

На правах рукописи



Островский Валерий Юрьевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЦЕПЕЙ С МЕМРИСТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Специальность: 05.13.12 Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена на кафедре систем автоматизации проектирования (САПР) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Бутусов Денис Николаевич, профессор кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Оппоненты:

доктор физико-математических наук, доцент Казанцев Виктор Борисович, заведующий кафедрой нейротехнологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород;

доктор технических наук, доцент Логинов Сергей Сергеевич, профессор кафедры электронных и квантовых средств передачи информации ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов.

Защита диссертации состоится 21 июня 2022 года в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.02 ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по адресу: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах докторских и кандидатских диссертаций».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

Автореферат разослан 20 апреля 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.02



Н.М. Сафьянников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования:

Появление новых схемных элементов влечет за собой радикальные изменения в широком спектре отраслей науки и техники. Одним из подобных элементов является мемристор – нелинейный двухполюсный элемент, сохраняющий информацию о пропущенном через него электрическом заряде. Мемристоры служат потенциальной основой для создания высокоэффективной энергонезависимой памяти, аппаратных нейроморфных архитектур, а также могут использоваться в составе перспективных систем обработки и анализа больших объемов разнородных данных. Для достижения научно-технологического лидерства России необходим переход к доступным и эффективным инструментам проектирования систем на основе перспективной элементной базы. В то же время, технологическая новизна и несовершенство доступных мемристивных элементов требует применения подходов исследовательского проектирования – методологии построения процесса разработки, при которой свойства объекта проектирования уточняются в процессе его создания, а используемые инструменты обладают адаптивностью и полиморфизмом. При этом специализированные средства разработки мемристивных систем, включая функциональные аналоги мемристоров для программно-аппаратного (НП) тестирования, или отсутствуют в российском научном сегменте, или находятся на ранней стадии создания, что существенно тормозит прогресс в данной области. Таким образом, можно сформулировать следующий ряд проблем предметной области:

1. Потребность в эффективных и релевантных средствах проектирования устройств на основе новых нелинейных элементов с эффектом памяти, включая методическое обеспечение процесса их идентификации.

2. Потребность в переходе к новому поколению математических и программных моделей сложных систем с нелинейной динамикой, к которым относятся спайковые нейронные сети на базе мемристивных элементов.

3. Отсутствие массовых и доступных прототипов мемристивных элементов, требующее создания их функциональных аналогов для использования при прототипировании мемристивных систем.

Решение обозначенных проблем невозможно без применения передовых знаний о нелинейных эффектах, возникающих в динамических системах, процессах резистивного переключения, известных из физики твердого тела, процессах формирования потенциалов действия и синаптической пластичности, известных из нейронаук. Конвергенция различных областей науки и современных технических решений в рамках методологии исследовательского проектирования цепей с мемристивными элементами определяют актуальность диссертационной работы в условиях необходимого перехода к новым инструментам разработки и новой аппаратной базе опережающими темпами.

Цель диссертационной работы – повышение качества исследовательского проектирования устройств на базе нелинейных элементов с эффектом памяти за счет автоматизации процессов идентификации математических моделей мемристивных элементов и анализа исполняемых моделей цепей с мемристивными элементами.

Объект исследования — системы автоматизированного исследовательского проектирования (САИПР) цепей с мемристивными элементами.

Предмет исследования — математическое, методическое и программное обеспечение средств САИПР цепей с мемристивными элементами.

Задачи диссертационной работы

Исходя из поставленной цели в процессе выполнения работы необходимо решить следующие **научно-технические задачи**:

1. Исследование существующих средств схемотехнических САПР с целью выявления их недостатков при проектировании устройств на базе мемристивных элементов, а также определения путей усовершенствования таких систем.
2. Создание методики автоматизированного построения математических моделей мемристивных элементов с точки зрения их структурной и параметрической идентификации.
3. Разработка алгоритмов и программного обеспечения САИПР, реализующих моделирование и анализ цепей с мемристивными элементами в форме дискретных динамических систем с мультистабильным поведением.
4. Разработка технического обеспечения САИПР в форме экспериментального стенда для проведения проверки разработанных методик и программных средств на типовых цепях с мемристивными элементами.

Основные методы исследования

Для решения поставленных задач в диссертационной работе используются методы теории подобия и моделирования, методы предварительной и статистической обработки экспериментальных данных, положения теории динамических систем, положения теории построения САПР, системный и сравнительный анализ, полунатурный эксперимент, имитационное моделирование, технология виртуальных инструментов.

Новые научные результаты

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Предложены новые способы построения средств САПР в рамках методологии исследовательского проектирования цепей с мемристивными элементами, учитывающие необходимость уточнения свойств объекта проектирования в процессе его разработки.
2. Разработана авторская методика идентификации мемристивных элементов, позволяющая на основе экспериментальных данных синтезировать компактные модели устройств с хаотическим переключением сопротивления.
3. Разработаны новые алгоритмы моделирования и анализа объектов проектирования, представленных дискретными динамическими системами с мультистабильным поведением.

Достоверность научных результатов

Подтверждается результатами математического, компьютерного и имитационного моделирования в инструментальных средах, а также инженерной практикой решения задач идентификации и моделирования объектов проектирования, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Научные положения, выносимые на защиту

1. **Методика идентификации мемристивных элементов**, включающая процедуры анализа и синтеза математических моделей, а также автоматизированного подбора параметров в уравнениях, описывающих динамику элементов с переключением сопротивления.
2. **Математическое обеспечение САИПР** в форме уточненной математической модели мемристивного элемента, учитывающей характеристики резистивных переключений в физических мемристивных структурах при слабых токах.
3. **Программное обеспечение САИПР**, включающее инструменты анализа динамических режимов дискретных моделей мультистабильных систем во временной области, пространстве состояний и пространстве параметров.

Теоретическая значимость работы

1. Получены новые знания об особенностях математического и компьютерного моделирования процессов переключения мемристивных устройств с самонаправленным каналом в особых условиях эксплуатации.

2. Открыто влияние дискретных операторов, используемых при переходе от непрерывных математических моделей объектов проектирования к компьютерным моделям, на свойство мультистабильности дискретных моделей.

Практическая значимость работы

Значение результатов диссертационной работы для практического применения заключается в следующем:

1. Разработанные методические и программные средства идентификации мемристивных элементов позволяют повысить качество получаемых проектных решений при исследовательском проектировании мемристивных цепей за счет увеличения степени адекватности используемых математических и компьютерных моделей.

2. Созданное программное обеспечение для моделирования и анализа мультистабильных динамических систем позволяет сократить время проектирования и повысить точность дискретных моделей проектируемых устройств с мемристивными элементами.

3. Разработанный экспериментальный стенд для параметрической идентификации нелинейных цепей позволяет исследовать проектируемые мемристивные системы во временной области, пространстве состояний и пространстве параметров, что может способствовать открытию их новых свойств и областей применения.

Практическая реализация и внедрение результатов работы

Разработанное программное обеспечение внедрено в научно-производственный процесс ООО «НПФ «Модем». Разработанное методическое и программное обеспечение внедрено в научно-производственный процесс АО «АСТ». Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при подготовке бакалавров по направлению «Информатика и вычислительная техника».

Полученные результаты внедрены и использовались в следующих НИР, выполненных в течение 2016–2021 гг.:

1. НИР «Теория и средства проектирования цифровых генераторов хаотических сигналов» (договор 17-07-00862\17 от 10.04.2017, 17-07-00862\18 от 16.03.2018).

2. НИР «Основы исследовательского проектирования мемристивных систем» (договор 19-07-00496\19 от 07.01.2019, 19-07-00496\20 от 21.05.2020).

3. Проект «Компьютерное моделирование электрических цепей с мемристорами» (Конкурс грантов 2016 года для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, диплом ПСП №16186).

Апробация результатов работы

Основные результаты научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), Санкт-Петербург, Россия, 2-4 февраля, 2015;

2. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), Санкт-Петербург, Россия, 2-3 февраля, 2016;

3. International Academic Forum AMO-SPITSE-NESEFF, Москва/Смоленск, Россия, 20-25 июня, 2016;

4. 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRus), Санкт-Петербург, Россия, 1-3 февраля, 2017;
5. XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Санкт-Петербург, Россия, 24-26 мая, 2017;
6. 21st Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Хельсинки, Финляндия, 6-10 ноября, 2017;
7. 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Батуми, Грузия, 5-8 декабря, 2017;
8. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Санкт-Петербург, Россия, 29 января - 1 февраля, 2018;
9. 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Болонья, Италия, 13-16 ноября, 2018;
10. 2nd International Conference on Mathematics and Statistics (ICoMS), Прага, Чехия, 8-10 июля, 2019;
11. International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Екатеринбург, Россия, 25-27 октября, 2019;
12. 25th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Хельсинки, Финляндия, 5-8 ноября, 2019;
13. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Санкт-Петербург, Россия, 27-30 января, 2020;
14. XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Санкт-Петербург, Россия, 27-29 мая, 2020;
15. 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR), Иннополис, Россия, 3-6 декабря, 2020;
16. IV IEEE International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Санкт-Петербург, Россия, 21-23 сентября, 2021;
17. 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Санкт-Петербург, Россия, 25-28 января, 2022.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 28 научных трудах, из них по теме диссертационной работы 28, среди которых 5 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях из перечня рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 23 публикации, индексируемых в международной базе данных SCOPUS. Имеется 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав с выводами и заключения. Диссертационная работа изложена на 177 страницах машинописного текста и содержит 82 рисунка, 4 таблицы, 4 приложения общим объемом 16 страниц. Список литературы состоит из 148 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования. Определены объект и предмет исследования, методы исследования, а также излагаются основные положения, выносимые на защиту. Приведено краткое содержание глав диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена описанию мемристивных элементов и обзору подходов к проектированию устройств на основе таких элементов.

В главе сформулировано понятие *мемристора* и *мемристивной системы*, рассмотрены основные характеристики энергонезависимой памяти и предпосылки перехода к нейроморфным системам в современной вычислительной технике. Проведен анализ существующих подходов к проектированию мемристивных устройств с применением SPICE-симуляторов электронных схем, указаны недостатки моделирующих сред и наиболее распространенной модели мемристора Струкова. В качестве альтернативного подхода предлагается методика *исследовательского проектирования*, при которой свойства объекта проектирования уточняются в процессе его создания, а средства проектирования и моделирования создаются и адаптируются непосредственно внутри цикла разработки. Предложенная методика базируется на концепции модель-ориентированного (модельного) проектирования – методе создания комплексных систем, использующем математические модели системных компонентов и их взаимодействие с окружающей средой.

Процесс исследовательского проектирования мемристивных цепей (рисунок 1) может быть описан следующим образом. Техническое задание на проектирование разделяется на ряд подзадач. Разрабатываются модели подсистем объекта проектирования. Осуществляется выбор технических средств, разработка алгоритмов и программного обеспечения, синтез соответствующей подсистемы и тестирование полученных решений. Модель разрабатываемой системы используется для верификации полученных решений на каждом этапе проектирования. Отладка аналоговой части системы выполняется путем прямого подключения к управляющему компьютеру через устройства сбора данных. После отладки прототипа аналоговой части для верификации дискретных моделей создается цифровой имитатор со встраиваемой системой управления на базе микроконтроллера или ПЛИС.

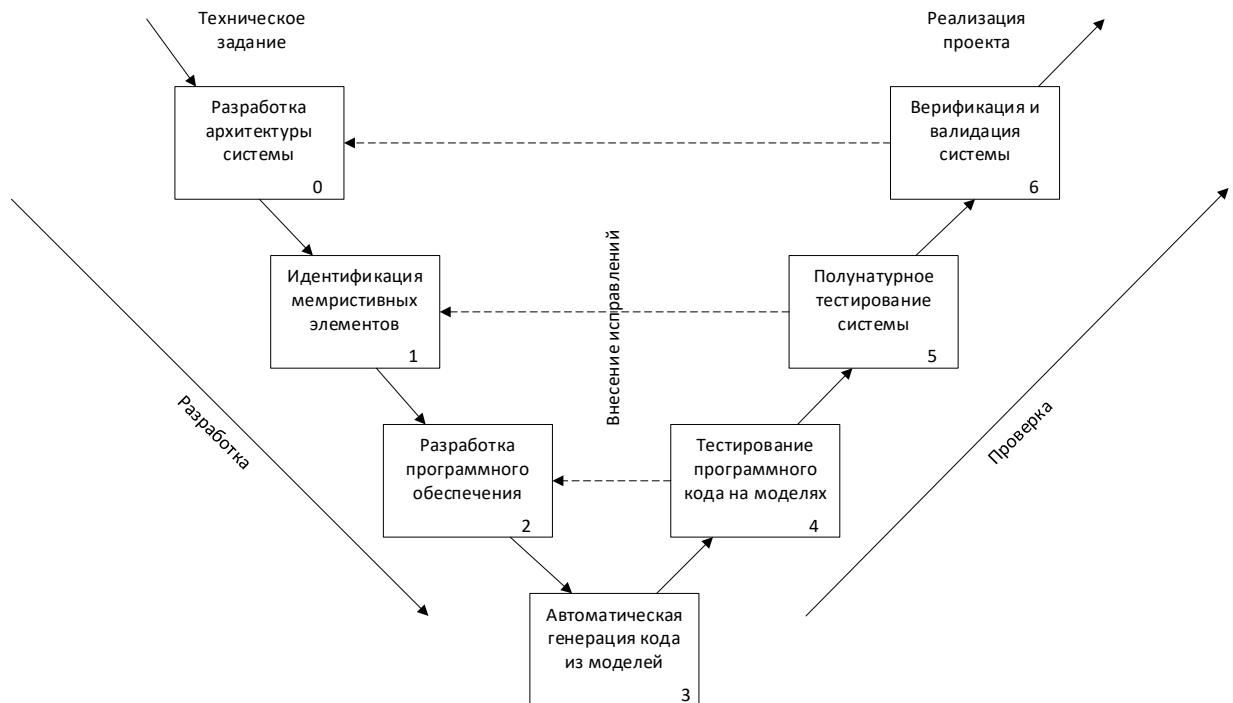


Рисунок 1 – Процесс исследовательского проектирования цепей с мемристивными элементами

В качестве среды разработки и моделирования в диссертационной работе выбрана специализированная САПР NI LabVIEW с модулями расширения. В качестве аппаратной базы выбрана лабораторная станция прототипирования NI ELVIS III.

В заключении главы сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** диссертационной работы рассматривается предлагаемое методическое и математическое обеспечение САИПР цепей с мемристивными элементами.

Предложена *методика идентификации мемристивных элементов*, включающая этапы структурной и параметрической идентификации. IDEF0 диаграмма процесса идентификации представлена на рисунке 2.

Выбранные критерии оценки адекватности моделей основаны на теоретических и экспериментальных знаниях из области физики тонких пленок. В качестве дополнительного критерия введено ограничение на количество арифметических операций дискретных моделей, связанное с особенностями выбранной целевой аппаратной платформы.

Применение методики проиллюстрировано на примере модификации модели мемристора с самонаправленным каналом. Целью модификации являлось достижение заданных временных, частотных и статистических характеристик мемристивных устройств при слабых токах (менее 10^{-5} А). Результатом применения методики стало создание *новой математической модели мемристора* за счет использования функциональной зависимости пороговых напряжений переключения от внутренних переменных состояния, динамической оценки частоты управляющего сигнала и хаотического генератора.

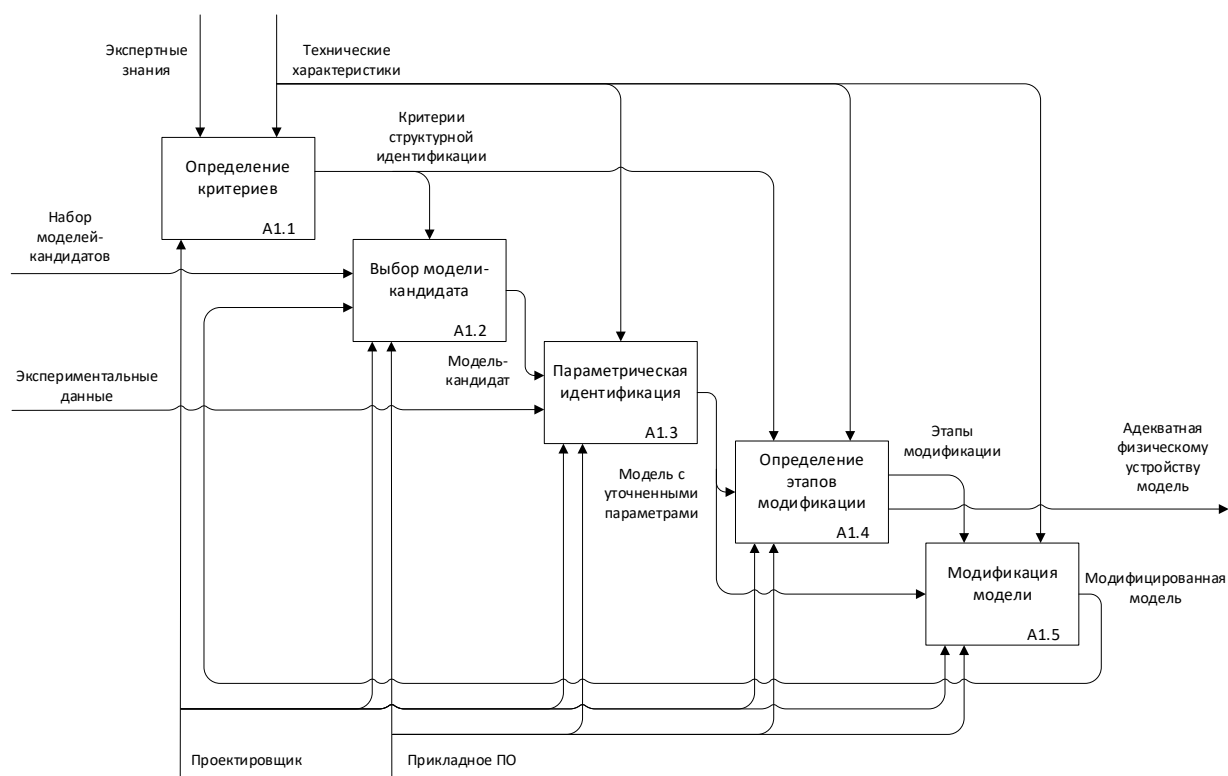


Рисунок 2 – Процесс идентификации мемристивных элементов

В процессе идентификации использовались экспериментальные данные, полученные при измерении ВАХ мемристоров фирмы Knowm W-типа в измерительной

схеме делителя напряжения с резистором $R_S = 46.25$ кОм при синусоидальном управляющем напряжении амплитудой 0.7 В на частотах 1-100 Гц.

Модифицированная модель включает следующие исходные уравнения обобщенного среднего метастабильного переключения мемристора:

$$I = \phi I_M(V, t) + (1 - \phi) I_S(V)$$

$$I_S = \alpha_f e^{\beta_f V} - \alpha_r e^{-\beta_r V}$$

$$I_M = \left(\frac{X}{R_{ON}} + \frac{1-X}{R_{OFF}} \right) V \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{1}{1 + e^{-\beta(V - V_{ON}(X, F, Y, Z))}} (1 - X) - \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\beta(V + V_{OFF}(X, F, Y, Z))}} \right) X \right)$$

где I – полный ток через устройство, V – напряжение на устройстве, I_M – мемристивная составляющая тока, I_S – составляющая тока через барьер Шоттки, долевого параметр $\phi \in [0, 1]$, $\alpha_{f,r}$ и $\beta_{f,r}$ – положительные параметры прямого и обратного тока через барьер Шоттки, $R_{ON,OFF}$ – граничные значения сопротивления мемристора, X – переменная состояния проводимости мемристора, τ – временной параметр переключения, $\beta = q/kT = V_T^{-1}$ – температурный параметр, q – элементарный заряд, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, $V_{ON,OFF}$ – пороговые напряжения переключения.

Для воспроизведения эффекта резкого отката порогового напряжения мемристора в процессе переключения в состояние высокого сопротивления при слабых токах, характеризующееся на ВАХ участком отрицательного дифференциального сопротивления (см. рисунок 3), введена следующая функциональная зависимость от внутренней переменной состояния X :

$$V_{ON}(X) = \frac{a_{ON} \cos\left(\left(\omega_{ON} \pi \sqrt{X}\right) / (b_{ON} - X)\right)}{1 + c_{ON} \sqrt{X}} + v \quad (2)$$

где a_{ON} , b_{ON} , c_{ON} и ω_{ON} – коэффициенты зависимости от X , а v – аддитивная составляющая порогового напряжения.

Вторая модификация модели мемристора заключается в использовании динамической оценки частоты управляющего сигнала за счет введения дополнительной переменной состояния F для адекватного представления смещения границ V_{ON} и V_{OFF} . Случай для гармонического управляющего сигнала описывается уравнением:

$$\frac{dF}{dt} = a_F \left(\sqrt{\left| \frac{d^2 V}{dt^2} \right| / V} - b_F F \right) \quad (3)$$

где a_F – временной коэффициент переменной состояния F , b_F – коэффициент обратной связи, V – напряжение на устройстве. Согласно экспериментальным данным, зависимость от F может быть представлена в аддитивной составляющей функций V_{ON} и V_{OFF} .

С целью представления вариативности процессов переключения в модель введены переменные состояния осциллятора Y и Z :

$$\begin{aligned} \frac{dY}{dt} &= a_Y Z \\ \frac{dZ}{dt} &= a_Z (c_Z S - b_Z Z + Y - Y^3) \end{aligned} \quad (4)$$

где S – внешний сигнал (может использоваться напряжение V), a_Y и a_Z – временные коэффициенты системы, b_Z – коэффициент обратной связи, c_Z – коэффициент сигнала.

Зависимость от Y или Z может быть также задана в виде аддитивной составляющей функций V_{ON} и V_{OFF} , при этом динамика системы уравнений (1-4) становится хаотической. Физическим обоснованием использования осциллятора Дуффинга может служить связь уравнений осциллятора (4) с динамикой частиц в конечном числе двойных потенциальных ям наноразмерных устройств. Преимуществом данного подхода является детерминированное поведение модели, которое в отличие от стохастического представления является более простым в анализе на этапе верификации дискретных моделей.

Процесс параметрической идентификации модифицированной модели мемристора представлен этапами: подбор параметров барьера Шоттки, фильтрация и усреднение экспериментальных ВАХ, вычисление проводимости и устранение сингулярности, вычисление внутренней переменной состояния X , вычисление производной dX/dt , подбор функций пороговых напряжений V_{ON} и V_{OFF} и параметров переменных состояния F , Y и Z , моделирование мемристора в условиях измерительной схемы и подбор параметров τ и β . Исполнение этапов, предполагающих только использование прикладного программного обеспечения, может быть доведено до автоматического существующими методами, в то время как участие проектировщика требуется на двух завершающих этапах процесса параметрической идентификации: для решения задачи адаптации хаотического генератора при подборе параметров переменных X и Z , для оценки технических характеристик дискретной модели при моделировании в условиях измерительной схемы.

Оценка точности отдельного цикла переключения получена на основе разности квадратов евклидова расстояния между ВАХ эксперимента и модели, в примере на рисунке 3 (а) приведенная относительно диапазонов ВАХ эксперимента погрешность на участке высокого сопротивления (HRS) не превышает 0.5 %, на участке низкого сопротивления (LRS) не превышает 1 %, в процессе переключения SET не превышает 3.1 %, в процессе переключения RESET не превышает 1 %. На рисунке 3 (б) показано соответствие модели и экспериментальных данных на множестве циклов переключения.

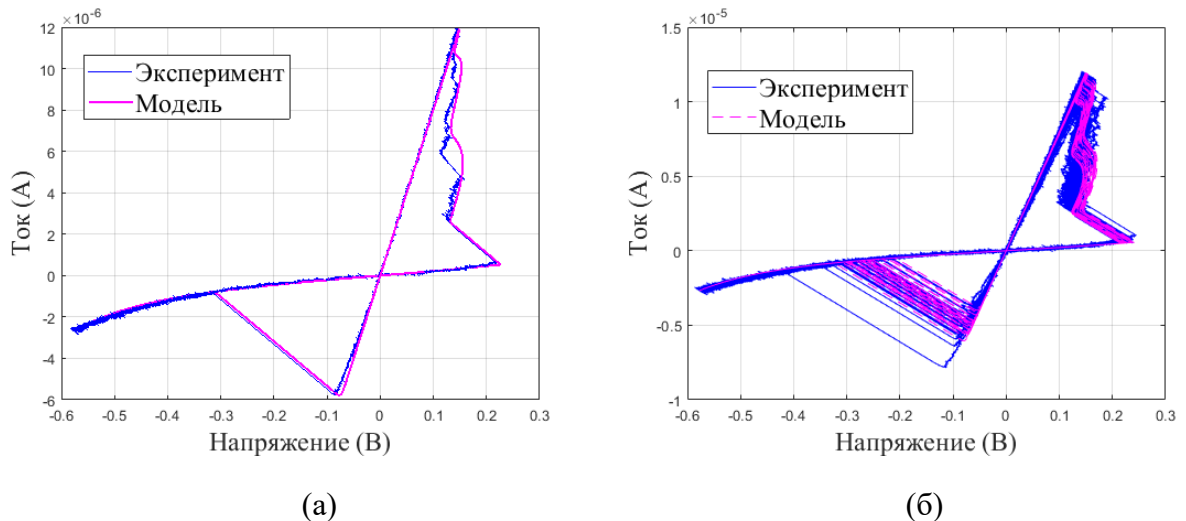


Рисунок 3 – Сравнение ВАХ экспериментальных данных и модели устройства на частоте 1 Гц: (а) одиночный цикл и (б) выборка

Даже простейшие электрические цепи с мемристивными элементами способны демонстрировать хаотическое и мультистабильное поведение. Для их исследования в рамках диссертационной работы разработаны *инструменты анализа и визуализации*

динамических режимов дискретных моделей мультистабильных систем во временной области, пространствах состояний и параметров.

В мультистабильных системах могут возникать длительные хаотические переходные процессы; для их оценки требуется сбор статистических данных из различных начальных условий во временной области. Выполняется построение так называемых диаграмм убывания длительности переходных процессов. Пример такой диаграммы для модели RCL-шунтированного джозефсоновского контакта показан на рисунке 4.

Закон, определяющий число оставшихся траекторий, длительность переходного процесса которых больше времени τ , в случаях рисунка 4 (а) и (б) может быть записан как:

$$N(\tau) = N(0)e^{-\tau/\langle\tau_{tr}\rangle} \quad (5)$$

где $\langle\tau_{tr}\rangle$ является средним значением длительности переходного процесса и $N(0)$ – количество траекторий.

Закон убывания, полученный путем согласования данных вычислительного эксперимента с аналитическим описанием, показанного на рисунке 4 (с) и (d), включает сумму двух гауссовских распределений, а именно:

$$N(\tau) = N_1 e^{-\left(\frac{\tau-\tau_1}{c_1}\right)^2} + N_2 e^{-\left(\frac{\tau-\tau_2}{c_2}\right)^2} \quad (6)$$

где коэффициенты $N_1, N_2, c_1, c_2, \tau_1$ и τ_2 могут быть найдены численно.

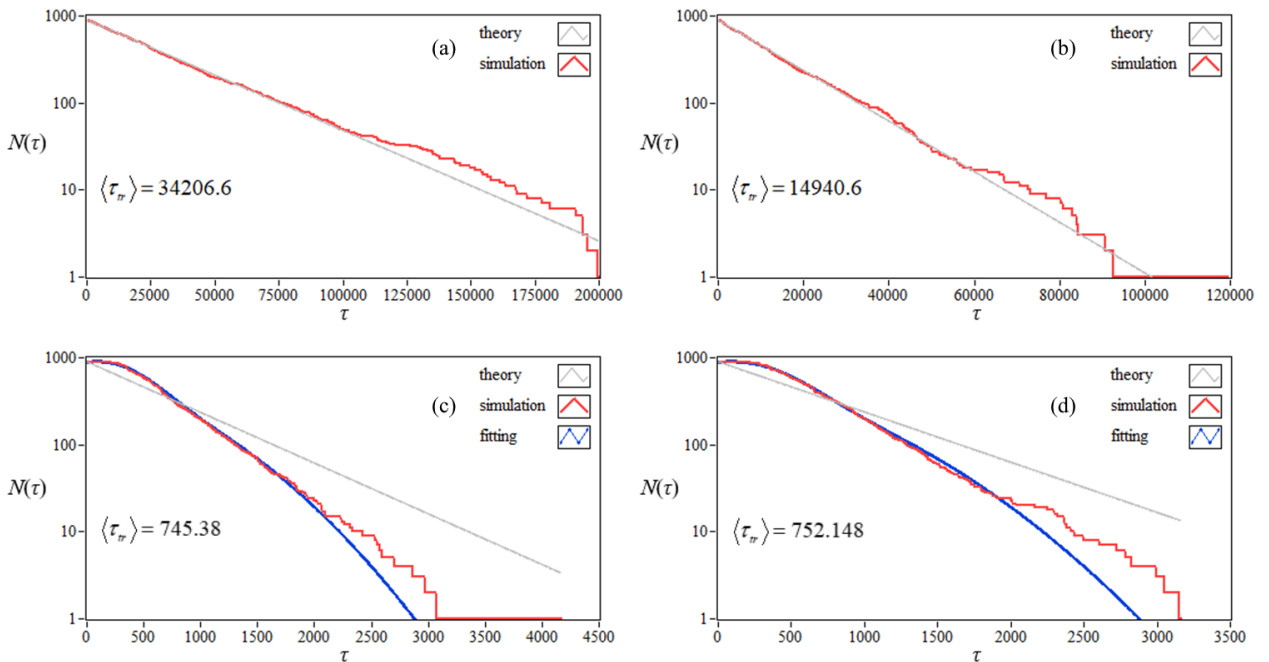


Рисунок 4 – Диаграммы убывания и средняя продолжительность хаотических переходных процессов для моделей джозефсоновского контакта, полученные с помощью методов (а) явного метода Эйлера, (б) неявного метода Эйлера, (с) метода Эйлера-Кромера и (d) эталонного метода Дормана-Принса DOPRI78, при шаге интегрирования $h = 0.01$

В отличие от уравнения (5), закон (6) указывает на наличие в пространстве состояний системы двух притягивающих множеств. Путем построения бассейнов притяжения аттракторов в пространстве состояний показаны эффекты сжатия и размытия одного из бассейнов притяжения при использовании дискретных моделей на основе явных и неявных методов Эйлера. Результаты анализа в пространстве состояний согласуются со

статистическими данными длительности хаотических переходных процессов из временной области.

Анализ дискретных моделей в пространстве параметров основан на построении многопараметрических бифуркационных диаграмм. На диаграммах рисунка 5 показана периодичность динамических режимов на сетке двух параметров системы. Темные оттенки – хаотические режимы, светлые – регулярные режимы низкой периодичности.

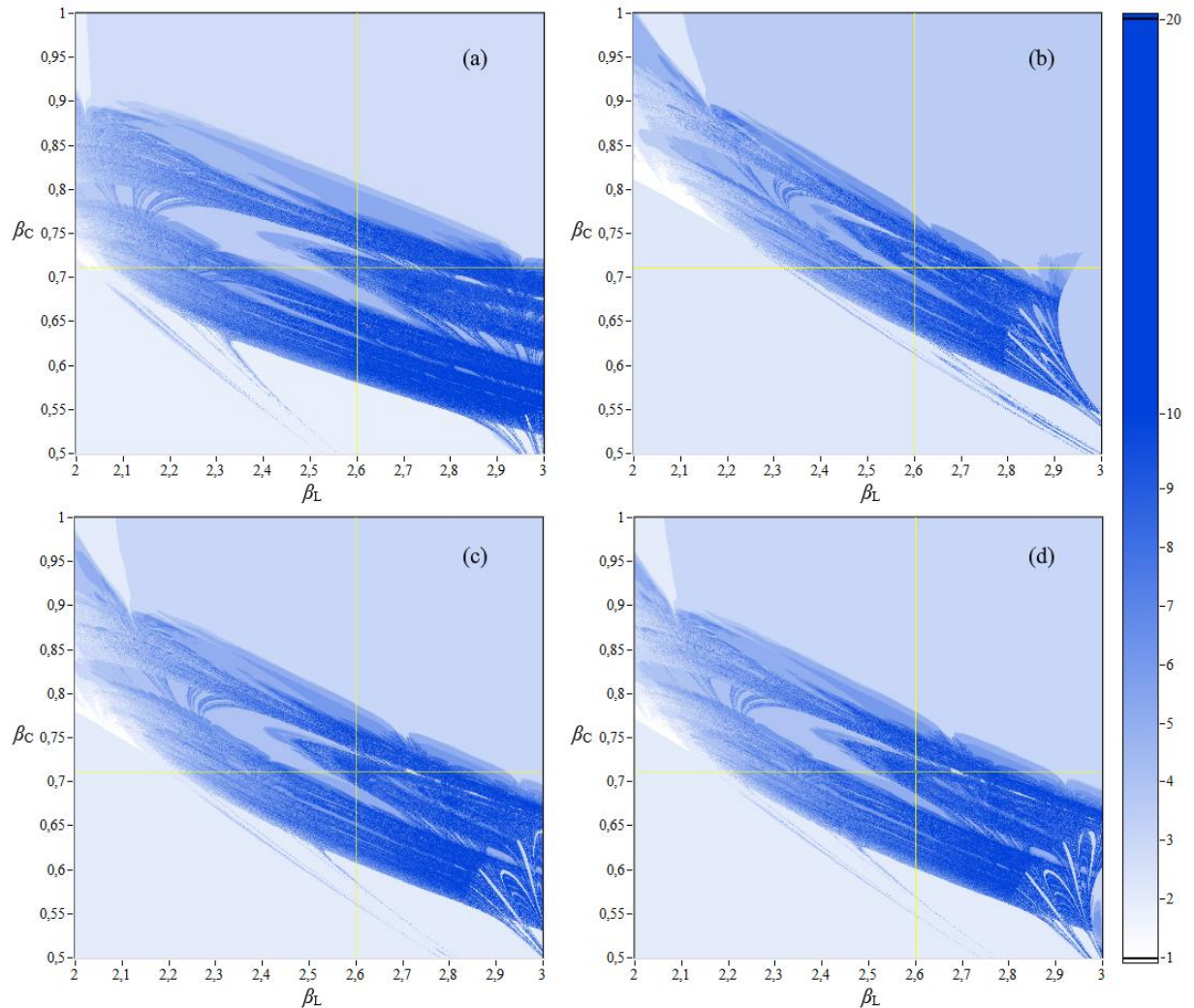


Рисунок 5 – Бифуркационные диаграммы периодичности для моделей джозефсоновского контакта, полученные с помощью (а) явного метода Эйлера, (б) неявного метода Эйлера, (с) метода Эйлера-Кромера и (д) эталонного метода Дормана-Принса DOPRI78, при шаге интегрирования $h = 0.05$

При сравнении диаграмм рисунка 5 видно, что решение, полученное явным методом Эйлера, демонстрирует деформацию пространства параметров в виде растяжения зоны хаотических режимов. Модель, полученная неявным методом Эйлера, демонстрирует сокращение этих участков. Модель, полученная полуявным методом Эйлера-Кромера качественно соответствует эталонному решению.

Третья глава посвящена описанию разработанного программного и технического обеспечения САИПР мемристивных цепей.

С целью проверки положений диссертационной работы созданы экспериментальный стенд и программное обеспечение моделирующей подсистемы САИПР цепей с

мемристивными элементами. Компоненты разработанного программно-аппаратного комплекса показаны на рисунке 6.

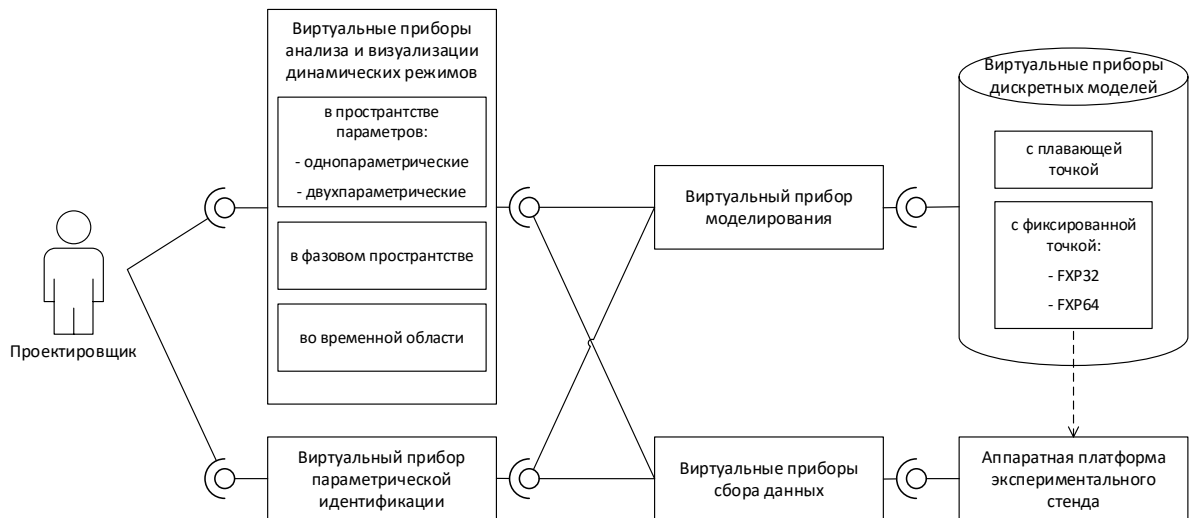


Рисунок 6 – Диаграмма компонентов разработанного программно-технического комплекса

Компоненты программно-аппаратного комплекса реализованы с применением технологии виртуальных приборов и оборудования NI (англ. National Instruments), что позволяет интегрировать рассматриваемые этапы исследовательского проектирования цепей с мемристивными элементами в единый непрерывный процесс.

В составе технического обеспечения представлена аппаратная база экспериментального стенда, включающая станцию прототипирования и компоненты измерительных схем. Программные средства представлены виртуальными приборами сбора и обработки данных экспериментального стенда, параметрической идентификации мемристивных элементов, а также моделирования, анализа и визуализации динамических режимов дискретных моделей мультистабильных систем во временной области, пространстве состояний и пространстве параметров.

Четвертая глава диссертационной работы описывает результаты вычислительных и полунатурных экспериментов с применением разработанных средств САИПР цепей с мемристивными элементами. Выполнена экспериментальная проверка теоретических положений, представленных в главе 2. Подтверждена пригодность экспериментального стенда и программного обеспечения для решения задач, описанных в теоретической части работы.

На примере модифицированной цепи Чуа с SBT-мемристором представлен *метод управления мультистабильностью за счет изменения симметрии дискретного оператора* (рисунок 7). Полуявная конечно-разностная схема с изменяемой симметрией второго порядка для рассматриваемой системы представляется в виде двух сопряженных частей:

$$\begin{aligned}
 x_{n+s} &= x_n + hs[\alpha(z_n - (G + A + B|v_n|)x_n)] \\
 y_{n+s} &= y_n + hs[-z_n + w_n] \\
 z_{n+s} &= z_n + hs[\beta(y_{n+s} - x_{n+s} - z_n)] \\
 w_{n+s} &= w_n + hs[-\gamma y_{n+s} - \delta w_n] \\
 v_{n+s} &= v_n + hs[x_{n+s}]
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
v_{n+1} &= v_{n+s} + h[s-1][x_{n+s}] \\
w_{n+1} &= w_{n+s} + h[s-1][-\gamma y_{n+s} - \delta w_{n+1}] \\
z_{n+1} &= z_{n+s} + h[s-1][\beta(y_{n+s} - x_{n+s} - z_{n+1})] \\
y_{n+1} &= y_{n+s} + h[s-1][-z_{n+1} + w_{n+1}] \\
x_{n+1} &= x_{n+s} + h[s-1][\alpha(z_{n+1} - (G + A + B|v_{n+1}|)x_{n+1})],
\end{aligned} \tag{8}$$

где $s \in (0, 1)$ – коэффициент симметрии схемы, $\alpha, \beta, \gamma, \delta, G, A$ и B – параметры динамической системы.

Возможно как полное подавление мультистабильности за счет выбора больших или малых значений коэффициента симметрии s с переходом в двухспиральный хаотический аттрактор A_2 или фиксированную точку P , соответственно (рисунок 7 (а) и (б)), так и переключение динамических режимов различной периодичности за счет кратковременных отклонений коэффициента симметрии от $s = 0.5$ (рисунок 7 (с) и (д)). С помощью ручного управления коэффициентом s удалось из предельного цикла C_4 перевести систему в хаотический режим A_2 , затем последовательно перевести систему на односпиральный аттрактор A_1 , предельные циклы C_4, C_2 и C_1 .

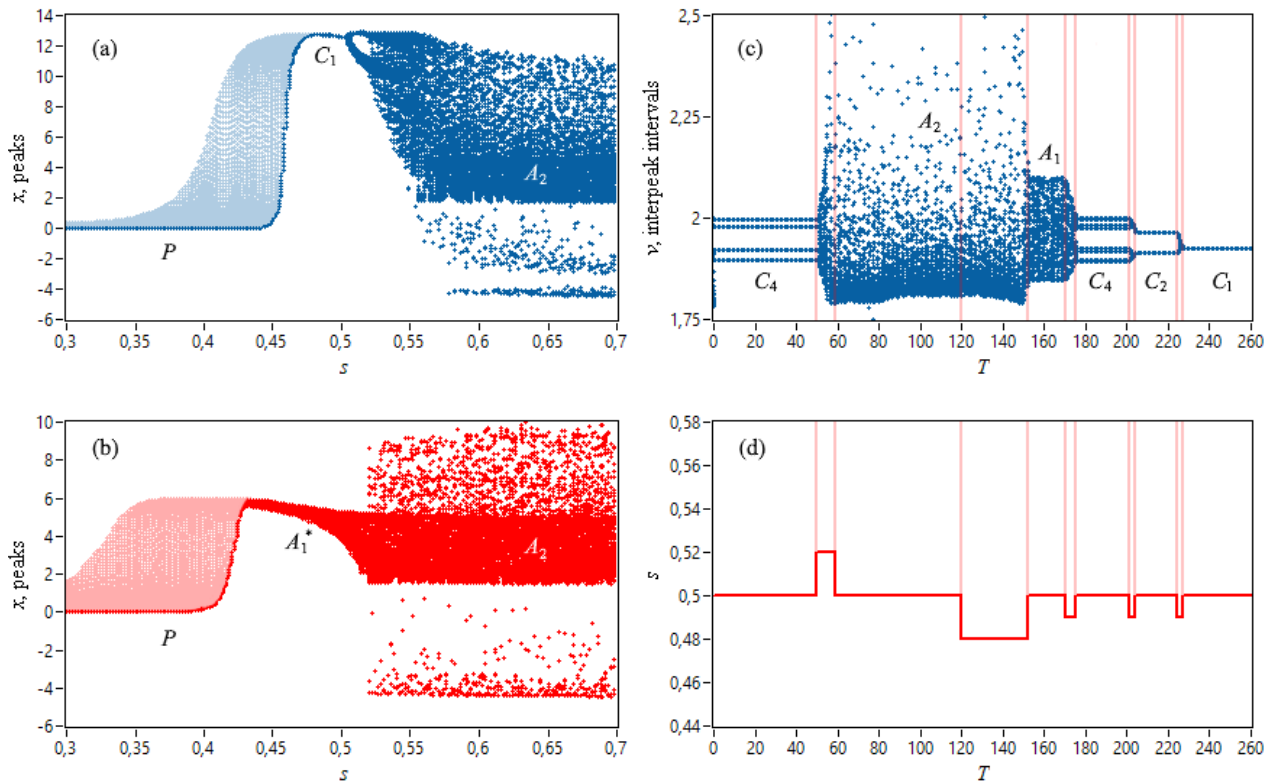
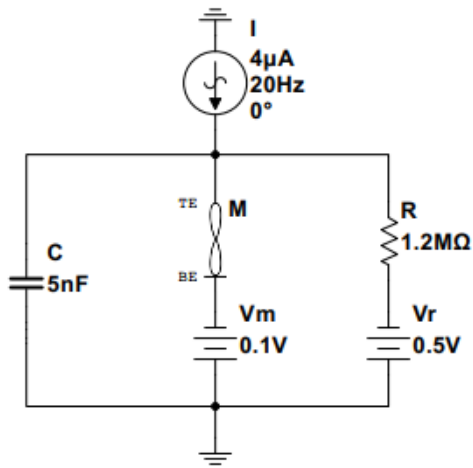
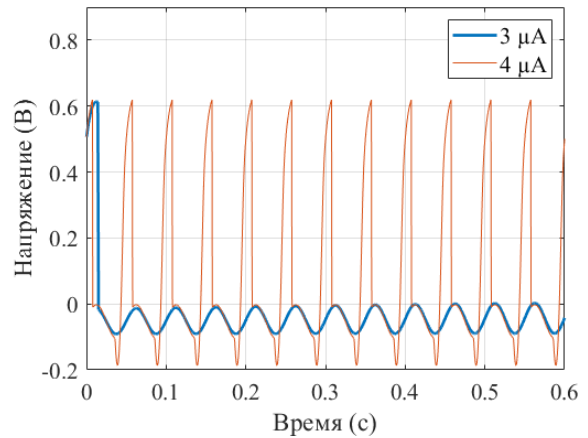


Рисунок 7 – Бифуркационные диаграммы пиковых значений переменной состояния x из начальных условий: (а) предельного цикла периодичности 1 – C_1 и (б) односпирального хаотического аттрактора – A_1^* ; (с) бифуркационная диаграмма межпиковых интервалов переменной состояния v во временной области при (д) управлении коэффициентом s .

На базе представленной модифицированной модели мемристора синтезирована модель эквивалентной цепи искусственного нейрона (рисунок 8 (а)), способного генерировать потенциалы действия в ответ на достаточный стимул (рисунок 8 (б)).



(a)



(б)

Рисунок 8 – (а) Эквивалентная цепь искусственного нейрона и (б) результат ее моделирования во временной области

Ключевыми свойствами модели мемристора в составе представленного нейрона выступают участок отрицательного дифференциального сопротивления, а также низкий порог напряжения для переключения мемристора в состояние высокого сопротивления.

Глава завершается выводами о перспективах внедрения и применения разработанного методического, математического и программного обеспечения САИПР цепей с мемристивными элементами в подразделениях проектных предприятий, разрабатывающих высокотехнологичные изделия электроники.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты, достигнутые в ходе выполнения диссертационной работы.

В **приложении А** приведен список сокращений и условных обозначений.

В **приложении Б** приведен глоссарий.

В **приложении В** приведены акты о внедрении результатов работы.

В **приложении Г** приведены копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены новые способы построения средств САПР в рамках методологии исследовательского проектирования цепей с мемристивными элементами. На основе проведенной оценки существующих средств схемотехнических САПР с точки зрения их пригодности для проектирования устройств на базе мемристивных элементов, выявлены недостатки этих систем в части используемых математических моделей и алгоритмов моделирования и анализа динамических режимов.

2. Создана методика автоматизированного построения математических моделей мемристивных элементов, формализующая этапы структурной и параметрической идентификации. Сформулированные принципы идентификации позволили получить новую математическую модель мемристора, точнее представляющую процессы переключения физического прототипа при слабых токах.

3. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение САИПР, реализующие моделирование и анализ цепей с мемристивными элементами в форме дискретных динамических систем с мультистабильным поведением. Программное обеспечение

включает исполняемые модели в представлении чисел с плавающей и фиксированной точкой, полученные с помощью дискретных операторов с изменяемой симметрией.

4. Разработано техническое обеспечение САИПР в форме экспериментального стенда для идентификации и тестирования цепей с мемристивными элементами. Проведена экспериментальная проверка разработанных методик идентификации, программного и технического обеспечения на типовых цепях с мемристивными элементами, в ходе которой установлены ключевые свойства непрерывных моделей и выявлены наиболее адекватные дискретные модели исследуемых объектов проектирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **Островский В.Ю.**, Бутусов Д.Н., Каримов А.И., Андреев В.С. Эффекты дискретизации при численном исследовании модели нейрона Ходжкина-Хаксли // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – Т. 85. – № 12.

2. Каримов Т.И., Каримов А.И., **Островский В.Ю.**, Давидчук А.Г. Имитационное моделирование и оптимизация интегрированных САПР с учетом организационного обеспечения // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 11. – С. 63-71.

3. Каримов Т.И., Сольницев Р.И., Бутусов Д.Н., **Островский В.Ю.** Алгоритм синтеза компактных цифровых регуляторов в арифметике с фиксированной запятой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – № 3.

4. Бутусов Д.Н., Тутуева А.В., Пестерев Д.О., **Островский В.Ю.** Исследование хаотических генераторов псевдослучайных последовательностей на основе решателей ОДУ // Программные системы и вычислительные методы. – 2017. – № 4.

5. Бутусов Д.Н., **Островский В.Ю.**, Красильников А.В. Моделирование нелинейных динамических систем параллельными численными методами интегрирования // Фундаментальные исследования. – 2014. – Т. 9. – № 12.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS:

1. **Ostrovskii V.**, Fedoseev P., Bobrova Y., Butusov D. Structural and parametric identification of Known memristors // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 63.

2. Karimov T., Druzhina O., Karimov A., Tutueva A., **Ostrovskii V.**, Rybin V., Butusov D., Single-coil metal detector based on spiking chaotic oscillator // Nonlinear Dynamics. – 2021. – P. 1-18.

3. **Ostrovskii V.Y.**, Zubarev A.V., Rybin V.G., Karimov T.I., Control of switching the dynamical modes of a memristor based chaotic circuit // IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – IEEE, 2021. – P. 49-52.

4. **Ostrovskii V.Y.**, Nazare T.E., Martins S.A.M., Nepomuceno E.G. Temperature as a chaotic circuit bifurcation parameter // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus). – IEEE, 2020. – P. 154-157.

5. Karimov T.I., Druzhina O.S., **Ostrovskii V.Y.**, Karimov A.I., Butusov D.N., The study on multiparametric sensitivity of chaotic oscillators // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus). – IEEE, 2020. – P. 134-137.

6. Andreev V., **Ostrovskii V.**, Karimov T., Tutueva A., Doynikova E., Butusov D. Synthesis and analysis of the fixed-point Hodgkin–Huxley neuron model // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – № 3. – P. 434.

7. **Ostrovskii V.Y.**, Tutueva A.V., Andreev V.S., Rybin V.G., Phase bifurcation analysis of nonlinear dynamical systems // 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – IEEE, 2020. – P. 88-91.
8. **Ostrovskii V.Y.**, Tutueva A.V., Rybin V.G., Karimov A.I., Butusov D.N. Continuation analysis of memristor-based modified Chua's circuit // 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR). – IEEE, 2020. – P. 1-5.
9. Butusov D.N., **Ostrovskii V.Y.**, Karimov A.I., Andreev V.S. Semi-explicit composition methods in memcapacitor circuit simulation // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS). – 2019. – Vol. 10. – № 2. – P. 37-52.
10. **Ostrovskii V.Y.**, Karimov T.I., Solomevich E.P., Kolev G.Y., Butusov D.N. Numerical effects in computer simulation of simplified Hodgkin-Huxley model // Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Mathematics and Statistics. – 2019. – P. 92-95.
11. Karimov T.I., **Ostrovskii V.Y.**, Karimov A.I., Druzhina O.S., Eroshenko S.A. Bursting memristor neuron response to capacitance variation // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2019. – P. 0221-0225.
12. Tutueva A.V., Pesterev D.O., Karimov A.I., Butusov D.N., **Ostrovskii V.Y.** Adaptive Chirikov map for pseudo-random number generation in chaos-based stream encryption // 2019 25th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – IEEE, 2019. – P. 333-338.
13. **Ostrovskii V.Y.**, Butusov D.N., Belkin D.A., Okoli G. Studying the dynamics of memristive synapses in spiking neuromorphic systems // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). – IEEE, 2018. – P. 209-214.
14. **Ostrovskii V.Y.**, Karimov A.I., Rybin V.G., Kopets E.E., Butusov D.N. Comparing the finite-difference schemes in the simulation of shunted Josephson junctions // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – IEEE, 2018. – P. 300-305.
15. Kaplun D., Butusov D., **Ostrovskii V.**, Veligosha A., Gulvanskii V. Optimization of the FIR filter structure in finite residue field algebra // Electronics. – 2018. – Vol. 7. – № 12. – P. 372.
16. Butusov D., Karimov T., Voznesenskiy A., Kaplun D., Andreev V., **Ostrovskii V.** Filtering techniques for chaotic signal processing // Electronics. – 2018. – Vol. 7. – № 12. – P. 450.
17. Butusov D.N., **Ostrovskii V.Y.**, Pesterev D.O., Numerical analysis of memristor-based circuits with semi-implicit methods // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). – IEEE, 2017. – P. 271-276.
18. Butusov D.N., **Ostrovskii V.Y.**, Tutueva A.V., Savelev A.O. Comparing the algorithms of multiparametric bifurcation analysis // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – IEEE, 2017. – P. 194-198.
19. Andreev V.S., Goryainov S.V., **Ostrovskii V.Y.**, Belkin D.A. Stepize control algorithms for composition ODE solvers // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – IEEE, 2017. – P. 337-340.
20. Butusov D.N., **Ostrovskii V.Y.**, Karimov A.I., Belkin D.A. Study of two-memcapacitor circuit model with semi-explicit ODE solver // 2017 21st Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – IEEE, 2017. – P. 64-70.
21. Butusov D.N., **Ostrovskii V.Y.**, Zubarev A.V. Study of two-memristor circuit model with explicit composition method // 2017 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). – IEEE, 2017. – P. 206-209.

22. Butusov D.N., Karimov T.I., **Ostrovskii V.Y.** Semi-implicit ODE solver for matrix Riccati equation // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). – IEEE, 2016. – P. 168-172.

23. Butusov D.N., Tutueva A.V., **Ostrovskii V.Y.** Simulation of dynamical systems based on parallel numerical integration methods // 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). – IEEE, 2015. – P. 56-59.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021669813, Программа полноцветного рендеринга фазовых пространств, дата поступления заявки: 18.11.2021, дата регистрации 02.12.2021, авторы: Каримов Т.И., Кулагин М.В., **Островский В.Ю.**, Тутueva А.В.

2. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021668985, Программа визуализации траектории экспериментальных данных на поверхности модели мемристора, дата поступления заявки: 18.11.2021, дата регистрации 23.11.2021, авторы: Каримов Т.И., Бутусов Д.Н., **Островский В.Ю.**, Рыбин В.Г.

3. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021664463, Программа для параметрической идентификации цепей с нелинейными элементами, дата поступления заявки: 01.09.2021, дата регистрации: 07.08.2021, авторы: Каримов А.И., Каримов Т.И., Бутусов Д.Н., **Островский В.Ю.**

4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020617462, Программа визуализации областей мультистабильности на параметрических диаграммах нелинейных динамических систем, дата поступления заявки: 02.07.2020, дата регистрации: 08.07.2020, авторы: **Островский В.Ю.**, Тутueva А.В., Каримов А.И., Рыбин В.Г.

5. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2019616796, Программа моделирования и анализа хаотических переходных процессов в нелинейных системах, дата поступления заявки: 21.05.2019, дата регистрации: 29.05.2019, авторы: **Островский В.Ю.**, Красильников А.В., Рыбин В.Г.

6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2019666875, Программа построения фазовых и комбинированных бифуркационных диаграмм, дата поступления заявки: 06.12.2019, дата регистрации: 16.12.2019, авторы: **Островский В.Ю.**, Рыбин В.Г., Каримов А.И., Каримов Т.И., Бутусов Д.Н.

7. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018618554, Программа численного решения дифференциальных уравнений на основе фрактальных алгоритмов интегрирования с адаптивным шагом, дата поступления заявки: 07.06.2018, дата регистрации: 16.07.2018, авторы: Бутусов Д.Н., **Островский В.Ю.**, Мартынов В.Ю.

8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018619092, Программа моделирования динамики нейроморфных систем, дата поступления заявки: 13.06.2018, дата регистрации: 31.07.2018, авторы: Бутусов Д.Н., **Островский В.Ю.**, Красильников А.В.

9. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017618569, Программа для исследования динамики мемристивных систем, дата поступления заявки: 05.06.2017, дата регистрации 04.08.2017, авторы: Бутусов Д.Н., Каримов Т.И., **Островский В.Ю.**, Андреев В.С.