

## ОТЗЫВ

официального оппонента Мышляева Леонида Павловича  
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 А.В. посвящена решению проблемы повышения эффективности функционирования АСУТП и совершенствованию управляющих и информационно-измерительных подсистемы АСУТП.

В течение последних десятилетий алгоритмам цифрового дифференцирования сигналов (ЦДС), являющихся компонентами управляющих и информационно-измерительных подсистемы АСУТП, уделялось очень мало внимания несмотря на то, что они играют важнейшую роль, оказывая прямое влияние на качество функционирования АСУТП. И лишь в последние годы решению задачи дифференцирования сигналов начали уделять должное внимание потому как она является одной из тех задач, с которыми приходится иметь дело в различных отраслях науки и техники, связанных с моделированием динамических процессов, описываемых дифференциальными уравнениями, и с автоматизацией управления данными процессами. 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.

Традиционная 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.

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

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

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

**В первой главе** приводится обоснование решения научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. Современные АСУ сложными динамическими процессами и объектами невозможны без использования первой и более высокого порядка производных регулируемых переменных и знания точных оценок их значений. Приводится постановка задачи ЦДС и осуществляется анализ ее особенностей. Проводится краткий обзор существующих методов решения рассматриваемой задачи, и анализируются их достоинства и недостатки. Сформулированы требования к алгоритмам ЦДС в реальном масштабе времени. Синтезирован оригинальный 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, проблемы терминологии и инспекционный анализ МД. Синтезирован модифицированный МД решения нелинейных скалярных уравнений и приведены некоторые результаты его исследований. При создании и эксплуатации АСУТП регулярно возникает необходимость решения нелинейных уравнений. МД имеет низкую скорость сходимости последовательности приближенных решений, и большие объемы вычислений, необходимые для получения точных решений, однако обладает рядом существенных преимуществ. Разработанный модифицированный вариант МД, позволяет получать более быстросходящиеся последовательности приближенных решений нелинейных скалярных уравнений и требует значительно меньших объемов вычислений. Решением ряда уравнений проиллюстрирована более высокая скорость сходимости решений, вычисляемых с применением модифицированного МД и, обосновано преимущество синтезированного метода для его использования при создании АСУТП.

**Третья глава** посвящена разработке новых и модификации существующих методов ЦДС. Приводится 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  $t$ . В дальнейшем на базе данного алгоритма был создан метод и алгоритм определения режимов стационарности процессов и синтезирован помехоустойчивый ПИД-регулятор

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

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

Важным отличием разработанного метода от традиционных методов определения стационарности, является то, что он позволяет в широких пределах выбирать доверительные интервалы и критерии того, является ли текущий режим стационарным, руководствуясь теми или иными правилами.

Метод обладает высокой устойчивостью к погрешностям измерений дифференцируемого сигнала и позволяет определять стационарность процесса даже по трем измерениям, пригоден для работы с сигналами, измеряемыми в реальном масштабе времени, что невозможно для критериев стационарности, используемых в математической статистике.

**В пятой главе** приведены методы решения некорректно поставленных задач. Даны основные понятия и термины плохо обусловленных 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. Проведены экспериментальные исследования основных характеристик матриц Гильберта при различной точности представления вещественных чисел. Синтезирован алгоритм, основанный на применении математики «длинных чисел» позволяет получить основные характеристики матриц Гильберта до сотого порядка и выше. Матрицы Гильберта, имеющие плохую обусловленности часто используются в качестве тестовых для матричных вычислений в АСУТП.

**В шестой главе** проводится анализ недостатков ПИД – регуляторов и возможностей их устранения. Рассмотрены основные положения ПИД – регулирования объектов и выявлены проблемы его практического использования, обусловленные неустойчивостью вычисляемых управляющих воздействий к ошибкам измерений регулируемой переменной управляемого объекта. Синтезирован ПИД–регулятор, обладающий существенными преимуществами по сравнению со стандартными регуляторами. К преимуществам нового ПИД–регулятора можно отнести, достаточно простую программную и аппаратную реализацию, более высокую точность и качество регулирования, более высокую помехоустойчивость. Изложена сущность концепции обратных задач динамики применительно к задаче автоматического регулирования объектов. Разработаны методы и алгоритм автоматического регулирования объектов, основанные на концепции обратных задач динамики и разностных уравнениях, описывающих связи между значениями регулируемой переменной объекта 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. Разработанный метод является универсальным и позволяет синтезировать регуляторы для



ОУ, 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.

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 АСУТП с максимальным быстродействием разработаны:

а) оригинальный способ регуляризации на примере метода ЦДС, основанного на использовании решений интегральных уравнений В. Вольтерра. Синтезированы 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 программно реализован метод ЦДС, основанный на применении многоточечного оценивания неизвестных величин по результатам их экспериментальных измерений и псевдообратных матрицах;

3) 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;

4) 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 и позволяющий оператору АСУТП самостоятельно выбирать доверительные интервалы стационарности;

5) для тестирования систем АСУТП синтезирован модифицированный метод обращения малых вещественных чисел, основанный на применение

математики «длинных чисел», позволяющий получить характеристики матриц Гильберта, до сотого порядка и выше, ее применение позволяет тестировать алгоритмы матричных вычислений;

6) 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;

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

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

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 на реальных объектах автоматизации в Российской Федерации.

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, программно 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 А.В. заключается в том, что в ней решена актуальная научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение. Для управляющих и информационно-измерительных подсистем АСУТП 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 в том числе и нелинейных.

#### **Практическая значимость.**

Особо следует отметить важность решения следующих практических задач: определение стационарности различных процессов, робастного обращения динамических операторов, модернизации закона ПИД-регулирования.

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 коптильно-варочными и охлаждающим камерами «Маутинг», для них был разработан и изготовлен специализированный регулятор, основанный на применении алгоритма ЦДС со скользящей аппроксимацией 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) в динамических режимах. Работы выполнены в рамках совместного с НИТУ х/д на тему «Разработка программного обеспечения для моделирования компонентов системы СГА-ОН, выдача рекомендаций для пользователя»

#### **Замечания по диссертации**

1. Неочевидна зависимость для реальных условий кривой 2 на рис. 2 автореферата, так как в постановке задачи п.4 модель ошибки измерения



должна удовлетворять жестким условиям (формула 4). Ошибки некоррелированные центрированные случайные величины с ограниченной дисперсией, кроме того не конкретизирован закон распределения случайной величины.

2. Объект управления в автореферате описывается моделью (формула 15) с точно известными коэффициентами  $\alpha$ , что является очень серьезным ограничением при решении практических задач. Необходим анализ влияния неопределенности этих коэффициентов на показатели эффективности предложенного метода.

3. На рис.11 автореферата (с.33) и в диссертации в представленной схеме системы управления неконтролируемые возмущения  $v_i$  коррелированы через обратную связь с управляющими воздействиями  $u_i$ . В этом случае решение задачи идентификации объекта традиционными методами некорректно и требует специальных методов активной идентификации.

4. В анализе известных работ следовало бы рассмотреть исследования школы академика С.В. Емельянова по дифференцированию сигналов, например «Дифференцирование сигналов в системах автоматического управления», Автоматика и телемеханика, 2015, №12, с.27-42.

5. В диссертации слабо представлены материалы по визуализации процесса определения стационарности сигналов для работы оператора в SCADA-системе (глава 4), нет рисунков реализации ЦДС в пакете MATLAB, нет сведений о технических средствах реализованных промышленных автоматических систем управления.

### Заключение

Оценивая работу в целом, следует отметить ее высокий уровень, научную обоснованность и новизну программно-технических решений, доказательность изложения их в тексте диссертации, актуальность и ценность результатов, как с теоретической, так 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 значительный вклад в развитие страны.

Диссертация Майстренко А.В. посвящена повышению эффективности функционирования АСУТП, а именно управляющим и информационно-измерительным подсистемам, и алгоритмам дифференцирования сигналов, являясь компонентами данных подсистем. 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.

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:

Директор ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» г. Новокузнецк

доктор технических наук, профессор

Л.П. Мышляев  
28.11.2024

Мышляев Леонид Павлович ООО «Научно-исследовательский центр систем управления». Россия, 654005, г. Новокузнецк, пр. Строителей д. 55А, телефон: 8- 905- 911- 51- 16, e-mail: myshl\_948@mail.ru.

Подпись профессора д.т.н. Мышляева Л.П. удостоверяю.

Инспектор отдела кадров

ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» г. Новокузнецк



Е.В. Иванова