ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 004.942, 519.876.5

СЫЧЁВ
ВЛАДИСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ РЕЗЕРВУАРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ХАОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ В МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Минск 2026

Научная работа выполнена в государственном научном учреждении «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Научный руководитель	КРОТ Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией моделирования самоорганизующихся систем ОИПИ НАН Беларуси
Официальные оппоненты	ВАШКЕВИЧ Максим Иосифович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронно-вычислительных средств УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
	ХМАРСКИЙ Петр Александрович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории СВЧ-электроники и радиотомографии ИПФ НАН Беларуси
Оппонирующая организация	Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится «21» мая 2026 г. в 14.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.04.01 при государственном научном учреждении «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, к. 206. Тел.: +375 17 378 21 46, e-mail: eduard.snezhko@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Якуба Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан «15» апреля 2026 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук — Э. В. Снежко

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы достигнуты значительные успехи в методах и алгоритмах искусственного интеллекта в целом, и машинного обучения в частности. Однако ряд факторов влияет на их непосредственное применение для решения прикладных задач. Первым фактором является высокое энергопотребление вычислительных устройств [26, с. 341].

Еще одним фактором называют размер элементов интегральных микросхем (ИМС). По мере приближения размеров элементов на кристалле ИМС к размеру атома кремния все больше проявляются негативные эффекты миниатюризации и усложняются технологии производства. Наиболее передовые технологические процессы освоены единичными производителями микроэлектроники, а сбои в работе заводов и в логистических цепочках несут негативные последствия глобального масштаба [26, с. 342].

Несмотря на высокие затраты энергии и технологическую сложность оборудования, алгоритмы машинного обучения на стационарных системах выполняются успешно. Но наблюдаемая тенденция к переносу вычислителей ближе к источникам данных налагает дополнительные ограничения на алгоритмы в связи с ограниченностью ресурсов [26, с. 342]. Сказанное особенно актуально для сферы мобильной робототехники [4], которая характеризуется необходимостью создания алгоритмов комплексирования данных [11, 16, 32], планирования пути [1, 15, 17, 18, 24], позиционирования [10, 12], управления актуаторами [31] или группового взаимодействия для совместного решения задач при ограниченности ресурсов [2].

В результате растет актуальность разработки новых подходов в области машинного обучения. Ключевыми требованиями к ним становятся энергоэффективность и совместимость с компонентной базой, доступной для производства на большинстве мировых фабрик по выпуску полупроводниковых приборов. Один из таких подходов, называемый *резервуарные вычисления* [9, с. 90; 7, p. 2150161-3], основан на использовании свойств динамических систем для нелинейного представления данных без адаптивной настройки внутренних параметров динамической системы, позволяет строить энергоэффективные устройства обработки данных. В этом контексте особый интерес представляет применение *малоразмерных хаотических систем*, то есть нелинейных динамических систем с минимально необходимой для возникновения хаоса размерностью фазового пространства, в качестве основы резервуарных алгоритмов в силу сочетания богатства динамических режимов с конструктивной простотой при аппаратной реализации.

Настоящая работа посвящена разработке алгоритмов резервуарных вычислений на примере решения задачи распознавания типа сигналов [26, с. 349] для использования в мобильных робототехнике.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует пункту 1 «Цифровые технологии и искусственный интеллект: математические теории и методы, высокопроизводительные вычислительные системы, цифровые модели и двойники» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026 - 2030 гг. Указа Президента Республики Беларусь № 135 от 1 апреля 2025 г. «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026-2030 гг».

Исследования по теме диссертации проводились в рамках следующих государственных программ научных исследований (ГПНИ), грантов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ), государственной научно-технической программы (ГНТП):

1. НИР по заданию 1.08 «Исследование принципов самоорганизации в сложных динамических системах при функционировании машиностроительных конструкций и робототехнических устройств», ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», подпрограмма «Информатика» (№ГР 20142836, 2014-2015 гг).

2. НИР по заданию 1.8.01 «Методы анализа и моделирования сложных динамических систем и сред в задачах исследования физических явлений и синтеза робототехнических устройств», ГПНИ «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма «Информатика и космические исследования» (№ГР 20162337, 2016–2018 гг).

3. НИР по заданию 1.3.1. «Модели и методы для систем поддержки принятия решений при планировании и управлении высокотехнологичными, роботизированными производствами и электротранспортом», ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика» (№ГР 20210917, 2021–2025 гг).

4. НИР по договору №89 от 5 декабря 2023 года «Разработать и изготовить систему дистанционного управления мобильной роботизированной платформой», выполненной в рамках ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Механизация агропроцессов и «точное» сельское хозяйство» НИР 1 «Создание прототипа мобильной роботизированной платформы для ухода за посадками овощных культур» задания 6.9 «Научное обоснование

применения элементов цифровых технологий и роботизированных систем при возделывании овощей и картофеля» (2023 г).

5. НИР № 42 405-116/18 «Разработать аппаратно-программное обеспечение для управления макетным образцом автономной роботизированной платформы» в рамках ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Механизация агропроцессов и «точное» сельское хозяйство», НИР 1 «Создание прототипа мобильной роботизированной платформы для ухода за посадками овощных культур» задания 6.9 «Научное обоснование применения элементов цифровых технологий и роботизированных систем при возделывании овощей и картофеля» (№ГР 20241477, 2024 г).

6. НИР БРФФИ-РФФИ Ф12Р-116 «Исследование и разработка теоретических основ сложных динамических систем в приложениях к самоорганизующимся распределенным системам» (№ГР 20122522, 2012-2014 гг).

7. НИР БРФФИ Ф20Р–324 «Вычислительно эффективные методы навигации группы автономных колесных роботов в динамической среде» (№ГР 20201322, 2020–2022 гг).

8. НИР ГКНТ–Китай Ф22КИТГ-002 «Медицинские роботы на основе человеко-машинного взаимодействия» (№ГР 20230013, 2022-2024 гг).

9. НИР БРФФИ Ф23МЭ-030 «Эволюционные методы генерации оптимальных структур высокопроизводительных аппаратных ускорителей для реализации искусственных нейронных сетей на базе перепрограммируемых логических интегральных схем» (№ГР 20231036, 2023–2025 гг).

10. НИР БРФФИ Ф25КИ-044 «Методы прогрессивного комплексирования данных для мультисенсорных систем и их применение» (№ГР 20250312, 2025–2027 гг).

11. Договор №115/11-ПРОМ от 29.08.2011 на выполнение задания 01.02 «Разработать и внедрить интегрированную информационную технологию поддержки процессов проектирования новых типов энергетических машин (турбоагрегатов малой мощности) с применением средств компьютерного аэродинамического моделирования и натурных испытаний», ГНТП «CALS-ERP-технологии» (№ГР 20121103, 2011-2013 гг).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования

Разработка математических моделей и алгоритмов классификации сигналов на основе использования свойств автономных нелинейных динамических систем с хаотическими режимами (хаотических автогенераторов), имеющих минимально необходимую для возникновения хаоса размерность фазового пространства, для систем управления мобильными робототехническими устройствами.

Задачи исследования

1. Выполнить анализ принципов обработки информации для использования в мобильных робототехнических устройствах. Определить тип и параметры малоразмерной хаотической системы для использования в качестве вычислительного средства в рамках резервуарного подхода. Разработать алгоритмы управления малоразмерной хаотической системой для решения задачи распознавания сигналов на основе резервуарного подхода;

2. Разработать алгоритм экспресс-анализа стационарных, периодических и хаотических режимов колебаний автогенератора Чжуа, используемого в качестве аналогового резервуара для распознавания сигналов, обеспечивающий автономность работы устройства распознавания сигналов;

3. Разработать методику анализа влияния нелинейных компонент в схеме автогенератора Чжуа на динамику автогенератора;

4. Разработать технические средства моделирования автогенератора Чжуа для реализации системы распознавания сигналов.

Объект исследования

Системы резервуарных вычислений и нелинейные электрические цепи робототехнических устройств.

Предмет исследования

Математические модели, аналоговые электронные устройства и программные средства резервуарных вычислений на основе автогенератора Чжуа при обработке сигналов в робототехнических устройствах.

Научная новизна

1. Новая математическая модель управления автогенератором Чжуа с помощью напряжения смещения на первом конденсаторе в схеме автогенератора, позволяющая ввести автогенератор в стационарный режим, режимы периодических и хаотических колебаний с образованием спирального хаотического аттрактора и характерного для автогенератора Чжуа хаотического аттрактора типа «двойной завиток», причем геометрические параметры хаотического аттрактора определяются величиной смещения на конденсаторе. Вариант управления, описываемый данной моделью, не вводит автогенератор в устойчивый режим колебаний на предельном цикле, благодаря чему изменения величины смещения (управляющего сигнала) сопровождаются изменением режима колебаний, а в хаотическом режиме – изменением формы хаотического аттрактора.

2. Новый алгоритм автоматизированного выявления таких режимов работы автогенератора Чжуа, как стационарное состояние, периодические колебания или хаотические колебания, опирающийся на выборочное среднее значение первой переменной пространства состояний системы уравнений, описывающих автогенератор Чжуа.

3. Выявлен эффект самосинхронизации автоколебаний с выходов ядер матричного разложения декомпозированной системы уравнений, описывающих автогенератор Чжуа, в хаотическом режиме. Выявлена зависимость динамики декомпозированной системы уравнений, описывающих автогенератор Чжуа, от стационарного значения первой переменной пространства состояний системы. Кроме того, определено, что указанное стационарное значение может использоваться в качестве управляющего параметра, различные величины которого позволяют стабилизировать систему в режиме периодических, квазипериодических или хаотических колебаний с образованием хаотического аттрактора типа «двойной завиток», форма которого зависит от величины стационарного значения первой переменной. Обнаружена зависимость величины корреляции между выходными сигналами нелинейных ядер, от режима колебаний в декомпозированной системе. Указанная величина корреляции, таким образом, может быть использована для выявления режима колебаний в системе. Определено, что модель Л.Д. Ландау начальной турбулентности после срыва стационарного режима описывает процесс возникновения хаотических режимов в декомпозированной системе Чжуа. С помощью оценочных формул коэффициентов Ландау могут быть найдены начальные стационарные значения переменной в пространстве состояний для заданного набора параметров.

4. Новая математическая модель для решения задачи классификации с использованием автогенератора Чжуа в рамках резервуарного подхода, в которой классифицируемые сигналы либо признаки подаются на вход системы классификации без ее предварительного возвращения к исходному состоянию. В результате достигнута точность классификации не хуже 97%.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель управления автогенератором Чжуа, отличающаяся подачей напряжения внешнего сигнала как дополнительного управляющего параметра, отсутствующего в классической схеме автогенератора Чжуа, в цепь первой емкости, что обеспечивает формирование хаотических колебаний с однозначным соответствием между значением дополнительного управляющего параметра и формой хаотического аттрактора и позволяет устранить неоднозначность отклика выходного сигнала автогенератора благодаря отсутствию устойчивых предельных циклов в рабочем диапазоне значений дополнительного управляющего параметра для использования автогенератора Чжуа в рамках резервуарного подхода.

2. Метод и алгоритм экспресс-анализа выходного сигнала автогенератора Чжуа отличающийся вычислением выборочного среднего значения первой переменной пространства состояний на интервале, многократно превышающем постоянную времени автогенератора, что позволяет обеспе-

чить выявление и оценивание параметров стационарного, периодического и хаотического режимов колебаний, и прямой реализуемостью на стандартных аналоговых элементах.

3. Метод и алгоритм интерпретации выходных сигналов автогенератора Чжуа, отличающийся использованием метода матричной декомпозиции, позволивший впервые оценить вклад нелинейных членов матричного ряда в процесс формирования режима работы декомпозированной системы дифференциальных уравнений, описывающих автогенератор Чжуа, и обосновать применение стационарного состояния первой переменной пространства внешнего сигнала как дополнительного управляющего параметра автогенератора Чжуа.

4. Математическая модель системы классификации сигналов на основе автогенератора Чжуа, отличающаяся наличием дополнительного управляющего параметра и средств экспресс-анализа режима колебаний, ее реализация в виде компьютерной модели на основе метода Рунге-Кутты 4-го порядка, отличающаяся тем, что позволяет задать фиксированный шаг времени интегрирования и произвольно изменять параметры и переменные на каждом шаге моделирования, и аналоговое моделирующее устройство системы классификации стандартных сигналов

Личный вклад соискателя ученой степени

Цели и задачи диссертационного исследования поставлены совместно с научным руководителем.

Методика исследования разработана соискателем совместно с научным руководителем. Выводы по диссертационному исследованию и рекомендации по практическому использованию полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем.

Соискателем самостоятельно выполнен аналитический обзор литературы в рамках исследования.

Основные результаты диссертационного исследования и выносимые на защиту положения 1, 2 и 4, разработаны соискателем самостоятельно; положение 3 разработано совместно с научным руководителем.

Результаты диссертационного исследования опубликованы соискателем лично и в соавторстве. Личный вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

– First International Conference "Interactive Collaborative Robotics" (ICR 2016), Budapest, Hungary, August 24-26, 2016 год [19];

– международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, Российская Федерация (2017) [30];

– International conference on pattern recognition and information processing (PRIP), Minsk, Belarus (2019) [20].

– International workshop on artificial life and evolutionary computation (WIVACE), Rende, Italy (2019), Winterthur, Switzerland (2020) [22, 23];

За разработку компонентов и комплекса алгоритмов интеллектуальных робототехнических аппаратов, направленных на создание роботов социального, бытового и исследовательского назначения и включающих программно-аппаратное обеспечение для решения задач диспетчерского дистанционного управления мобильными роботами, получения и обработки сенсорных данных, взаимодействия групповых роботов назначена стипендия Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым на 2015 год.

Результаты диссертационного исследования внедрены в научный процесс РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» в качестве подсистемы обработки команд дистанционного управления системы управления мобильной робототехнической платформой, и в производственный процесс предприятия ООО «Промпривод» в качестве программного обеспечения анализа параметров функционирования микротурбин, а также в учебный процесс кафедры электронных вычислительных машин Факультета компьютерных систем и сетей БГУИР для использования в лабораторных и лекционных занятиях, и в учебный процесс кафедры «Робототехнические системы» Факультета информационных технологий и робототехники Белорусского национального технического университета, где используются в составе лекций по дисциплине «Программное обеспечение промышленных роботов». За вклад в исследования и разработки в области динамических систем, успешное выполнение проектов БРФФИ, внедрение результатов научных исследований в реальный сектор экономики соискатель награжден Почетной Грамотой Белорусского Республиканского Фонда Фундаментальных Исследований.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в изданиях, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (11 статей объемом порядка 6,1 а.л); в других научных изданиях (3 статьи объемом порядка 2,1 а.л.); в сборниках материалов докладов и тезисов научных конференций (17 статей и тезисов объемом порядка 3,4 а.л.). Получен один патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

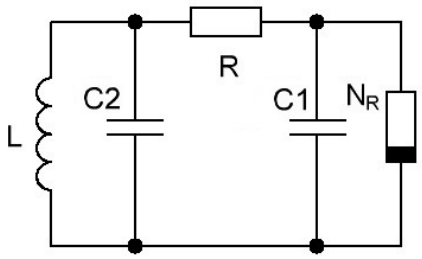
Диссертация включает в себя перечень терминов и определений, перечень сокращений и обозначений, введение, общую характеристику работы, четыре главы, заключение, библиографический список и приложения. Объем диссертации с приложениями составляет 155 страниц, включая 67 рисунков и 2 таблицы; 7 приложений на 21 странице; список использованных источников, включающий 157 наименований на 13 страницах и список публикаций соискателя по теме диссертации – 32 наименования на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

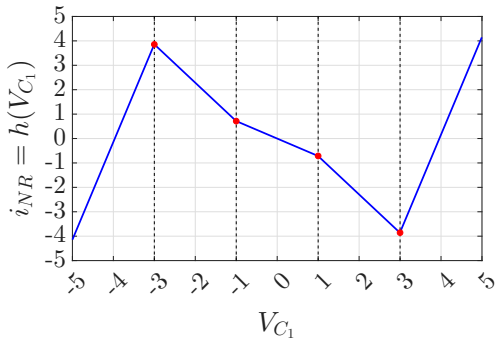
В первой главе в разделах 1.1, 1.2 и 1.3 показано, что разработки в области аналоговых вычислительных машин (АВМ) в настоящее время сосредоточились на решении задач, в которых АВМ обеспечивают преимущества перед цифровыми вычислительными машинами (ЦВМ), а именно задач моделирования, управления и машинного обучения, включая искусственные нейронные сети (ИНС). В результате одним из перспективных подходов к созданию энергоэффективных методов обработки сигналов и методов машинного обучения считается применение специализированных АВМ и гибридных АВМ/ЦВМ, построенных на новых принципах [9, 23, 26].

Как отмечено в разделах 1.4, 1.5, 1.6 и 1.7, существуют примеры успешного построения вычислительных устройств на основе нелинейных динамических систем (НДС). Пионерские работы на русском языке по вопросам применения НДС в задачах обработки сигналов и информации опубликованы Ю.В. Андреевым, Ю.Л. Бельским, А.С. Дмитриевым, Д.А. Куминовым. Кроме того, значительный вклад принадлежит В.Я. Кислову, С.П. Кузнецову, В.С. Анищенко, Ю.И. Неймарку, П.С. Ланде, Г.Г. Малинецкому и другим.

Основой устройств обработки сигналов может служить хаотический автогенератор, такой как схема Чжуа (в более поздних вариантах перевода – Чуа) [4, 9]. Упрощенная схема Чжуа представлена на рисунке 1а. Вариант вольт-амперной характеристики нелинейного двухполюсника N_R представлен на рисунке 1б. Подобное направление получило название *резервуарные вычисления* (англ. – *reservoir computing*). Под этим термином подразумевается практика использования свойств динамических систем для нелинейного представления данных без настройки внутренних параметров системы в процессе обучения [9]. В результате создаются алгоритмы и устройства, которые решают узкий набор задач с большей эффективностью, чем универсальные ЦВМ, а также отличаются от ЦВМ меньшей сложностью конструкции.



а) упрощенная электрическая принципиальная схема Чжуа



б) вольт-амперная характеристика двухполюсника N_R

Рисунок 1 — Хаотический автогенератор Чжуа

Безразмерная система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с нелинейной функцией в виде кубического полинома, которая описывает вариант схемы Чжуа, имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= \alpha(u_2 - u_1^3 - Cu_1); \\ \dot{u}_2 &= u_1 - u_2 + u_3; \\ \dot{u}_3 &= -\beta u_2, \end{aligned} \tag{1}$$

где u_1, u_2, u_3 – переменные в пространстве состояний, α, β, C – параметры [5]. Три уравнения в системе (1) соответствуют трем энергозапасающим элементам в схеме Чжуа, что является минимально необходимым числом энергозапасающих элементов в автономном генераторе, необходимым для возникновения хаотических колебаний. Далее подобные системы будут называться *малоразмерными*. Схема Чжуа рассматривается как перспективная основа для специализированных вычислительных устройств [7, 9] в рамках резервуарных вычислений [9].

Однако известные способы управления схемой Чжуа и способы определения ее состояния разрабатывались в отрыве от задач обработки информации, сигналов и машинного обучения. Для более полной реализации возможностей схемы в качестве вычислительного средства необходимы соответствующие исследования и разработка способов управления ею и интерпретации состояния схемы [9].

Во второй главе разрабатывается подход к управлению схемой Чжуа и определению ее состояния. Исследуется вариант системы (1), содержащий два дополнительных управляющих параметра:

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= \alpha(u_2 - u_1^3 - Cu_1) + \delta_1; \\ \dot{u}_2 &= u_1 - u_2 + u_3 + \delta_2; \\ \dot{u}_3 &= -\beta u_2, \end{aligned} \tag{2}$$

где δ_1, δ_2 – дополнительно введенные сигналы (параметры) управления [9], которые отсутствуют в оригинальной схеме Чжуа и представляют собой напряжения смещения на первой и второй емкостях схемы (рисунок 1а).

Экспериментально определено, что изменение величины параметра δ_1 от $\delta_1 = -2$ до $\delta_1 = 2$ приводит к переходу системы от стационарного состояния вблизи неподвижной точки $P-$ к хаотическим колебаниям с образованием аттрактора типа «двойной завиток», форма которого зависит от величины параметра δ_1, к стационарному состоянию вблизи неподвижной точки $P+$, как видно из бифуркационной диаграммы (рисунок 2а) [8]. При этом система (2) не демонстрирует образования устойчивых предельных циклов, сопряженных с работой на внешних сегментах нелинейной вольт-амперной характеристики, аппроксимируемой кубическим полиномом.

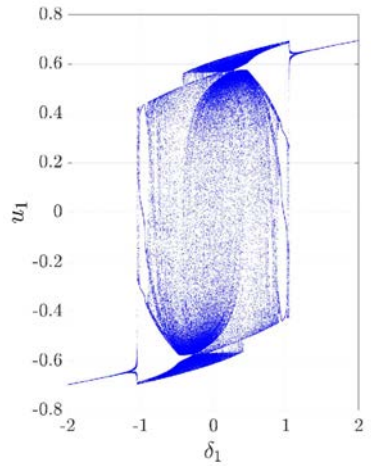
В свою очередь, изменение управляющего параметра δ_2 от $\delta_2 = -2$ до $\delta_2 = 2$ приводит к переходу системы от колебаний на предельном цикле к хаотическим колебаниям с образованием аттрактора типа «двойной завиток», и обратно к колебаниям на предельном цикле, как видно из бифуркационной диаграммы на рисунке 2б [9].

Сочетание указанных параметров позволяет перевести автогенератор из хаотического режима в режим колебаний на предельном цикле и далее обратно в хаотический режим через перевод в стационарное состояние, как это показано на рисунке 3а. Для определения состояния автогенератора могут использоваться такие статистические параметры первой переменной u_1 пространства состояний системы (2), как среднее значение $\bar{u}_1$, выборочная дисперсия $s^{2(w)}_{u_1,n}$ и выборочное среднее $\bar{u}^{(w)}_{1,n}$, где w – размер окна, а n – номер шага моделирования, на котором выполнена оценка (рисунок 3б, соответствующий форме колебаний на рисунке 3а).

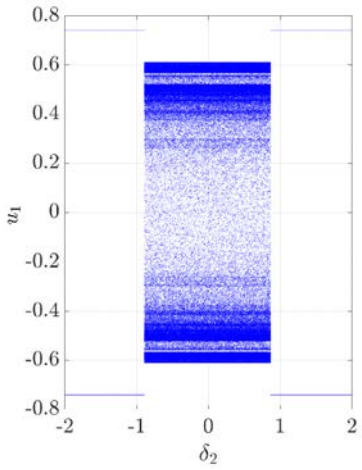
Разработана модель, включающая в себя автогенератор Чжуа, способ управления автогенератором с помощью дополнительных управляющих параметров δ_1 и δ_2 и способ определения его состояния с помощью выборочной дисперсии $s^{2(w)}_{u_1,n}$ и выборочного среднего значения первой переменной $\bar{u}^{(w)}_{1,n}$ пространства состояний [7, 9].

Модель была реализована в виде аналогового устройства, в котором использована схема для вычисления выборочной дисперсии аналогового сигнала методом экспоненциально-отображенного прошлого (англ. – *exponentially-mapped past, EMP*), называемая также EMP-дисперсия (EMP-среднее в случае среднего значения). Показано, что трудоемкий аттракторный/бифуркационный анализ схемы Чжуа можно заменить экспресс-анализом динамики выборочной дисперсии во времени для задач резервуарных вычислений.

В третьей главе рассматривается применение метода матричной декомпозиции для анализа процессов, протекающих в автогенераторе Чжуа, и путей возникновения хаотических режимов колебаний в нем [5, 6, 8].

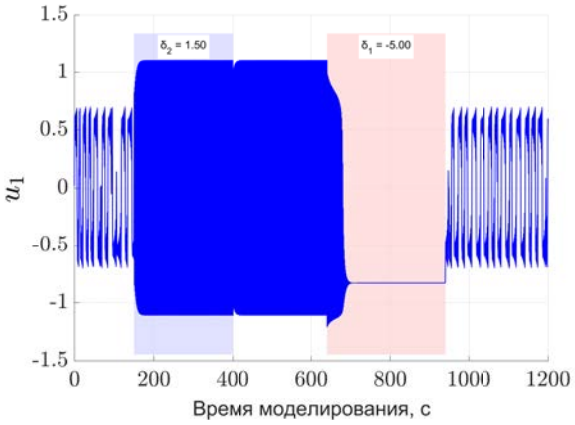


а) при управлении по параметру δ_1

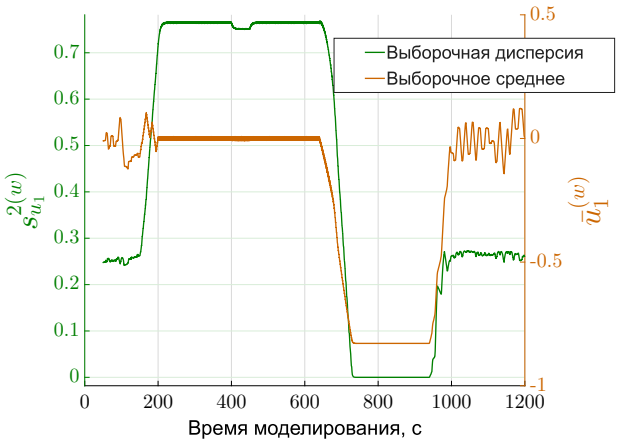


б) при управлении по параметру δ_2

Рисунок 2 — Бифуркационная диаграмма для системы Чжуа (2)



а) динамика переменной u_1 системы (2) под действием дополнительных управляющих параметров δ_1 и δ_2



б) динамика выборочной дисперсии $s^{2(w)}_{u_1,n}$ и выборочного среднего первой переменной $\bar{u}^{(w)}_{1,n}$ системы (2)

Рисунок 3 — Влияние скачкообразного изменения управляющих параметров на динамику системы (2)

В разделе 3.1 исходная система ОДУ (1) записана в векторно-матричных обозначениях:

$$\dot{\vec{\mathbf{u}}} = \vec{f}(\vec{\mathbf{u}},\alpha,\beta,A,C), \tag{3}$$

где

$$\dot{\vec{\mathbf{u}}} = \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{bmatrix}, \vec{f} = \begin{bmatrix} \alpha u_2 - A\alpha u_1^3 - C\alpha u_1 \\ u_1 - u_2 + u_3 \\ -\beta u_2 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Вектор $\vec{\mathbf{u}}(t)$, описывающий фазовую траекторию в пространстве состояний системы Чжуа, представлен следующим образом:

$$\vec{\mathbf{u}}(t) = \vec{\mathbf{u}}^* + \vec{\mathbf{v}}(t), \tag{5}$$

где $\vec{\mathbf{u}}^*$ – вектор невозмущенного (стандартного) состояния, $\vec{\mathbf{v}}(t)$– вектор возмущений, причем $|\vec{\mathbf{v}}(t)| << |\vec{\mathbf{u}}^*|$. Исходя из (3), (4) и (5), построена система Чжуа в вариациях вдоль фиксированного решения:

$$\dot{\vec{\mathbf{v}}} = \Delta\vec{f}\,(\vec{\mathbf{v}}(t),\ \vec{\mathbf{u}}^*, \alpha, \beta, A, C)\,, \tag{6}$$

где $\Delta\vec{f}$ – приращение векторной функции, $\vec{\mathbf{v}}(t) = \vec{\mathbf{u}}(t) - \vec{\mathbf{u}}^*$, α, β, A, C – набор параметров системы. Согласно методу матричной декомпозиции А. М. Крота, приращение гладкой векторной функции $\Delta\vec{f}$ в пространстве состояний сложной НДС описывается матричным рядом вида [8]:

$$\begin{aligned}&\Delta\vec{f}(\vec{\mathbf{v}},\vec{\mathbf{u}}^*) = L^{(1)}_{N\times N}\vec{\mathbf{v}} + \tfrac{1}{2!}L^{(2)}_{N\times N^2}(\vec{\mathbf{v}}\otimes\vec{\mathbf{v}}) + \tfrac{1}{3!}L^{(3)}_{N\times N^3}(\vec{\mathbf{v}}\otimes\vec{\mathbf{v}}\otimes\vec{\mathbf{v}}) + ...\\ &... + \tfrac{1}{k!}L^{(k)}_{N\times N^k}\vec{\mathbf{v}}^{\otimes k} + R_k(\vec{\mathbf{v}}),\end{aligned} \tag{7}$$

где

$$L^{(k)}_{N\times N^k} = \underbrace{(\frac{\partial}{\partial\vec{\mathbf{v}}^T}\otimes(\frac{\partial}{\partial\vec{\mathbf{v}}^T}\otimes\ldots\otimes(\frac{\partial}{\partial\vec{\mathbf{v}}^T}}_{k}\otimes\vec{f})\ldots))_{\vec{\mathbf{u}}^*} \tag{8}$$

– матричные ядра однородных нелинейных операторов системы, $\vec{\mathbf{v}}^{\otimes k} = (\underbrace{\vec{\mathbf{v}}\otimes\vec{\mathbf{v}}\otimes\ldots\otimes\vec{\mathbf{v}}}_{k})$ – k-я кронекеровская степень вектора возмущений $\vec{\mathbf{v}}$, $\vec{R}_k(\vec{\mathbf{v}}) = \frac{1}{(k+1)!}L^{k+1}_{N\times N^{k+1}}\Big|_{\vec{\mathbf{u}}^*} + \theta(\vec{\mathbf{v}}-\vec{\mathbf{u}}^*)\vec{\mathbf{v}}^{\otimes k+1}$, $0<\theta<1$, а $\vec{\mathbf{u}}^*$ рассматривается как вектор стандартного состояния в пространстве состояний $\Re^N$. В соответствии с (5) приращение векторной функции (4) равно [8]:

$$\begin{aligned}&\Delta\vec{f}(\vec{\mathbf{v}},\vec{\mathbf{u}}^*) = \vec{f}(\vec{\mathbf{u}}^*+\vec{\mathbf{v}}) - \vec{f}(\vec{\mathbf{u}}^*) =\\ &= \begin{bmatrix} \alpha v_2 - (3A\alpha u_1^{*2} + C\alpha)v_1 - 3A\alpha u_1^* v_1^2 - A\alpha v_1^3 \\ v_1 - v_2 + v_3 \\ -\beta v_2 \end{bmatrix},\end{aligned} \tag{9}$$

а согласно методу матричной декомпозиции (7) приращение векторной функции (4) может быть точно вычислено на основе лишь линейного, квадратичного и кубического членов матричного ряда [5, 6, 8].

$$\Delta\vec{f}(\vec{\mathbf{v}},\vec{\mathbf{u}}^*) = L^{(1)}_{3\times 3}\vec{\mathbf{v}} + \frac{1}{2!}L^{(2)}_{3\times 9}(\vec{\mathbf{v}}\otimes\vec{\mathbf{v}}) + \frac{1}{3!}L^{(3)}_{3\times 27}(\vec{\mathbf{v}}\otimes\vec{\mathbf{v}}\otimes\vec{\mathbf{v}}), \tag{10}$$

где $L^{(1)}_{3\times 3}$,$L^{(2)}_{3\times 9}$,$L^{(3)}_{3\times 27}$– матричные ядра вида [6]:

$$L^{(1)}_{3\times 3} = \begin{bmatrix} -(3A\alpha u_1^{*2} + C\alpha) & \alpha & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -\beta & 0 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

$$L_{3\times 9}^{(2)} = \begin{bmatrix} -6A\alpha u_1^* & 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0 \end{bmatrix}, \tag{12}$$

$$L_{3\times 27}^{(3)} = \begin{bmatrix} -6A\alpha & 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0 \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Подстановка (11)-(13) в (7) дает:

$$\Delta\vec{f}(\vec{\mathbf{v}},\vec{\mathbf{u}}^*) = \begin{bmatrix} \alpha v_2 - (3A\alpha u_1^{*2} + C\alpha)v_1 - 3A\alpha u_1^* v_1^2 - A\alpha v_1^3 \\ v_1 - v_2 + v_3 \\ -\beta v_2 \end{bmatrix}. \tag{14}$$

Метод матричной декомпозиции А. М. Крота впервые был использован для нелинейного анализа электронной схемы Чжуа [6]. Исходная система уравнений, описывающая схему Чжуа с кубическим полиномом в качестве нелинейной функции, была представлена в виде матричной декомпозиции на основе линейного, квадратичного и кубического ядер [5, 6].

Разработанная имитационная модель декомпозированной системы Чжуа впервые позволила выявить эффект самосинхронизации автоколебаний с выходов ядер матричного разложения оператора системы Чжуа в хаотическом режиме [5, 6], как видно из рисунка 4.

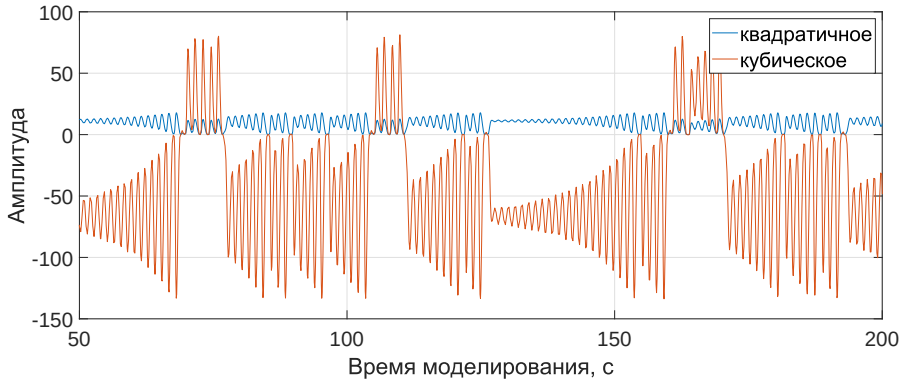


Рисунок 4 — Вид сигналов квадратичного и кубического ядер декомпозированной системы Чжуа (14) при $u_1^* = -0{,}75$ и $\alpha = 13{,}9$

На основе полученных членов матричного ряда, аппроксимирующих исходную систему уравнений, разработана имитационная модель в системе компьютерной математики MATLAB/Simulink. Данная модель использована в настоящем исследовании для проведения ряда вычислительных экспериментов [6]. В частности, разработанная модель позволила исследовать вклад нелинейных сигналов высших порядков с выходов ядер $L_{N\times N}^{(1)}$,$L_{N\times N^2}^{(2)}$, $L_{N\times N^3}^{(3)}$, в процесс формирования результирующего хаотического сигнала

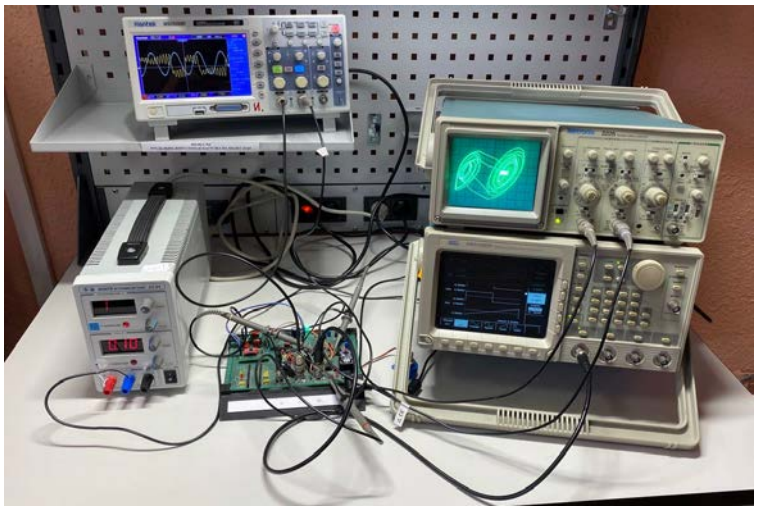
схемы Чжуа. Кроме того, модель дала возможность наблюдать влияние стационарного значения первой переменной пространства состояний на режим работы декомпозированной системы.

Показано, что динамика декомпозированной системы существенно зависит от стационарного значения первой переменной пространства состояний системы u_1^*, которое также может быть использовано в роли дополнительного управляющего параметра, различные величины которого позволяют стабилизировать систему в режиме периодических, квазипериодических или хаотических колебаний с образованием хаотического аттрактора типа «двойной завиток». Причем, форма аттрактора зависит от величины u_1^* [5, 6, 8].

В ходе вычислительных экспериментов выявлена корреляция между выходными сигналами нелинейных ядер, причем величина корреляции неодинакова для различных режимов работы системы, таких как периодический, квазипериодический или хаотический режим [6].

В разделе 3.2 по результатам экспериментов определены значения управляющих параметров, при которых возникает хаотический режим, проведены бифуркационный и спектральный анализы генерируемых сигналов [5, 6, 8]. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что модель Л. Д. Ландау начальной турбулентности после срыва стационарного режима достаточно хорошо описывает процесс возникновения хаотических режимов в декомпозированной системе Чжуа, что находится в полном согласии также с теорией Рюэля – Такенса [5, 8].

В четвертой главе описывается применение принципа резервуарных вычислений на основе автогенератора Чжуа для построения устройств распознавания сигналов (рисунок 5а) в мобильных роботах (рисунок 5б).



а) аналоговая система классификации сигналов на основе схемы Чжуа



б) робототехническая платформа

Рисунок 5 — Экспериментальная установка и робототехническая платформа

В разделах 4.1-4.4 разработан классификатор сигналов, который может рассматриваться как *специализированная АВМ*, блок-схема которой представлена на рисунке 6, на основании того факта, что непрерывный выходной сигнал $y(t)$ соотносится с непрерывным входным сигналом $U^{inp}(t)$, причем оба сигнала представлены напряжениями. На рисунке 6 через $U^x(t)$ обозначено управляющее напряжение для автогенератора Чжуа, а через $\mathbf{u}(t)$ – состояние автогенератора Чжуа. В разделе 4.4 результаты, представленные в разделах 4.1-4.4, применены для разработки классификатора данных на примере решения задачи классификации видов цветов (ирисов) с использованием набора данных «ирисы Фишера» [7].



Рисунок 6 — Блок-схема устройства классификации-распознавания сигналов

Исследования, изложенные в разделах 4.1-4.4, отличаются от аналогичных работ по двум признакам. Во-первых, для экспресс-анализа состояния автогенератора используется среднее значение первой переменной, которая эффективно вычисляется как аппаратно, так и программно [9]. Во-вторых, классифицируемые сигналы или признаки подаются на вход системы без ее сброса.

Решение задач распознавания сигналов и классификации видов цветов носит практический характер и демонстрирует возможности нелинейного преобразования сигналов с помощью автогенератора Чжуа.

В разделах 4.5 и 4.6 описаны программные модули для системы компьютерной математики (СКМ) MATLAB, которые реализуют функции, отсутствующие в известных СКМ, в том числе позволяющие исследовать малоразмерные НДС на примере системы Чжуа в режимах импульсного изменения управляющих параметров; формировать и подавать на НДС управляющие сигналы сложной формы для исследования возможностей обработки и распознавания сигналов; анализировать и визуализировать результаты моделирования.

В разделе 4.7 представлены результаты, использованные при выполнении НИР по созданию системы управления мобильной роботизированной платформой [27], в которой нашел применение автогенератор Чжуа для распознавания команд дистанционного управления роботом. Внешний вид экспериментального стенда для исследования аналоговой системы классификации сигналов на основе схемы Чжуа дан на рисунке 5а, а малогабаритной робототехнической платформы – на рисунке 5б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана математическая модель управления автогенератором Чжуа, отличающаяся подачей напряжения внешнего сигнала как дополнительного управляющего параметра, обозначенного δ_1 и отсутствующего в классической схеме автогенератора Чжуа, в цепь первой емкости. Таким образом обеспечивается формирование аттрактора, форма которого изменяется при изменении величины δ_1. Причем, за счет отсутствия устойчивых предельных циклов в рабочем диапазоне значений параметра δ_1 обеспечивается соответствие между значением параметра δ_1 и формой хаотического аттрактора, что позволяет устранить неоднозначность отклика выходного сигнала автогенератора на управляющий сигнал и использовать автогенератор Чжуа в рамках резервуарного подхода [7, 9].

2. Разработан метод экспресс-анализа выходного сигнала сложной НДС (автогенератора Чжуа), отличающийся вычислением выборочного среднего значения первой переменной пространства состояний на интервале, многократно превышающем постоянную времени НДС. На основе разработанного метода создан и реализован в виде программы для среды MATLAB алгоритм экспресс-анализа выходного сигнала НДС. Помимо выборочного среднего, при построении резервуарных вычислительных устройств для экспресс-анализа сигналов НДС может быть использована выборочная дисперсия первой переменной пространства состояний.

В результате удается обеспечить выявление и оценивание параметров стационарного, периодического и хаотического режимов колебаний. Кроме того, предлагаемый метод экспресс-анализа отличается прямой реализуемостью на стандартных аналоговых элементах, что позволяет использовать его в автономных устройствах.

3. Разработаны метод и алгоритм интерпретации выходных сигналов автогенератора Чжуа, отличающиеся использованием метода матричной декомпозиции. В результате анализа автогенератора Чжуа, проведенного с использованием метода матричной декомпозиции, удалось разделить исходный оператор системы дифференциальных уравнений на линейное, квадратичное и кубическое ядра, после чего впервые оценить вклад каждого из нелинейных членов матричного ряда в процесс формирования режима работы декомпозированной системы дифференциальных уравнений, описывающих автогенератор Чжуа [6].

Благодаря использованию метода матричной декомпозиции стало возможным существенно упростить анализ схемы (в сравнении с анализом посредством разложения в кратный ряд Тейлора) и получить новые данные о динамике автогенератора. В частности, показано, что динамика

первой переменной в пространстве состояний системы существенно зависит от ее стационарного значения. Это позволяет использовать стационарное значение в качестве нового управляющего параметра, изменение которого приводит к возникновению хаотического режима колебаний [5, 6, 8].

4. Разработана математическая модель системы классификации сигналов на основе автогенератора Чжуа, отличающаяся наличием дополнительного управляющего параметра и средств экспресс-анализа режима колебаний с целью использования автогенератора Чжуа в качестве компонента при реализации принципа резервуарных вычислений в системах распознавания сигналов.

Модель реализована в виде компьютерной программы для численного интегрирования методом Рунге-Кутты 4-го порядка, что позволило задавать фиксированный шаг времени интегрирования и произвольно изменять параметры и переменные на каждом шаге интегрирования.

Кроме того, модель реализована в виде аналогового моделирующего устройства системы распознавания стандартных сигналов, что позволяет исключить эффекты конечной разрядности регистров ЭВМ, способные оказать влияние на результаты исследования модели [3, 5–9].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты теоретического характера предполагается применить как для анализа электронных устройств с хаотической динамикой, так и для разработки новых устройств, использующих хаотические колебания для решения задач управления, обработки информации и связи, а также для построения нейроморфных вычислительных устройств с хаотическим автогенератором в качестве искусственного нейрона [6].

Результаты практического характера могут быть использованы для создания учебно-методического комплекса, посвященного основам анализа нелинейных электрических цепей, и для построения гибридных устройств обработки сигналов и информации. В частности, они могут быть применены для построения устройств связи в диапазоне видимого света для мобильной робототехники, которые могут применяться в условиях, когда радиосвязь затруднительна или невозможна.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1. Сычёв, В. А. Алгоритм поискового движения мобильного робота для реализации эффективной и защищённой ретрансляции пакетов информации / В. А. Сычёв, Б. М. Шевчук, В. Н. Пигуз // Искусственный интеллект. — 2014. — № 1 (63). — С. 160–171.

2. Сычёв, В. А. Система централизованного группового управления мобильными роботами / В. А. Сычёв // Электроника Инфо (рецензируемый раздел). — 2014. — № 6 (108). — С. 40–43.

3. Сычёв, В. А. Реализация дискретных нелинейных динамических систем с хаотическими режимами на арифметике с фиксированной запятой / В. А. Сычёв // Информатика. — 2014. — № 3. — С. 80–88.

4. Сычёв, В. А. Применение динамических систем с хаотическим поведением в робототехнике / В. А. Сычёв // Информатика. — 2015. — № 1. — С. 113–120.

5. Крот, А. М. Анализ хаотических режимов функционирования схемы Чжуа с гладкой нелинейностью на основе метода матричной декомпозиции / А. М. Крот, В. А. Сычёв // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. — 2018. — Т. 63, № 4. — С. 501–512.

6. Крот, А. М. Спектральный анализ хаотических колебаний в имитационной модели схемы Чжуа, разработанной на основе метода матричной декомпозиции / А. М. Крот, В. А. Сычёв // Информатика. — 2019. — Т. 16, № 1. — С. 7–23.

7. Sychou, U. A single-node classifier implementation on Chua oscillator within a physical reservoir computing framework / U. Sychou // Int. J. of Bifurcation and Chaos. — 2021. — Vol. 31, № 11. — P. 2150161.

8. Крот, А. М. Об особенностях нелинейного анализа динамических систем на основе метода матричной декомпозиции / А. М. Крот, В. А. Сычёв // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 190–207.

9. Сычёв, В. А. Разработка метода классификации сигналов с использованием осциллятора Чжуа в рамках резервуарного подхода / В. А. Сычёв, А. М. Крот, Г. А. Прокопович // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. — 2023. — № 1. — С. 88–101.

10. Fu, M. Semantic map-based visual localization with consistency guarantee / M. Fu, X. Lu, U. Sychou [et al.] // IEEE Sensors Journal. — 2023. — Vol. 24, No. 1. — P. 1065–1078.

11. Fu, M. Fusion or not: learning visual relocalization with matrix Fisher distribution / M. Fu, S. Li, U. Sychou [et al.] // Neurocomp. — 2025. — Vol. 618. — P. 129033.

Статьи в других научных изданиях

12. Герасюто, С. Л. Построение навигационной карты внутри помещений по величине магнитного поля земли MEMS сенсором мобильного робота / С. Л. Герасюто, Г. А. Прокопович, В. А. Сычёв // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 3. — С. 53–56.

13. Сычёв, В. А. Перспективы развития робототехники в Республике Беларусь / В. А. Сычёв, Г. А. Прокопович, С. Л. Герасюто // Электроника Инфо. — 2014. — № 6 (108). — С. 25–26.

14. Сычёв, В. А. Программно-аппаратное обеспечение учебно-методического комплекса по робототехнике / В. А. Сычёв // Электроника Инфо. — 2014. — № 6 (108). — С. 26–29.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

15. Сычёв, В. А. Алгоритм поискового движения стайного робота / В. А. Сычёв // Робототехника и искусственный интеллект : материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Железногорск, 15 нояб. 2013 г. / ред. В. А. Углев. – Красноярск, 2013. – С. 84–86.

16. Sychou, U. Method for sensor data processing based on chaotic oscillator / U. Sychou, R. Prakapovich // Digital technologies : proc. of the 9th Intern. conf. (DT 2013), Zilina, Slovakia, 29–31 May 2013 / ed.: E. Zaitseva, V. Levashenko. – Zilina, 2013. – P. 89–92.

17. Sychyou, U. Method of mobile-robot control to implement search motion / U. Sychyou // Pattern recognition and information processing : proc. of the 12th Intern. conf. (PRIP 2014), Minsk, 28–30 May 2014 / United Institute of Informatics Problems NASB. – Minsk, 2014. – P. 280–285.

18. Sychou, U. Control algorithm for mobile robots based on fixed-point chaotic sequences generator / U. Sychou // Digital technologies : proc. of the 10th Intern. conf (DT 2014), Zilina, Slovakia, 9–11 July 2014. – Zilina, 2014. – P. 333–337.

19. Herasiuta, S. Distributed information system for collaborative robots and IoT devices / S. Herasiuta, U. Sychou, R. Prakapovich // Interactive collaborative robotics : proc. of the First Intern. conf. (ICR 2016), Budapest, 24-26 August, 2016. – Cham, 2016. – P. 63–68.

20. Krot, A. M. The nonlinear analysis of chaotic signals based on matrix decomposition of a Chua's circuit with smooth nonlinearity / A. M. Krot, U. A. Sychou // Pattern recognition and information processing : proc. of the 14th Intern. conf. (PRIP 2019), Minsk, 21–23 May, 2019. / ed.: M. Lukashevich, A. Doudkin, V. Krasnoproshin. – Minsk, 2019. – P. 237–240.

21. Сычёв, В. А. Система управления мобильным роботом на основе резервуарных вычислений с хаотической системой в качестве резервуара / В. А. Сычёв // Проблемы управления : материалы XII Всероссийской мультиконференции (МКПУ-2019), 23–28 сентября 2019 г., Дивноморское, Геленджик : в 4 т. – Ростов-на-Дону, Таганрог, 2019. – Т.2. – С. 98–100.

22. Sychou, U. The simulation of noise impact on the dynamics of a discrete chaotic map / U. Sychou // Artificial life and evolutionary computation : proc. of the 14th Italian workshop (WIVACE 2019), Rende, 18–20 September, 2019 / ed.: F. Cicirelli [et al.]. – Cham : Springer, 2020. – Vol. 1200. – P. 62–65.

23. Sychou, U. A. Hybrid control system architecture for a mobile robot to provide an energy-efficient and fast data processing / U. Sychou, R Prakapovich, S Kapustjan [et al.] // Artificial life and evolutionary computation : proc. of the 15th Italian workshop (WIVACE 2021), Winterthur, 15–17 September, 2021 – Cham, Springer, 2021. – Vol. 1722. – P. 103–108.

24. Liu, J. CDT-Dijkstra: fast planning of globally optimal paths for all points in 2D continuous space / J. Liu, M. Fu, U. Sychou [et al.] // Intelligent robots and systems : proc. of the 2023 IEEE/RSJ Intern. conf. (IROS), Detroit, MI, 1–5 October, 2023. – IEEE, 2023. – P. 2224–2231.

25. Sychou, U. Evolutionary optimization of artificial neural networks for power-efficient hardware deployment / U. Sychou, Y. Lapatka // Pattern recognition and information processing : proc. of the 17th Intern. conf. (PRIP 2025), Minsk, Belarus, 16–18 Sept. 2025 / ed.: A. Tuzikov, A. Belotserkovsky. – Minsk, 2025. – P. 310–314.

26. Сычёв, В. А. Обзор принципов построения аналоговых ускорителей вычислений для искусственных нейронных сетей / В. А. Сычёв // Искусственный интеллект в Беларуси : сборник трудов IV Международного форума IT-Академграда : доклады, Минск, 13–14 октября 2025 г. – Мн., ОИПИ НАН Беларуси, 2025. – С. 341–351.

27. Azarenko, V. V. Robotic platform for autonomous application of pesticide / V. V. Azarenko [et al.] // Robotics in agriculture : proc. of the 5th Intern. conf. on agriculture digitalization and organic production (ADOP 2025), Barnaul, Altai Region, 3-6 June, 2025 / ed.: A. Ronzhin, V. Kundius, V. Surovtsev. – Cham, 2026. – Vol. 1. – P. 101–112.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

28. Сычёв, В. А. Разработка протокола и программно-аппаратного обеспечения системы централизованного управления группой роботов / В. А. Сычёв, С. Л. Герасюто // Автоматизация и роботизация процессов и производств : материалы республиканского научно-практического семинара, Минск, 13 февраля 2014 г. / ред.: Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – Мн., 2014. – С. 101–102.

29. Герасюто, С. Л. Робот для интерактивного обучения / С. Л. Герасюто, Г. А. Прокопович, В. А. Сычёв // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы III международной научно-практической конференции, Минск, 4-5 февраля 2015 г. / ред.: Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – Мн., 2015. – С. 72.

30. Прокопович, Г. А. Разработка концепции мехатронных бортовых вычислительных систем для реализации группового управления микророботами / Г. А. Прокопович, В. А. Сычёв // Экстремальная робототехника : сборник тезисов Международной науч.-тех. конференции, Санкт-Петербург, 2-3 ноября 2017 г. / ред.: Е. И. Юревич. – Спб, 2017. – С. 149–150.

31. Прокопович, Г. А. Сферический движитель мобильного робота на основе гексапода / Г. А. Прокопович, В. А. Сычёв // Экстремальная робототехника : сборник тезисов 30-й Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 13-15 июня 2019 г. – Спб, 2019. – С. 167–168.

Патенты

32. Патент BY 9074, МПК^8 G06F 7/10. Устройство для фильтрации информации : № u 20120728 : заявл. 31.07.2012 : опубл. 30.04.2013 /Г. А. Прокопович, В. А. Сычёв ; заявитель ОИПИ НАН Беларуси. — Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2013. — № 2. — С. 206–207.

РЭЗЮМЭ

Сычоў Уладзіслаў Анатольевіч

Мадэлі і алгарытмы рэзервуарных вылічэнняў на аснове малапамернай хаатычнай сістэмы для распазнавання сігналаў у мабільных робататэхнічных прыладах

Ключавыя словы: нелінейныя дынамічныя сістэмы, рэзервуарныя вылічэнні, дэтэрмінаваны хаос, схема Чжуа, распазнаванне сігналаў, робататэхніка, нелінейныя электрычныя ланцугі.

Мэта работы: распрацоўка матэматычных мадэлей і алгарытмаў класіфікацыі сігналаў на аснове выкарыстання уласцівасцей аўтаномных нелінейных дынамічных сістэм з хаатычнымі рэжымамі (хаатычных аўтагенератараў), якія маюць мінімальна неабходную для ўзнікнення хаосу размернасць фазавай прасторы, для сістэм кіравання мабільнымі робататэхнічнымі прыладамі.

Метады даследавання і выкарыстанае абсталяванне: матрычнай дэкампазіцыі, лікавага мадэлявання, схематэхнічнага мадэлявання і прататыпавання, аналізу і сінтэзу электронных схем, агульнанавуковыя метады. Лабараторнае кантрольна-вымяральнае абсталяванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: матэматычная мадэль, якая рэалізавана праграмна і ў выглядзе электроннай прылады, якая дэманструе магчымасць кіравання схемай Чжуа і вызначэння яе дынамічнага стану на аснове ацэнкі выбарачнай дысперсіі і выбарачнага сярэдняга значэння першай зменнай прасторы станаў з мэтай выкарыстання сістэмы Чжуа для рэалізацыі прынцыпу рэзервуарных вылічэнняў у сістэмах распазнавання сігналаў.

Новы падыход да аналізу дынамікі аўтагенератара Чжуа метадам матрычнай дэкампазіцыі, які дазволіў падзяліць зыходны аператар сістэмы дыферэнцыяльных ураўненняў на лінейнае, квадратычнае і кубічнае ядры, пасля чаго ацаніць уклад кожнага з ядраў у агульную дынаміку дэкампазынаванай сістэмы Чжуа. Дзякуючы гэтаму атрымалася істотна спрасціць аналіз схемы (у параўнанні з аналізам праз раскладанне ў кратны шэраг Тэйлара) і атрымаць новыя дадзеныя аб дынаміцы аўтагенератара.

Рэкамендацыі па выкарыстанню: вынікі даследвання могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы энергаэфектыўных убудаваных прылад і сістэм кіравання мабільнымі робатамі з абмежаванымі вылічальнымі рэсурсамі, у сістэмах распазнавання сігналаў у рэжыме рэальнага часу.

Вобласць прымянення: робататэхніка, сэнсарныя сістэмы, апрацоўка сігналаў, даследванні нелінейнай дынамікі, нейраморфныя вылічэнні.

РЕЗЮМЕ

Сычёв Владислав Анатольевич

Модели и алгоритмы резервуарных вычислений на основе малоразмерной хаотической системы для распознавания сигналов в мобильных робототехнических устройствах

Ключевые слова: нелинейные динамические системы, резервуарные вычисления, детерминированный хаос, схема Чжуа, распознавание сигналов, робототехника, нелинейные электрические цепи.

Цель работы: разработка математических моделей и алгоритмов классификации сигналов на основе использования свойств автономных нелинейных динамических систем с хаотическими режимами (хаотических автогенераторов), имеющих минимально необходимую для возникновения хаоса размерность фазового пространства, для систем управления мобильными робототехническими устройствами.

Методы исследования и использованное оборудование: матричной декомпозиции, численного моделирования, схемотехнического моделирования и прототипирования, анализа и синтеза электронных схем, общенаучные методы. Лабораторное контрольно-измерительное оборудование.

Полученные результаты и их новизна: математическая модель, реализованная программно и в виде электронного устройства, и демонстрирующая способ управления схемой Чжуа и определения ее динамического состояния на основе оценки выборочной дисперсии и выборочного среднего значения первой переменной пространства состояний с целью использования схемы Чжуа при реализации принципа резервуарных вычислений в системах распознавания сигналов.

Новый подход к анализу динамики автогенератора Чжуа методом матричной декомпозиции, который позволил разделить исходный оператор системы дифференциальных уравнений на линейное, квадратичное и кубическое ядра, после чего оценить вклад каждого из ядер в общую динамику декомпозированной системы Чжуа. Благодаря этому удалось существенно упростить анализ схемы (в сравнении с анализом через разложение в кратный ряд Тэйлора) и получить новые данные о динамике автогенератора.

Рекомендации по использованию: результаты могут быть использованы при разработке энергоэффективных встраиваемых устройств и систем управления роботами с ограниченными вычислительными ресурсами, в системах распознавания сигналов в реальном времени.

Область применения: робототехника, сенсорные системы, обработка сигналов, исследования нелинейной динамики, нейроморфные вычисления.

SUMMARY

Sychou Uladzislau Anatolievich

Models and algorithms of reservoir computing based on a low-dimensional chaotic system for signal recognition in mobile robotic devices

Keywords: nonlinear dynamical systems, reservoir computing, deterministic chaos, Chua's circuit, signal recognition, robotics, nonlinear electronic circuits.

Purpose of the work: development of mathematical models and algorithms for signal classification utilizing the properties of autonomous nonlinear dynamic systems with chaotic regimes (chaotic self-oscillators) that possess the minimum phase space dimension necessary for chaos onset, intended for control systems of mobile robotic devices.

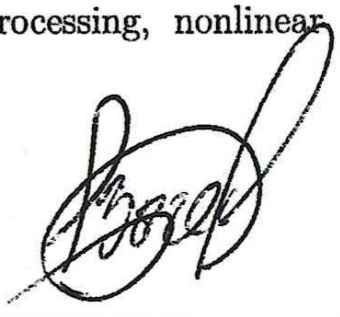
Research methods: matrix decomposition, numerical simulation, circuit simulation and prototyping, analysis and synthesis of electronic circuits, general scientific methods. Laboratory test and measurement equipment.

Obtained results and their novelty: a mathematical model has been developed, implemented both in software and as an electronic circuit, demonstrating a method for controlling Chua's circuit and determining its dynamic state based on estimating the moving variance and the moving mean value of the first state space variable. This is intended for using Chua's circuit as a building block to implement the reservoir computing principle for signal recognition systems.

A novel approach to analyzing the dynamics of Chua's circuit using the matrix decomposition method has been developed. The oscillator was analyzed with this method, which enabled the decomposition of the original system's differential operator into linear, quadratic, and cubic kernels. The contribution of each kernel to the overall dynamics of the Chua system was then assessed. This approach significantly simplified the circuit analysis compared to conventional multivariable Taylor series expansion and yielded new insights into the oscillator's dynamics.

Recommendations for use: the results of this work can be used in the development of energy-efficient control systems for mobile robots and embedded devices with limited computational resources, as well as in real-time signal recognition systems.

Application area: robotics, sensor systems, signal processing, nonlinear dynamics research, neuromorphic computing.



ЛИСТ ИЗМЕНЕНИЙ

к автореферату диссертации Сычёва Владислава Анатольевича «Модели и алгоритмы резервуарных вычислений на основе малоразмерной хаотической системы для распознавания сигналов в мобильных робототехнических устройствах» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

С.	Напечатано	Следует читать
16	Разработан метод экспресс-анализа выходного сигнала сложной НДС (автогенератора Чжуа), отличающийся вычислением выборочного среднего значения первой переменной пространства состояний на интервале, многократно превышающем постоянную времени НДС. … Кроме того, предлагаемый метод экспресс-анализа отличается прямой реализуемостью на стандартных аналоговых элементах, что позволяет использовать его в автономных устройствах.	Разработан метод экспресс-анализа выходного сигнала сложной НДС (автогенератора Чжуа), отличающийся вычислением выборочного среднего значения первой переменной пространства состояний на интервале, многократно превышающем постоянную времени НДС [5, 7, 21]. … Кроме того, предлагаемый метод экспресс-анализа отличается прямой реализуемостью на стандартных аналоговых элементах, что позволяет использовать его в автономных устройствах [9, 23].
19	10–A. Fu, M. Semantic map-based visual localization with consistency guarantee / M. Fu, X. Lu, U. Sychou [et al.] // …	10–A. Fu, M. Semantic map-based visual localization with consistency guarantee / M. Fu, X. Lu, Y. Jin, W.-A. Zhang, R. Prakapovich, U. Sychou // …
19	11–A. Fu, M. Fusion or not: learning visual relocalization with matrix Fisher distribution / M. Fu, S. Li, U. Sychou [et al.] // …	11–A. Fu, M. Fusion or not: learning visual relocalization with matrix Fisher distribution / M. Fu, S. Li, Y. Jin, W.-A. Zhang, U. Sychou, V. Skobtsov, V. Sobolevskii, B. Sokolov // …
20	23–A. Sychou, U. A. Hybrid control system architecture for a mobile robot to provide an energy-efficient and fast data processing / U. Sychou, R Prakapovich, S Kapustjan [et al.] // …	23–A. Sychou, U. A. Hybrid control system architecture for a mobile robot to provide an energy-efficient and fast data processing / U. Sychou, R Prakapovich, S Kapustjan, V. Shabanov // …
20	27–A. Azarenko, V. V. Robotic platform for autonomous application of pesticide / V. V. Azarenko [et al.] // …	27–A. Azarenko, V. Robotic platform for autonomous application of pesticide / V. Azarenko, V. Selivanova, D. Komlach, U. Sychou, T. Kim, V. Goldyban, M. Kurylovich // …

Соискатель В. А. Сычёв

Ученый секретарь совета по защите диссертации, к.т.н. Э. В. Снежко

Подписано в печать 13.04.2026. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,9.
Тираж 60 экз. Заказ 3.

Издатель и полиграфическое исполнение:
государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/274 от 04.04.2014.
Ул. Сурганова, 6, 220012, Минск.