

## 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 диссертации

По мере повышения требований к качеству производимых технических изделий, повышению их сложности и точности реализации технологических процессов всё более жёсткие требования предъявляются к автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУТП). Тема диссертационного исследования посвящена решению проблемы повышения эффективности функционирования АСУТП путём совершенствования управляющих и информационно-измерительных подсистем, при этом формирование динамических характеристик технологических процессов всецело зависит от точности и временного интервала определения темпов изменения анализируемых сигналов.

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 создание цифровых регуляторов, обеспечивающих реализацию управления технологическими процессами в соответствии с заданными режимами и с высокой точностью, а алгоритмы цифрового дифференцирования сигналов (ЦДС), являясь компонентами упомянутых подсистем, играют важную роль, так как оказывают прямое влияние на качество функционирования АСУТП.

Основными требованиями, предъявляемыми к алгоритмам ЦДС, являются их быстродействие, точность вычисляемых оценок производных и устойчивость вычисляемой производной к ошибкам задания дифференцируемого сигнала. В связи с противоречивостью данных требований, бывает сложно воспользоваться каким-либо известным алгоритмом поэтому возникает потребность в алгоритмах, способных удовлетворить тем требованиям, которые необходимо выполнить при решении конкретной задачи.



Представленная диссертация Майстренко Андрея Васильевича посвящена решению сформулированной выше проблемы и выполненная работа актуальна как с точки зрения теоретической значимости, так и области практического применения.

### **Анализ содержания диссертационной работы**

Представленная диссертация включает: введение, 6 глав, заключение, список литературы из 169 наименований, список сокращений и приложения на 11 страницах. Объем диссертации с приложениями – 344 страницы.

**В первой главе** приводится обоснование решения научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. При создании сложных АСУТП необходимо использование первой и более высокого порядка производных регулируемых переменных и знания достаточно точных оценок их значений. Формулируется 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.

**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. Предложен модифицированный вариант МД, позволяющий получать более быстросходящиеся последовательности приближенных решений НСУ и требующий до двух раз 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.

**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



систем линейных алгебраических уравнений и алгоритм вычисления псевдообратных матриц.

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

**В пятой главе** приведены методы решения некорректно поставленных задач. Даны основные понятия и термины плохо обусловленных СЛАУ детально рассмотрены способы их регуляризации. Предложена модификация алгоритма Грама–Шмидта ортонормирования конечномерных векторов, применяя которую можно почти в два раза снизить 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 исследования основных характеристик матриц Гильберта, которые сильно отличаются, в зависимости от того, какую использовать точность представления вещественных чисел при проведении экспериментальных исследований. Применение математики «длинных чисел» позволяет получить основные характеристики матриц Гильберта до сотого порядка и выше. Матрицы Гильберта имеют плохую обусловленность и именно поэтому часто используются в качестве тестов для матричных вычислений в АСУТП.

**В шестой главе** проводится анализ недостатков ПИД – регуляторов и возможностей их устранения. Рассмотрены основные положения ПИД – регулирования объектов, являющегося одним из наиболее популярных законов регулирования, 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 предложенного 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. Синтезирован метод автоматического регулирования объектов, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнений, описывающих связи между значениями регулируемой переменной объекта и управляющих воздействий, формируемых регулятором. Показано, что разработанный метод является достаточно универсальным и позволяет синтезировать регуляторы для всех объектов управления, функционирование которых может быть описано как обыкновенными дифференциальными уравнениями, так и разностными уравнениями различных порядков.

**В заключении** соискателем изложены выводы и основные результаты выполненного диссертационного исследования.

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.

**Оформление диссертации** соответствует установленным требованиям.

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

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

Научной новизной обладают следующие результаты диссертации:

- 1) 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;
- 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) 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 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;

6) 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;

7) 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;

8) 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.

#### **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.



## **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 АСУ ТП синтезированы и реализованы новые методы и алгоритмы ЦДС, которые представляют высокую теоретическую ценность, так как на их основе можно создать 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.**

Алгоритмы ЦДС использованы при разработке регуляторов различного типа и назначения в АО «ЭлеСи», 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 ва-рочными камерами «Маутинг», 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 в филиале «Новолипецкого Металлургического комбината» в г. Томске, там же 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».

Алгоритм ЦДС, основанный на использовании многоточечного оценивания неизвестных величин по их экспериментальным измерениям и псевдообратных матриц применён при синтезе регуляторов цифровой системы управления транзисторным преобразователем частоты по заказу ОАО АКБ



«Якорь-2» (г. Москва). 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»

### Замечания по диссертации

1. В диссертации ничего не сказано о методах автоматического дифференцирования, которые в последнее время начали активно разрабатывать некоторые зарубежные компании и встраивать в различные пакеты программ.

2. В главе 5 сказано, что разработанная модификация алгоритма Грама–Шмидта позволяет в два раза снизить неустойчивость решения по отношению к ошибкам задания ортонормируемых векторов и ошибкам вычисления решений, существенно упростить получение математических моделей линейных статических объектов, содержащих минимально необходимое число входных переменных и обеспечивающих приемлемую точность прогнозирования значений выхода моделируемого объекта по заданным значениям его входов, но нет наглядного модельного примера конкретного объекта иллюстрирующего данные утверждения.

3. В шестой главе синтезирован метод и алгоритм автоматического регулирования объектов, основанный на концепции обратных задач динамики и разностных уравнений, описывающих связи между значениями регулируемой переменной объекта и управляющих воздействий, формируемых регулятором. В задачах управления бывают случаи, когда необходимо разработать регулятор с определенными характеристиками, но задача осложняется тем, что уравнения, описывающие управляемый объект, оказываются нелинейными, что осложняет построение регулятора. Очевидно, что разработанный метод, позволяет учесть нелинейные особенности строения объекта управления, однако в диссертации об этом ничего не сказано.

4. Последний пункт «Положения, выносимые на защиту» содержит «- 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)», что является документально подтверждённым фактом и не является утверждением, требуемым защиты.

### **Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения ВАК**

Диссертация Майстренко Андрея Васильевича является законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему, в которой изложены научно-обоснованные решения проблемы повышения эффективности функционирования АСУТП и совершенствованию управляющих и информационно-измерительных подсистемы АСУТП, синтезированы новые методы и алгоритмы ЦДС, являющиеся компонентами данных подсистем и оказывающие прямое влияние на качество функционирования АСУТП.

Считаю, что диссертация «Методы и алгоритмы цифрового дифференцирования сигналов, их реализация и применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами» соответствует п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 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:

Профессор кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования «Сибирского федерального университета»

доктор технических наук, профессор

26.11.2024 г.



С.В. Ченцов

Ченцов Сергей Васильевич ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Россия, 660041, Красноярский край, г. Красноярск, стр. Свободный, 79, телефон +7 (391) 206-22-22; 244-86-25, e-mail: [suchen@mail.ru](mailto:suchen@mail.ru)

