование динамических АСУТП.

Диссертационная работа отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к докторским диссертациям, а её автор – Майстренко Андрей Васильевич заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор Отделения ядерно-топливного цикла на правах кафедры  
Инженерной школы ядерных технологий ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет»



Горюнов Алексей Германович

02.12.24

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет».

Адрес: Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

Тел. +7 (3822) 701777, доб. 2335, электронная почта: [alex1479@tpu.ru](mailto:alex1479@tpu.ru)

Подпись Горюнова А.Г. заверяю:

И.о. учёного секретаря Учёного совета

Национального исследовательского

Томского политехнического университета



Новикова Валерия Дмитриевна