На правах рукописи

Ingr

## Япаров Дмитрий Данилович

# Методы обработки динамических измерений на основе регуляризации

2.3.1 - Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Челябинск – 2025

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Шестаков Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: Дилигенская Анна Николаевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

> **Иванова Наталья Дмитриевна,** кандидат физико - математических наук, доцент, заведующий лабораторией комплексных цифровых решений ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится 20 мая 2025 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.437.02 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», расположенном по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», а также на официальном сайте:

https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243702-d-21229803/yaparov-dmitriy-danilovichallow of the second straight straigh

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 454080 г.Челябинск, пр.Ленина, 76, Ученый совет, тел. +7(351)267-91-23.

Ученый секретарь диссертационного совета

А.В. Голлай

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные сложные быстропротекающие, энергоемкие процессы неразрывно связаны с совершенствованием систем автоматического управления технологическими процессами (АСУ ТП). Разработка, исследование и совершенствование новых методов проектирования и реализации высококачественных интеллектуальных АСУ ТП на промышленных объектах направлено на обеспечение точности и надежности получаемой информации от первичных измерительных преобразователей, проводящих измерения в динамическом режиме. Данные измерения характеризуются в том числе и динамической погрешностью, которая зачастую оказывается существенно больше всех других составляющих погрешности.

Основой теории динамических измерений является восстановление входного сигнала по зашумленному выходному сигналу, содержащему динамическую погрешность. Основы современной теории динамических измерений заложены в трудах С.М Мандельштам, Г.И. Солопченко, В.В. Леонов, В.А. Грановский, Г.И. Кавалеров, В.М. Хрумало, Г.И. Василенко, А.Л. Шестакова.

Привлечение к теории динамических измерений результатов, полученных в области фундаментальных и прикладных математических исследований, привело к созданию методов обработки информации, основанных на редукции исходных задач к интегральным уравнениям, численное решение которых базируется на теории обратных задач и использовании регуляризирующих подходов. Основы теории обратных задач заложены в трудах А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева, В.К. Иванова и развиты в работе их учеников и последователей В.Я. Арсенина, А.С. Апарцина, А.Б. Бакушинского, В.И. Васильева, В.В. Васина, А.М. Денисова, С.И. Кабанихина, А.И. Короткого, Д.В. Лукьяненко, В.А. Морозова, В.Г. Романова, В.П. Тананы, М.А. Шишленина, А.Г. Яголы и других исследователей. Среди работ, посвященных проблеме наилучших приближений и оптимальных методов восстановления функций, заданных с погрешностью, отметим работы В.В. Арестова, Е.В. Абрамовой, К.Ю. Кривошеева, А.Г. Марчука, К.Ю. Осипенко, С.П, Сидорова. Разработке вычислительных схем, связанных с решением обратных прикладных задач посвящены работы О.М. Алифанова, Е.Н. Акимовой, П.Н. Вабищевича, А.А. Самарского, В.В. Садовского, В.С. Сизикова, В.М. Шайдурова. Использованию регуляризации в методах обработки динамических измерений посвящены работы Г.Н. Солопченко, А.Ф.Верланя, Г.И. Василенко. Это позволило эффективно уменьшать негативное влияние шумов на точность восстановления входного сигнала.

Эффективным подходом к обработке динамических измерений является создание и совершенствование методов коррекции динамической погрешности на основе структурной теории автоматического управления за счет введения обратных связей. Данному направлению посвящены работы А.Л. Шестакова, Е.В. Юрасовой, М.Н. Бизяева, Д.Ю. Иосифова, А.С. Волосникова. Введение обратных связей позволяет корректировать динамическую погрешности методами теории автоматического управления и восстанавливать входной сигнал с достаточным уровнем точности, но такой подход приводит к необходимости настраивать коэффициенты обратных связей в зависимости от изменения уровня зашумленности данных, при этом каждый раз возникает проблема выбора характеристик фильтра, что приводит к существенному усложнению вычислительной процедуры восстановления входного сигнала.

Учитывая вышесказанное, разработка динамических моделей информационно-измерительных систем и методов обработки результатов динамических измерений, основанных на регуляризирующих подходах и сводящих к минимуму трудоемкость процедуры коррекции динамической погрешности является актуальной научно-технической задачей.

Цель исследования заключается в разработке и исследовании методов обработки динамических измерений для восстановления входного сигнала в информационноизмерительных системах на основе регуляризации.

Основными задачами диссертационного исследования являются:

1. Разработка модели информационно-измерительной системы без обратных связей и вычислительного алгоритма валидации модели без обратных связей для информационно-измерительной системы второго порядка относительно выходного сигнала.

2. Разработка и верификация метода восстановления входного сигнала, обладающего эффектом саморегуляризации, и метода восстановления входного сигнала для информационно-измерительной системы второго порядка относительно выходного сигнала с фиксированным и регулируемым интервалом измерений.

3. Разработка модели без обратных связей для информационно-измерительной системы произвольного порядка относительно входного и выходного сигнала.

4. Разработка и верификация метода восстановления входного сигнала для информационно-измерительной системы произвольного порядка относительно входного и выходного сигнала, обладающего эффектом саморегуляризации.

**Объектом исследования** являются информационно-измерительные системы, представленные передаточными функциями, в которых динамическая погрешность является основной составляющей общей погрешности.

**Предметом исследования** являются модели информационно-измерительных систем и методы обработки зашумленных динамических измерений.

**Тематика работы.** Содержание диссертации соответствуют следующим пунктам специальности 2.3.1-"Системный анализ, управление и обработка информации, статистика":

П1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

П4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

П5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Разработана модель без обратных связей для информационно-измерительной системы, представленной динамическим звеном произвольного порядка.

2. Разработаны вычислительные алгоритмы валидации модели без обратных связей для информационно-измерительной системы, представленной динамическим звеном произвольного порядка, основанные на решении прямой задачи, характеризующую связь входного и выходного сигналов.

3. Разработаны методы восстановления входного сигнала для информационно-измерительных систем, представленных динамическими звеньями произвольного порядка по зашумленному выходному сигналу, основанные на решении обратных задач, характеризующих связь входного и выходного сигналов и представленных дифференциальными уравнениями высших порядков.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в создании новых моделей без обратных связей, представленных задачей Коши для дифференциальных уравнений высших порядков, служащих основой для методов обработки информации в информационно-измерительных системах произвольного порядка; в разработке методов валидации моделей без обратных связей, позволяющих обеспечивать контролируемый уровень погрешности восстановления входного сигнала выбором параметра регуляризации в стабилизирующем функционале для информационноизмерительных систем второго порядка с фиксированным интервалом измерений; в разработке методов валидации моделей без обратных связей, позволяющих обеспечивать контролируемый уровень погрешности восстановления входного сигнала регулированием интервалом измерений для систем произвольного порядка; в разработке новых методов восстановления входного сигнала по зашумленному выходному сигналу для информационно-измерительных систем второго порядка с фиксированным интервалом измерений; разработке новых методов восстановления входного сигнала по зашумленному выходному сигналу для информационно-измерительных систем произвольного порядка.

Практическая значимость диссертационного исследования определяется тем, что предложенные модели, методы и алгоритмы используются для обработки результатов динамических измерений в системах контроля технических систем. Полученные результаты используются при разработке рекомендаций по выбору и регулированию интервала измерений при настройке информационно-измерительных систем произвольного порядка для повышения точности динамических измерений, а также для обеспечения безопасности технологического процесса путем фиксации пикообразных сигналов.

Методология и методы диссертационного исследования. Теоретической и методологической основой диссертационного исследования являются теория и методы системного анализа, решения некорректных задач и аппарат конечно-разностных уравнений.

#### Положения, выносимые на защиту

1. Модель информационно-измерительной системы без обратных связей со стабилизирующим функционалом, представленной динамическим звеном второго порядка, и алгоритм валидации модели.

2. Метод восстановления входного сигнала по зашумленному выходному сигналу со стабилизирующим функционалом для информационно-измерительной системы второго порядка относительно выходного сигнала с фиксированным интервалом измерений.

3. Модель информационно-измерительной системы без обратных связей произвольного порядка с настраиваемым интервалом измерений и алгоритм валидации модели.

4. Метод восстановления входного сигнала по зашумленному выходному сигналу с эффектом саморегуляризации для информационно-измерительной системы произвольного порядка с настраиваемым интервалом измерений.

Реализация результатов исследования. Полученные в работе результаты использовались при выполнении НИР в рамках государственного задания №FENU-2023-0010 (2023010ГЗ) для обработке данных предоставленных Локотех АО "ЖЕДОРРЕМ-МАШ Челябинским Компрессорным Заводом.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования обсуждались и докладывались на XXI Международном конгрессе по измерениям в исследованиях и промышленности (XXIV IMEKO World Congress Measurement in Research and Industry.), 2024, XIII Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики посвященная памяти академика А.Ф.Сидорова, 2024, Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития, 2023, XXVIII Байкальская Всероссийская конференция с международным участием "Информационные и математические технологии в науке и управлении 2023, Актуальные проблемы прикладной математики и механики XI Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых, посвященной памяти академика А.Ф. Сидорова. Екатеринбург, 2022, 13-th International Comference "Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences 2021, Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития, 2020.

Публикации. Основные научные положения, выводы и результаты диссертации опубликованы в 7 работах, из них 4 в изданиях из перечня ВАК, 3 в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science, получено 3 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, зарегистрированных в государственном Реестре.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 90 наименований, и 5 приложений,

содержащих сведения об апробации и реализации результатов исследования. Общий объем работы составляет 130 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы. В этом разделе обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные результаты исследований, а также приведены сведения о публикациях, положениях, выносимых на защиту, апробации и реализации результатов исследования.

Первая глава содержит анализ существующих подходов к обработке информации в информационно-измерительных системах в условиях зашумленных и динамически изменяющихся исходных данных. Представлена предметная область исследования, выявлены особенности проведения измерений в технологическом оборудовании, в системах автоматического управления технологическим процессом, а также проведен анализ современных методов решения задач обработки результатов динамических измерений. По результатам анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена задача восстановления входного сигнала для измерительной системы, представленной динамическим звеном второго порядка. В работе предложена модель информационно-измерительной системы без обратных связей, базирующаяся на переходе к дискретной модели информационно-измерительной системы, а также метод ее валидации и метод восстановления входного сигнала. Коррекция динамической погрешности осуществляется введением стабилизирующего функционала в вычислительные схемы методов. Предлагаемая структурная модель информационно-измерительной системы с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{Y(p)}{U(p)} \tag{1}$$

представлена на рис. 1.

В работе предложен метод валидации модели. Основная идея метода валидации заключались в переходе от передаточной функции к дифференциальному уравнению и последующему переходу к конечно-разностному уравнению:

$$a_2 \frac{y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i}{\Delta t^2} + a_1 \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t} + a_0 y_i = b_0 u_i,$$
<sup>(2)</sup>



Рис. 1: Структурная модель информационно-измерительной системы. U(t) - входной сигнал ИИС,  $a_0, a_1, a_2$  и  $b_0$  - технические параметры ИИС,Y(t) - выходной сигнал датчика,  $Y_{\delta}$  - выходной сигнал датчика с шумом,  $\Delta$  - шум,  $Y_{\alpha}$  - выходной сигнал модели датчика,  $\alpha$  – блок регуляризации со стабилизирующим функционалом,  $U_{\delta}(t)$  - восстановленный входной сигнал.

для численного решения которого относительно функции выходного сигнала  $Y_{\alpha}(t) = [Y_{\alpha}(t_1), Y_{\alpha}(t_2), ..., Y_{\alpha}(t_{N+1})] = [y_1, y_2, ..., y_{N+1}]$  разработан регуляризирующий метод со стабилизирующим функционалом.

Включение стабилизирующего функционала обеспечивает устойчивость вычислительной процедуры относительно погрешности исходных данных и осуществляет коррекцию динамической погрешности за счет выбора значений α. Значения параметра регуляризации α выбирают из условий квазиоптимальности.

Численная валидация модели продолжается до тех пор, пока значения выходного сигнала модели  $Y_{\alpha}(t)$ , получаемого при том же входном сигнале U(t), что и выходного сигнала базовой модели  $Y_S(t)$ , станет максимально близки к соответствующим значениям выходного сигнала базовой модели  $Y_S(t)$ . Условие максимальной близости гарантирует,что эффект от корректировки динамической погрешности с помощью предложенной модели со стабилизирующим функционалом окажется аналогичен эффекту корректировки с помощью базовой модели с обратными связями.

В методе восстановления сигнала уравнение (2) со стабилизирующим функционалом, найденным на этапе валидации, используют для формирования значений восстановленного сигнала  $U_{\delta}(t) = [U_{\delta}(t_1), U_{\delta}(t_2), ..., U_{\delta}(t_{N+1})] = [u_1, u_2, ..., u_{N+1}],$  Эффективность предложенной модели и точность метода восстановления входного сигнала исследовали путем проведения вычислительного эксперимента. В эксперименте для оценки точности метода использовали функцию погрешности

$$\Delta_U = \max_{t \in [0,\Theta]} |U_{\delta}(t) - U(t)|,$$

где  $U_{\delta}(t)$  –восстановленный входной сигнал, U(t) – тестовый входной сигнал.

Результаты эксперимента представлены на рис.2. Обозначение "*restored signal*" соответствует входному сигналу, восстановленному методом со стабилизирующим функционалом, "*input signal*" - тестовому входному сигналу.



Рис. 2: Результаты вычислительного эксперимента для переходного процесса, (a) Графики входных сигналов. (б) График функции погрешности  $\Delta_U(t)$ .

Результаты экспериментальных исследований на основе имитационного моделирования работы динамического звена второго порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$$

для значений параметров постоянной времени T = [0.1, 0.2] и коэффициента затухания  $\xi = [0.3, 0.5, 0.7]$  предоставлены на рис.3.

Результаты, полученные в исследовании, приводят к следующим выводам. Предложенные модель ИИС и методы устойчивы относительно погрешности исходных данных и позволяют при различных параметрах измерительной системы восстанавливать входной сигнал с достаточной точностью. Вид сигнала и задержка в поступлении информации о выходном сигнале не оказывают влияние на точность восстановления входного сигнала.



Рис. 3: Результаты эксперимента для T = 0.1,  $\xi = 0.5$ ,  $\delta = 5\%$  при уровне шума 5%, (a) Графики входных сигналов. (б) График функции погрешности  $\Delta_U(t)$ .

В третьей главе предложена модель информационно-измерительной системы без обратных связей, метод ее валидации и метод восстановления входного сигнала, в которых коррекция динамической погрешности осуществляется путем регулирования шага дискретизации. В предложенных методах шаг дискретизации является параметром регуляризации. Передаточная функция системы имеет вид:

$$W(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{Y(p)}{U(p)}$$
(3)

Структурная модель предлагаемой информационно-измерительной системы представлена на рис. 4.

Предлагаемый метод валидации базируется на переходе от передаточной функции к дифференциальному уравнению  $a_2y'' - 2y' + y + a_1y' + a_0y = b_0u$ , и последующем переходе к конечно-разностному уравнению:

$$c_2 y_{i+2} + c_1 y_{i+1} + c_0 y_i = u_i b_0, (4)$$

где au - шаг дискретизации, а коэффициенты  $c_2, c_1, c_0$  определены формулами:

$$c_2 = \frac{a_2}{\tau^2}, c_1 = \frac{a_1}{\tau} - \frac{2a_2}{\tau^2}, c_0 = a_0 - \frac{a_1}{\tau} + \frac{a_2}{\tau^2}.$$

В методе валидации из уравнения (4) требуется найти значения выходного сигнала  $Y_M(t) = [Y_M(t_1), Y_M(t_2), ..., Y_M(t_{N+1})] = [y_1, y_2, ..., y_{N+1}]$  по тестовому входному сигналу U(t), добиваясь максимальной близости получаемых значений выходного сигнала модели  $Y_M(t)$  к соответствующим значениям выходного сигнала базовой модели  $Y_S(t)$ .



Рис. 4: Структурная модель информационно-измерительной системы с эффектом саморегуляризации. U - входной сигнал, Y<sub>M</sub> - выходной сигнал модели, U<sub>δ</sub> - восстановленный входной сигнал, Y(t) - выходной сигнал датчика, Y<sub>δ</sub> - выходной сигнал датчика с шумом, Δ - шум, c<sub>i</sub> и g<sub>0</sub> - приведенные параметры ИИС.

В предлагаемом методе восстановления входного сигнала из уравнения (4) находят все значения  $U_{\delta}(t) = [U_{\delta}(t_1), U_{\delta}(t_2), ..., U_{\delta}(t_{N+1})] = [u_1, u_2, ..., u_{N+1}]$ , соответствующий восстановленному входному сигналу  $U_{\delta}(t)$  со значением параметра  $\tau$ , полученному на этапе валидации.

В предлагаемых методах валидации и восстановления входного сигнала коррекция динамической погрешности осуществляется регулированием шага дискретизации  $\tau$  в приведенных коэффициентах  $c_2$ ,  $c_1$ ,  $c_0$ . Значение параметра  $\tau$ , обеспечивающее корректировку, получают при валидации модели.

В работе сформулированы и обоснованы условия выбора параметра регуляризации, обеспечивающие корректировку динамической погрешности:

$$\sqrt{\frac{a_2}{a_0}} < \tau \le \sqrt{\frac{2a_2}{a_0}}.\tag{5}$$

В работе получена следующая теоретическая оценка точности предложенного метода восстановления входного сигнала:

$$\omega_{N+1} \le \left(\frac{a_0 \tau^2}{a_2} - 1\right)^{\Theta/\tau - 1} (3\delta + C\tau^2),\tag{6}$$

где  $\omega_{N+1}$  – погрешность, накопленная к моменту окончания измерений,  $\Theta$  – общая продолжительность измерений,  $\delta$  – уровень шума выходного сигнала,  $C\tau^2$  - погрешность исходных данных,  $C \in (1; 10)$ . Оценка (6) имеет место только для значений параметра  $\tau$ , удовлетворяющих условию (5).

Учитывая, что параметр регуляризации au является параметром вычислительной схемы получаем, что предлагаемые методы эффектом саморегуляризации.

Эффективность использования предложенной модели для коррекции динамической погрешности и высокая точность метода восстановления входного сигнала подтверждается результатами экспериментальных исследований. В вычислительных экспериментах точность метода восстановления оценивалась с помощью функции погрешности  $\Delta_U = \max_{t \in [0,\Theta]} |U_{\delta}(t) - U(t)|$ , где  $U_{\delta}(t)$  – восстановленный входной сигнал, U(t)– тестовый входной сигнал. Результаты некоторых вычислительных экспериментов представлены на рис. 5. Обозначение "restored signal" соответствует входному сигналу, восстановленному методом со стабилизирующим функционалом, "input signal – тестовому входному сигналу.



Рис. 5: Результаты вычислительного эксперимента для реактивного процесса, (́а) Графики входных сигналов. (б) График функции погрешности  $\Delta_U(t)$ .

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на основе имитационного моделирования измерительной системы с динамическим звеном второго порядка и передаточной функцией :

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$$

для следующих значений параметров системы: T = [0.1, 0.2] – постоянная времени,  $\xi = [0.3, 0.5, 0.7]$  – коэффициент затухания приведены на рис. 6.



Рис. 6: Результаты эксперимента для T = 0.1,  $\xi = 0.5$ ,  $\delta = 5\%$ , (a) Графики входных сигналов. (б) График функции погрешности  $\Delta_U(t)$ .

Полученные результаты экспериментов согласуются с теоретическими результатами, подтверждают устойчивость предложенной вычислительной схемы и свидетельствуют о том, что по истечению переходного периода метод с эффектом саморегуляризации обеспечивает требуемый уровень точности.

С целью получения экспериментальных оценок погрешности предложенных методов восстановления входного сигнала со стабилизирующим функционалом и метода восстановления входного сигнала с эффектом саморегуляризациии и выявлении преимуществ каждого из этих методов в экспериментах проводился сравнительный анализ этих методов. Сравнительный анализ проводился в экспериментальных исследованиях для различных тестовых функций входных сигналов при различных уровнях шума. Результаты сравнительного анализа приведены в табл. 1.

Обозначение "Метод S"соответствует результатам восстановления входного сигнала, полученным методом с эффектом саморегуляризации, "Метод  $\alpha$ "соответствует результатам восстановления входного сигнала, полученным методом со стабилизирующим функционалом.

Сравнительный анализ показал, что метод со стабилизирующим функционалом наиболее эффективен при обработки информации в измерительных системах с фикси-

таблица т. погрешность восстановления			
Входной сигнал	δ	Mетод $S$	Метод $\alpha$
U(t) = 1	5%	4,96%	8,02%
	10%	$9{,}93\%$	$13,\!5\%$
	15%	$14,\!9\%$	20,15%
	20%	19,98%	28,76%
$U(t) = \sin(\pi t)$	5%	4,96%	7,93%
	10%	9,89%	$13,\!87\%$
	15%	$14,\!94\%$	$19,\!86\%$
	20%	$19,\!9\%$	28,23%

Таблица 1: Погрешность восстановления

рованным интервалом измерений, но использование этого метода в системах высших порядков затруднено из-за высокой сложности процедуры подбора значений параметра  $\alpha$  для таких систем. Метод, обладающий с эффектом саморегуляризации позволяет восстанавливать входной сигнал с высокой точностью, его вычислительная процедура является более простой по сравнению с методом со стабилизирующим функционалом, но его применение возможно только в системах, допускающих регулирование интервала измерений.

В четвертой главе рассмотрена задача восстановления входного сигнала для измерительной системы произвольного порядка. В работе предложен подход к построению модели информационно-измерительной системы и метода восстановления входного сигнала, обладающего эффектом саморегуляризации. Этот подход является обобщением результатов, представленных в третьей главе и базируется на переходе к дискретной модели информационно-измерительной системы, в которой коррекция динамической погрешности осуществляется за счет эффекта саморегуляризации.

Передаточная рассматриваемой ИИС системы имеет вид:

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{Y(p)}{U(p)}$$
(7)

Предлагаемая структурная модель информационно-измерительных систем произвольного порядка представлена на рис. 7.

Для построения методов валидации модели и метода восстановления входного сигнала в работе осуществлен переход от передаточной функции к дифференциальному уравнению:

$$a_n Y^{(n)} + a_{n-1} Y^{(n-1)} + \dots + a_1 Y' + a_0 Y = b_m U^{(m)} + b_{m-1} U^{(m-1)} + \dots + b_1 U' + b_0 U$$
(8)



Рис. 7: Структурная модель информационно-измерительной системы. U - входной сигнал ИС,  $Y_M$  - выходной сигал дискретной модели датчика,  $c_i$  и  $g_j$  - приведенные коэффициенты технических параметров ИС, где  $i \in [0; n]$  и  $j \in [0; m]$ ,  $U_{\delta}$  - восстановленный входной сигнал (выход ИС).

Предлагаемый метод валидации модели включает переход от дифференциального уравнения *n*-го порядка (8) к системе дифференциальных уравнений не выше второго порядка. Для решения полученного уравнения относительно функции выходного сигнала  $Y_M(t)$  по известному входному сигналу датчика U(t) разработан численный метод регуляризации. Ключевые этапы метода валидации состоят в следующем.

Обозначим  $\tilde{U} = b_m U^{(m)} + b_{(m-1)} U^{(m-1)} + ... + b_1 U' + b_0 U$ . Тогда уравнение (8), используемое в методе валидации примет следующий вид:

$$a_n Y^{(n)} + a_{n-1} Y^{(n-1)} + \dots + a_1 Y' + a_0 Y = \tilde{U}.$$
(9)

В методе валидации уравнение (9) преобразуется в систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} Y = s_1, \\ Y' = s'_1 = s_2, \\ Y'' = s'_2 = s_3, \\ \dots \\ a_n s''_{n-2} + a_{n-1} s'_{n-2} + a_{n-2} s_{n-2} + \dots + a_2 s'' + a_1 s' + a_0 s = \tilde{U}, \end{cases}$$

Преобразовав последнее уравнение системы, получаем, что основой для валидации модели с эффектом саморегуляризации служит система:

$$\begin{cases}
Y = s_1, \\
Y' = s'_1 = s_2, \\
Y'' = s'_2 = s_3, \\
\dots \\
a_n s''_{n-2} + a_{n-1} s'_{n-2} + a_{n-2} s_{n-2} = \tilde{U} - a_{n-3} s_{n-3} - \dots - a_2 s_3 - a_1 s_2 - a_0 s_1,
\end{cases}$$
(10)

Обозначив

$$z_i'' = s_k''(t_i), z_i' = s_k'(t_i), z_i = s_k(t_i),$$
  
$$F_i = \tilde{U}(t_i) - a_{n-3}s_{n-3}(t_i) - \dots - a_2s_3(t_i) - a_1s_2(t_i) - a_0s_1(t_i),$$

получают, что последние уравнение системы (10) в момент времени t = i примет вид:

$$a_n z_i'' + a_{n-1} z_i' + a_{n-2} z_i = F_i.$$
(11)

Для решения последние уравнение системы (10) в момент времени t = i используют вычислительную схему, предложенную в третьей главе, а остальные значения определяют с помощью конечно-разностных аналогов первой производной.

Численная валидация модели продолжается до тех пор, пока значения выходного сигнала модели  $Y_M(t)$ , получаемого при том же входном сигнале U(t), что и выходного сигнала базовой модели  $Y_S(t)$ , станет максимально близки к соответствующим значениям выходного сигнала базовой модели  $Y_S(t)$ . Условие максимальной близости гарантирует, что эффект от корректировки динамической погрешности с помощью предложенной модели со стабилизирующим функционалом окажется аналогичен эффекту корректировки с помощью базовой модели с обратными связями. Такой же подход применяется для метода восстановления входного сигнала  $U_{\delta}(t)$  с эффектом саморегуляризации.

Метод восстановления входного сигнала включает переход от дифференциального уравнения *m*-го порядка (8) к системе дифференциальных уравнений не выше второго порядка и последующую разработку численного метода решения полученного уравнения относительно функции выходного сигнала  $U_{\delta}(t)$  по известному выходно-му сигналу датчика Y(t). Ключевые этапы метода восстановления входного сигнала состоят в следующем.

Обозначим  $\tilde{U} = b_m U^{(m)} + b_{(m-1)} U^{(m-1)} + ... + b_1 U' + b_0 U$ . В методе восстановления входного сигнала уравнение (8) примет следующий вид:

$$b_m U^{(m)} + b_{m-1} U^{(m-1)} + \dots + b_1 U' + b_0 U = \tilde{Y}.$$
(12)

Уравнение (12) преобразуется в систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases}
U = w_0, \\
U' = w'_{=}w_1, \\
U'' = w'_1 = w_2, \\
\dots \\
b_m w''_{m-2} + b_{m-1}w'_{m-2} + b_{m-2}w_{m-2} + \dots + b_2w_2 + b_1w_1 + b_0w_0 = \tilde{Y},
\end{cases}$$

Преобразовав последнее уравнение системы, получаем, что основой для метода восстановления с эффектом саморегуляризации служит система:

$$\begin{cases}
U = w_0, \\
U' = w' = w_1, \\
U'' = w'_1 = w_2, \\
\dots \\
b_m w''_{m-2} + b_{m-1} w'_{m-2} + b_{m-2} w_{m-2} = \tilde{Y} - b_{m-3} w_{m-3} - \dots - b_2 w_2 - b_1 w_1 - b_0 w_0,
\end{cases}$$
(13)

Обозначим

$$\gamma_i'' = w_k''(t_i), \gamma_i' = w_k'(t_i), \gamma_i = w_k(t_i),$$
  
$$R_i = \tilde{Y} - b_{m-3}w_{m-3} - \dots - b_2w_2 - b_1w_1 - b_0w_0,$$

тогда последние уравнение системы (13) в момент времени t = i примет вид:

$$b_m \gamma_i'' + b_{m-1} \gamma_i' + b_{m-2} \gamma_i = R_i.$$
(14)

Для решения данного уравнения используют вычислительную схему, предложенную в третьей главе, а остальные значения определяют с помощью конечно-разностных аналогов частных производных первого порядка.

В предлагаемом методе восстановления входного сигнала сначала находят все значения  $U_{\delta}(t) = [U_{\delta}(t_1), U_{\delta}(t_2), ..., U_{\delta}(t_{N+1})] = [w_0(t_0), w_0(t_1), ..., w_(t_{N+1})]$ , соответствующий восстановленному входному сигналу  $U_{\delta}(t)$  со значением параметра  $\tau$ , полученному на этапе валидации.

Эффективность использования предложенной модели и точность методов оценивались при проведении вычислительного эксперимента. Для оценки величины отклонений найденных значений  $U_{\delta}$  от U использовали функцию погрешности

$$\Delta_U = \max_{t \in [0,\Theta]} |U_{\delta}(t) - U(t)|,$$

где  $U_{\delta}(t)$  – восстановленный входной сигнал, U(t) – тестовый входной сигнал. Максимальное значение функции погрешности определяет экспериментальное значение оценки точности метода восстановления входного сигнала.

С целью верификации предложенного метода восстановления входного сигнала и подтверждения присутствия в методе эффекта саморегуляризации проводились экспериментальные исследования на основе имитационного моделирования. В эксперименте рассматривались модели информационно-измерительных систем с различными передаточными функциями.

Результаты экспериментов для системы с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{b_0}{(a_2p^2 + a_1p + a_0)(a_5p^2 + a_4p + a_3)},$$

при уровне шума выходного сигнала 5% приведены на рис. 8.

Предложенные модель, метод валидации и метод восстановления сигнала использовались для обработки результатов динамических измерений, предоставленных НИЛ



Рис. 8: Результаты эксперимента для информационно-измерительной системы четвертого порядка для выходного сигнала и нулевого для входного сигнала, (а) Графики входных сигналов. (б) График функции погрешности  $\Delta_U(t)$ .

"Технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем". Экспериментальные исследования проводились с целью апробации разработанного метода восстановления входного сигнала с эффектом саморегуляризации для проверки возможности внедрения созданных методов в практическую деятельность.

При проведении этого исследования в качестве базовой информационно-измерительной системы, используемой в методе валидации, был взят контрольный датчик давления. Уровень шума исходных данных, определяемый максимальным отклонением выходного сигнала модели от выходного сигнала эталонной информационно-измерительной системы не превосходил 2%.

В эксперименте осуществлялось восстановление входного сигнала для информационно-измерительных систем M150CG1339, M150CG1340, M150CG1341 с помощью предложенных методов. Кроме того, была получена экспериментальная оценка погрешности метода восстановления входного сигнала, определяемая максимальным отклонением восстановленного сигнала от тестовых значений.

На рис. 9 приведены результаты эксперимента по восстановлению входного сигнала для информационно-измерительной системы M150CG1339. Обозначение "restored signal" соответствует входному сигналу, восстановленному методом со стабилизирующим функционалом, "input signal" соответствует тестовому входному сигналу.



Рис. 9: Результаты эксперимента для для информационно-измерительной системы М150CG1339, (a) Графики входных сигналов. (б) График функции погрешности  $\Delta_U(t)$ .

Результаты проведенных исследований приводят к следующим выводам. Предельное значение погрешности восстановленного входного сигнала не зависит от порядка информационно-измерительной системы и сохраняется на уровне погрешности выходного сигнала датчика, получаемого предложенным методом. Таким образом, предложенные модель информационно-измерительной системы с эффектом саморегуляризации и метод восстановления входного сигнала, разработанные для систем произвольного порядка, позволяют восстанавливать входной сигнал с достаточным уровнем точности. Предложенный подход способствует повышению точности обработки результатов динамических измерений.

### Основные результаты и выводы

В диссертационной работе предложены модели информационно-измерительных систем и методы восстановления входного сигнала по зашумленному выходному, служащие основой для методов обработки результатов динамических измерений, позволяющие контролировать уровень динамической погрешности. При решении рассматриваемых задач обработки информации получены новые результаты, заключающиеся в следующем: 1. Разработаны модель информационно-измерительной системы без обратных связей и вычислительного алгоритм валидации модели без обратных связей для информационно-измерительной системы второго порядка относительно выходного сигнала.

2. Разработаны и верифицированы метода восстановления входного сигнала, обладающего эффектом саморегуляризации, и метода восстановления входного сигнала для информа-ционно-измерительной системы второго порядка относительно выходного сигнала со стабилизирующим функционалом.

3. Разработана модель без обратных связей для информационно-измерительной системы произвольного порядка относительно входного и выходного сигнала.

4. Разработан и верифицирован метод восстановления входного сигнала для информационно-измерительной системы произвольного порядка относительно входного и выходного сигнала, обладающего эффектом саморегуляризации.

5. Численное моделирование и экспериментальные исследования подтвердили эффективность разработанных динамических моделей и метода восстановления динамически искаженного сигнала.

Основные результаты, представленные в диссертации, являются новыми, имеют теоретическую и практическую значимость и служат основой для разработки и совершенствования методов обработки информации в системах автоматического управления технологическим процессом.

### Основные положения диссертационной работы изложены в публикациях

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ВАК:

1. Саморегуляризирующий метод динамических измерений /Япаров Д.Д., Шестаков А.Л.// Автоматика и телемеханика. 2024. № 4. С. 112-124.

2. Метод восстановления входного сигнала в динамических системах на основе дискретной модели с исключением корректирующих обратных связей /Япаров Д.Д., Шестаков А.Л.// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2022. Т. 22. № 4. С. 56-66.

 Оценка метода восстановления входного сигнала по зашумленным данным / Япаров Д.Д.// Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2022. № 4 (46). С. 32-38. 4. Численный метод обработки результатов динамических измерений /Япаров Д.Д., Шестаков А.Л.// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т.21. №4. С.115-125.

Статьи, опубликованные в изданиях, цитируемых в Scopus, Web of Science: 1. New approach to processing of dynamic measuring data based on self-regularization / Yaparov D.D., Shestakov A.L.// Measurement: Sensors 2025, 101735. DOI:10.1016/j.measen.2024.101735

2. Computational method for solving differential equations in dynamic systems. AIP Conference Proceedings. 2022./ Yaparov D.// 2522. 100015. DOI:10.1063/5.0101572.

 Numerical method processing data related with dynamic measurements /Yaparov D., Shestakov A.// Proceedings - 2020 Global Smart Industry Conference, glosic 2020. 2020.
 C. 187-191.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Программа для обработки и восстановления выходного сигнала колебательного звена в условиях шума / Япаров Д.Д.// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020613226, 12.03.2020. Заявка № 2019667196 от 24.12.2019.

2. Программа прогнозирования выходного сигнала измерительной системы высокого порядка по зашумленным исходным данным / Япаров Д.Д.// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021617998, 21.05.2021. Заявка № 2021617266 от 14.05.2021.

3. Программа прогнозирования разности выходного сигнала измерительной системы разных порядков по зашумленным исходным данным / Япаров Д.Д.// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021665904, 05.10.2021. Заявка № 2021665273 от 05.10.2021.

Статьи, тезисы докладов в российских и зарубежных изданиях:

1. Метод коррекции динамической погрешности для систем произвольного порядка /Япаров Д.Д.// В книге: Актуальные проблемы прикладной математики и механики. Тезисы докладов XIII Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых, посвященной памяти академика А.Ф. Сидорова. Екатеринбург, 2024. С. 59-60. 2. Сравнительный анализ моделей измерительных систем /Япаров Д.Д.// В сборнике: Цифровая Индустрия: Состояние и Перспективы Развития 2023 (ЦИСП'2023). Сборник научных статей. Челябинск, 2024. С. 556-561. 3. Численный метод решения дифференциальных уравнений в динамических системах /Япаров Д.Д.// В книге: Актуальные проблемы прикладной математики и механики. Тезисы докладов XI Всероссийской конференции с элементами школы молодых ученых, посвященной памяти академика А.Ф. Сидорова. Екатеринбург, 2022. С. 92.

Подписано в печать 05.03.2025. Формат 60х84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 1.5. Тираж 100 экз. Заказ 423/601. Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ, 454080, г.Челябинск, пр. Ленина, 76