

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙРОМОРФНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МЕМРИСТИВНЫХ УСТРОЙСТВ

© 2021 г. С. А. Щаников<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Муромский институт Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Муром, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

\*E-mail: seach@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.07.2021 г.

После доработки 15.07.2021 г.

Принята к публикации 15.07.2021 г.

Статья посвящена вопросам разработки нейроморфных систем на базе наноэлектронных мемристоривных устройств и включает в себя результаты обзора методологических, аппаратных и программных средств их проектирования. Описан общий подход к решению данной задачи с точки зрения системной инженерии, приведены V-диаграмма процесса разработки и иерархия моделей, составляющих “цифровой двойник” системы. Показано, что при разработке нейроморфных систем важной задачей является оценка показателей качества их функционирования в составе систем более высокого уровня. Представлены проект и описание системы программно-аппаратного моделирования для оценки таких показателей качества нейроморфных систем, как точность, отказоустойчивость и надежность.

DOI: 10.1134/S1992722321060212

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных подходов к аппаратной реализации искусственных нейронных сетей (ИНС) и нейроморфных систем в целом является применение электронных компонентов, называемых мемристоривными устройствами или мемристорами [1], что подтверждается результатами аналитических обзоров публикаций [2–5] и мнениями авторитетных исследователей в данной области [6–10]. В настоящее время во всем мире проводятся исследования по созданию органических [11–13] и неорганических [14–17] материалов и структур, обладающих мемристоривными свойствами, и это направление является базовым, так как именно от него зависят свойства и характеристики разрабатываемых нейроморфных систем.

Приведенные в [3, 18, 19] результаты тестов позволяют заключить, что системы на базе мемристоривных устройств потенциально обладают большими преимуществами перед всеми имеющимися аналогами на базе CPU (central processing unit), GPU (graphics processing unit), NPU (neural processing unit), TPU (tensor processing unit) и системами на FPGA (field-programmable gate array) и ASIC (application-specific integrated circuit) по плотности размещения элементов, быстродействию и энергопотреблению.

Описанные преимущества мемристоривных устройств можно использовать для создания систем специального назначения там, где важны низкое энергопотребление, малые габариты, высокая скорость работы при выполнении интеллектуальных задач. Под данные требования подпадают все бортовые или носимые вычислительные системы, например беспилотный транспорт и летательные аппараты, системы распознавания для самолетов, оборудование амуниции и т.д. Дополнительным преимуществом мемристоривных устройств является то, что они потенциально мало чувствительны к ионизирующему и дефектообразующему радиационному воздействию [20], что означает то, что из мемристоривной можно создавать радиационностойкую электронику, требования по которой предъявляются ко всем объектам вооружения и военной техники, аппаратуре космических аппаратов и аппаратов с бортовыми ядерными энергетическими установками.

В составе ИНС мемристоры выполняют роль синапсов. При этом с их помощью можно аппаратно реализовать как синапсы традиционных формальных архитектур ИНС (многослойный перцептрон [21, 22], сеть Хопфилда [23], глубокие сети [24] и др.), в которых входной сигнал умно-

жается на запрограммированный заранее вес (встречаются архитектуры синапсов с двумя [25, 26], четырьмя [27] и более мемристорами), так и синапсы для спайковых ИНС, в которых мемристор проявляет механизмы синаптической пластичности подобно живым биологическим нейронным сетям [28–30].

В процессе разработки нейроморфных систем на базе мемристоров (НСМ) для конкретного проектного решения необходимо определить, какие значения основных показателей качества их функционирования (точности, отказоустойчивости, надежности, быстродействия и т.д.) будут в итоге достигнуты. Если условно принять, что все свойства и характеристики электронных компонентов системы будут соответствовать номинальным значениям, то достигнутые значения показателей качества будут зависеть от большого числа параметров (архитектуры, структуры, конструкции, технологии, методов и алгоритмов и пр.). На практике дополнительное влияние на качество функционирования НСМ будут оказывать неизбежно возникающие дестабилизирующие факторы различной природы [31–33], и это может привести к тому, что созданная система не будет соответствовать заданным требованиям, что является значительной проблемой.

На этапе проектирования НСМ необходимо определить, какими значениями показателей качества она будет обладать в итоге. Данная задача может быть решена с применением методов системной инженерии и имитационного моделирования [34]. Нейроморфные системы – это сложно формализуемые или не формализуемые, нелинейные, динамические, многомерные, мультирежимные объекты, с вероятностным характером всех внутренних и внешних явлений и процессов, что в большинстве практических случаев не позволяет применять для их анализа и синтеза только аналитические методы.

Новизна данной работы заключается в том, что методы системной инженерии адаптированы и описаны применительно к процессу разработки НСМ. Первая часть статьи включает в себя результаты обзора методологических, аппаратных и программных средств решения данной задачи, включая разработанные автором. В ней также приведены описание общего подхода и иерархия моделей НСМ. Во второй части предложен проект программно-аппаратного комплекса по исследованию функциональных свойств и характеристик НСМ, работающего по технологии “hardware-in-the-loop (HIL) simulation” [35] под управлением авторского программного обеспечения. Он позволяет определить основные показатели качества функционирования НСМ, такие как точность, отказоустойчивость и надежность.

## ОБЩИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ НЕЙРОМОРФНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МЕМРИСТИВНЫХ УСТРОЙСТВ

С точки зрения системной инженерии процесс разработки НСМ можно представить в виде V-диаграммы (рис. 1). При таком подходе НСМ рассматривается как самостоятельная система, однако важно понимать, что она имеет практическое применение только в составе систем более высокого уровня, например систем машинного зрения в промышленности или беспилотном транспорте, робототехнике и т.д.

На системном уровне НСМ нужно рассматривать как “черный ящик”, обладающий заданными показателями качества релевантными той системе, в составе которой она будет использоваться, и для оценки показателей применять методы дискретно-событийного или агентного моделирования (например, GPSS (general purpose simulation system) [36]). Такое моделирование позволит оценить, способна ли НСМ выполнять задачи так, чтобы качество работ всей системы удовлетворяло поставленным требованиям.

Спускаясь ниже по V-диаграмме, необходимо установить, из каких подсистем будет состоять НСМ, каким образом они будут взаимосвязаны друг с другом и какими требованиями они должны обладать для того, чтобы итоговые показатели качества всей системы соответствовали заданным. На данном уровне модели подсистем являются информационными, т.е. оперируют числами, являющимися абстракциями относительно реальных физических величин, которыми будут закодированы при аппаратной реализации. Для создания моделей подсистем можно применять такие программы, как MATLAB Simulink (MathWorks) [37], Scilab XCos (ESI Group) и др.

На уровне технических средств модели определяют, в каких физических параметрах сигнала будет закодирована обрабатываемая информация (например, частота или амплитуда входного сигнала могут кодировать входную информацию, проводимость мемристивных устройств, находящаяся в некоторой функциональной зависимости от остальных компонентов синапса, может кодировать его вес и.д.) и каким образом будет происходить преобразование сигналов в НСМ. Для данных целей можно применять симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом SPICE (simulation program with integrated circuit emphasis) [38] и основанные на нем программы, например LTSpice (Analog Devices) [39, 40] или PSpice (Cadence Design Systems) и др. Отдельно стоит отметить программу Memristor Toolbox для MATLAB, в которой имеется возможность численного моделирования мемристоров и устройств на их основе [41].



Рис. 1. V-диаграмма процесса разработки НСМ.

На уровне электронных компонентов применяют методологию многомасштабного моделирования [42, 43]. Первыми в ряду многомасштабных моделей идут модели из первых принципов [44], основанные на фундаментальных законах физики и позволяющие моделировать атомные конфигурации и точно прогнозировать структурные и динамические свойства материала на основе расчета функционала плотности DFT (density functional theory). Атомистические методы (методы молекулярной динамики и Монте-Карло) позволяют исследовать динамику большого количества частиц и применительно для мемристов описать механизмы резистивного переключения, например, за счет образования филаментов [45, 46]. Широкое распространение в практических приложениях получили феноменологические модели мемристивных устройств [47], получаемые путем приближения экспериментальных данных (например, вольт-амперных характеристик (ВАХ)). Такие модели не требуют высокопроизводительных вычислителей и могут быть использованы в составе схмотехнических моделей уровня технических устройств. Перспективным направлением в моделировании мемристивных устройств в настоящее время является изучение их сложной богатой динамики [48–50], которая открывает потенциал к созданию НСМ, максимально приближенных по принципам функционирования к живым биологическим системам.

В том случае, когда основной вычислительный узел НСМ является интегральной схемой (ИС), он представляет собой отдельную сложную систему, разработка которой также проводится в соответствии с V-диаграммой. В этом случае ИС НСМ имеет свои, отличающиеся от НСМ, показатели качества, характеризующие ее функциональные особенности (например, у ИС показателем точности может являться разрядность или погрешность МВУ (матрично-векторного умножения), при этом у НСМ, созданной на базе этой ИС, показателем точности может быть вероятность распознавания или средний квадрат ошибок). Для разработки ИС применяется методология IC (integrated circuit) Design Flow, состоящая из таких этапов, как разработка архитектуры ИС в соответствии с исходной спецификацией, разработка схмотехнических компонентов (триггеров, компараторов и т.п.) и логики их функционирования, физическое проектирование на уровне методов реализации отдельных элементов и создание топологических фотошаблонов для производства. На каждом этапе применяется соответствующее EDA (electronic design automation) и CAD (computer-aided design) программное обеспечение.

В итоге полный набор рассмотренных выше моделей составляет “цифровой двойник” НСМ. Цифровой двойник можно применять для оптимизации любых параметров НСМ (архитектуры, структуры, функционирования и т.д.), минимизировав временные и финансовые затраты на ма-

кетирование и прототипирование, и выработать удовлетворяющее заданным требованиям проектное решение.

### МЕСТО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОБЩЕМ ПОДХОДЕ

При переходе от моделирования к прототипированию применяются разные технологии работы с НСМ в зависимости от уровня структурно-функциональной иерархии. На уровнях электронных компонентов и технических средств разработчики используют такое оборудование, как осциллографы, логические анализаторы, мультиметры, генераторы сигналов произвольной формы и др. В настоящее время существуют более гибкие и многофункциональные средства исследования свойств и характеристик мемристивных устройств, сочетающие в себе функционал приведенного выше оборудования, например система ArcONE (ArC Instruments) [51, 52]. Она позволяет проводить электроформовку мемристивных устройств, регистрировать ВАХ, проводить исследование эффекта резистивного переключения при подаче входных напряжений в диапазоне  $\pm 12$  В и длительности импульса до 90 нс. Другим примером является использование универсального USB (Universal Serial Bus) осциллографа Analog Discovery 2 от Digilent в паре с авторским программным обеспечением, автоматизирующим анализ экспериментальных данных для мемристивных устройств фирмы Knowm Inc.

Двигаясь вверх по V-диаграмме и переходя на уровень подсистем и систем, применение данных инструментов становится затруднительным вследствие наличия большого числа контролируемых параметров и сигналов. На данном этапе необходимы моделирование и исследование поведения НСМ в составе системы более высокого уровня, когда входные сигналы поступают с сенсорных элементов и подаются на моторные. Для решения данной задачи предлагается применять технологию программно-аппаратного моделирования (ПАМ) или HIL simulation.

Системы ПАМ позволяют моделировать работу других систем в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, в режиме реального времени. Например, если разрабатываемая НСМ будет являться частью системы автопилота и предназначена для детектирования объектов и формирования управляющих воздействий для систем принятия решений, управляющих поведением автомобиля, то система ПАМ позволит предварительно оценить все функциональные показатели качества НСМ, не прибегая к испытаниям на дороге.

### ПРОЕКТ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проект системы ПАМ НСМ представлен на рис. 2. Система ПАМ состоит из двух частей и представляет собой программно-аппаратный комплекс. Архитектура аппаратной части разработана в соответствии с особенностями функционирования НСМ. По той причине, что НСМ являются параллельными средствами обработки информации высокой размерности, сигналы на все входы НСМ одновременно могут быть поданы с применением ПЛИС (программируемой логической интегральной схемы). ПЛИС вместе с набором ЦАП (цифро-аналоговых преобразователей) представляет собой генератор сигналов произвольной формы. После обработки сигналов НСМ они регистрируются на АЦП (аналого-цифровых преобразователях) и передаются на ПЛИС для дальнейшего анализа. ПЛИС и набор АЦП в данном случае могут быть рассмотрены как многоканальный осциллограф.

Для управления режимами работы ПЛИС используется авторское программное обеспечение, укрупненно состоящее из драйверов, обеспечивающих низкоуровневое взаимодействие ПЛИС и программного комплекса (ПК) “МемриСим”. Помимо управления режимами работы в задачи ПК “МемриСим” входят обработка результатов измерений и оценка показателей качества НСМ, таких как точность, отказоустойчивость и надежность. Архитектура ПК “МемриСим” представлена на рис. 3.

ПК “МемриСим” является кроссплатформенным, модульным, расширяемым программным обеспечением, написанным на языках C и Python. Он состоит из ядра, связывающего все модули друг с другом. “МемриСим” предоставляет возможность работы с аппаратной частью системы ПАМ: управлять режимами ПЛИС и обрабатывать регистрируемые от НСМ данные. Помимо этого, в ПК “МемриСим” заложена возможность работы с моделями НСМ. Данная опция позволяет проводить часть расчетов по оценке показателей качества НСМ на имитационных моделях, снижая число экспериментов с аппаратной частью.

В настоящее время система ПАМ НСМ конструктивно выполнена следующим образом. Аппаратная часть системы состоит из двух модулей. Основной модуль реализован на базе отладочной платы DE1-SoC Board от компании Terasic Inc, содержащей систему на кристалле из ПЛИС и ARM (advanced RISC (reduced instruction set computer) machine) процессора с общим ОЗУ (оперативно-запоминающим устройством). Управление работой ПЛИС осуществляется ПК “МемриСим” через общий буфер в ОЗУ. Протокол

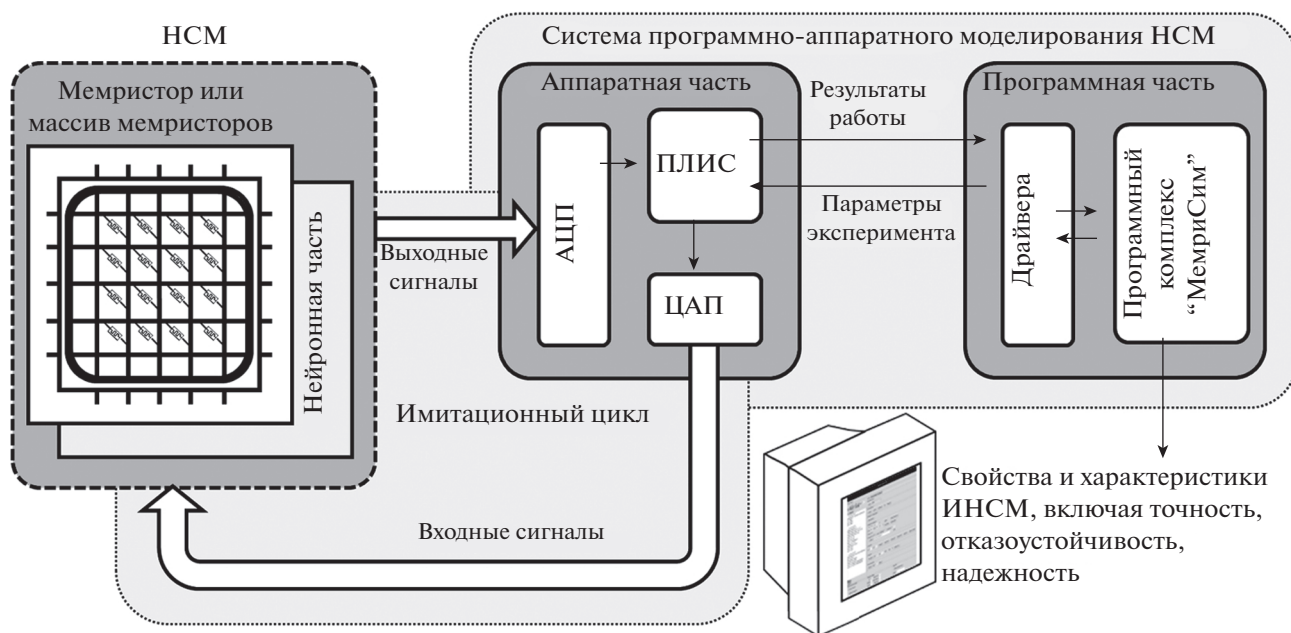


Рис. 2. Архитектура системы программно-аппаратного моделирования НСМ.

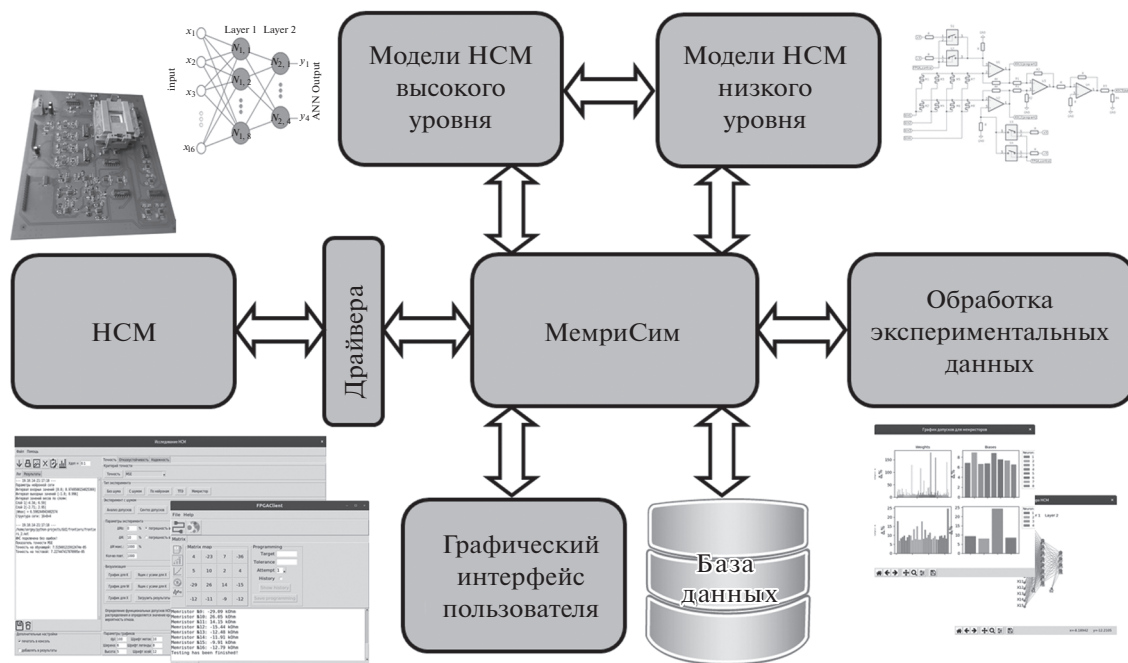


Рис. 3. Архитектура программного комплекса «МемриСим».

взаимодействия авторский, каждый пакет включает в себя слово команд и данные.

Основной модуль имеет 72 интерфейса **GPIO** (general-purpose input/output) с возможностью генерации импульсных сигналов амплитудой 3.3 В. Основной модуль можно подключать к НСМ в случае, если она имеет цифровые входы и выходы

(ЦАП и АЦП находятся на плате НСМ), и передавать данные по любому из существующих интерфейсов (наиболее часто это Serial Peripheral Interface (**SPI**)). В случае, когда НСМ имеет аналоговые входы и выходы, необходимо подключение дополнительного модуля, являющегося платой расширения функциональных возможностей основного модуля. Вариант его исполнения пред-

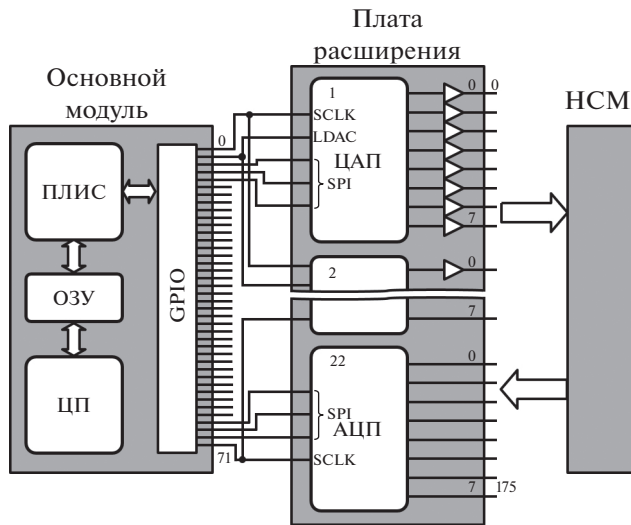


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема платы расширения для системы программно-аппаратного моделирования НСМ.

ставлен на рис. 4. Он состоит из многоканальных ЦАП и АЦП, а также буферов для повышения их нагрузочной способности. Такой подход обеспечивает хорошую масштабируемость системы ПАМ по числу каналов. Например, при использовании 8-канальных ЦАП и АЦП с учетом того, что для SPI необходимо задействовать  $2 + 3N$  GPIO, для  $N$  ЦАП и  $1 + 3M$  GPIO для  $M$  АЦП, всего можно подключить 11 ЦАП и 11 АЦП и получить 176 каналов на ввод и вывод. Отметим, что при масштабировании системы будет меняться максимальная частота ее работы, зависящая от частот ЦАП и АЦП и варианта их подключения.

Традиционно технология *HiL simulation* применяется для отладки практически готовой к внедрению системы. В свою очередь, система ПАМ НСМ может быть применена не только как стенд для проведения испытания НСМ в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, но и как система исследования НСМ. Основные возможности, предоставляемые системой ПАМ НСМ, позволяют использовать ее для следующих целей:

- определение проводимостей мемристивных устройств;
- снятие ВАХ;
- программирование резистивных состояний;
- формирование входных сигналов и подача их на НСМ;
- регистрация выходных сигналов НСМ;
- имитационное моделирование НСМ.

При работе с ПАМ НСМ можно выделить несколько типовых вариантов использования: работа в режиме исследования НСМ, выбор опти-

мальных параметров, проведение имитационного моделирования НСМ и непосредственно оценка показателей качества. Для каждого варианта использования разработаны методы определения точности, отказоустойчивости и надежности НСМ [53, 54]. Практическое применение ПАМ НСМ представлено в [26, 55] на примере разработки двухслойной формальной ИНС прямого распространения.

### ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ

Методику оценки точности, отказоустойчивости и надежности НСМ с применением системы ПАМ можно продемонстрировать на следующем тестовом примере. Предположим, что к системе ПАМ подключена НСМ. Архитектурно НСМ представляет собой формальную ИНС прямого распространения (рис. 5а). Ее структура содержит слой нейронов с определенными функциями активации. Конструктивно она выполнена следующим образом: МВУ выполняется по закону Ома на мемристивных устройствах, объединенных в кроссбар, результирующие токи суммируются по правилу Кирхгофа и подаются на операционный усилитель, выполняющий роль функции активации. Входные сигналы  $V$  через ЦАП подаются на столбцы кроссбара, а выходные сигналы со строк после прохождения функции активации передаются на другие скрытые слои и далее с выходного слоя  $V_{\text{вых}}$  на АЦП. Такая НСМ на информационном уровне параметризуется матрицами весов  $W$  по каждому слою, а на физическом – матрицами проводимостей  $G$ .

Для оценки надежности НСМ в соответствии с российскими и международными стандартами необходимо построить схему надежности и рассчитать по ней основные показатели надежности. Для построения схемы надежности необходимо знать отказоустойчивость компонентов системы. В [53, 54] показано, что для НСМ понятия отказоустойчивости и надежности связаны через точность. Отказ НСМ наступает в том случае, если точность ее функционирования становится меньше допустимого значения. Такая ситуация может быть вызвана очень большим количеством факторов, учесть в полной мере которые при разработке невозможно, но необходимо минимизировать последствия их влияния или устранить явные. Оценку рассмотренных показателей проведем в несколько этапов.

*Оценка точности функционирования НСМ.* На данном этапе проведем измерение проводимостей  $G$  мемристивных устройств и перейдем от НСМ к ее имитационной модели (рис. 3 “модели НСМ высокого уровня”). На имитационной модели, задав плотности вероятностей весов  $W$ , оценим допустимые отклонения их значений от но-

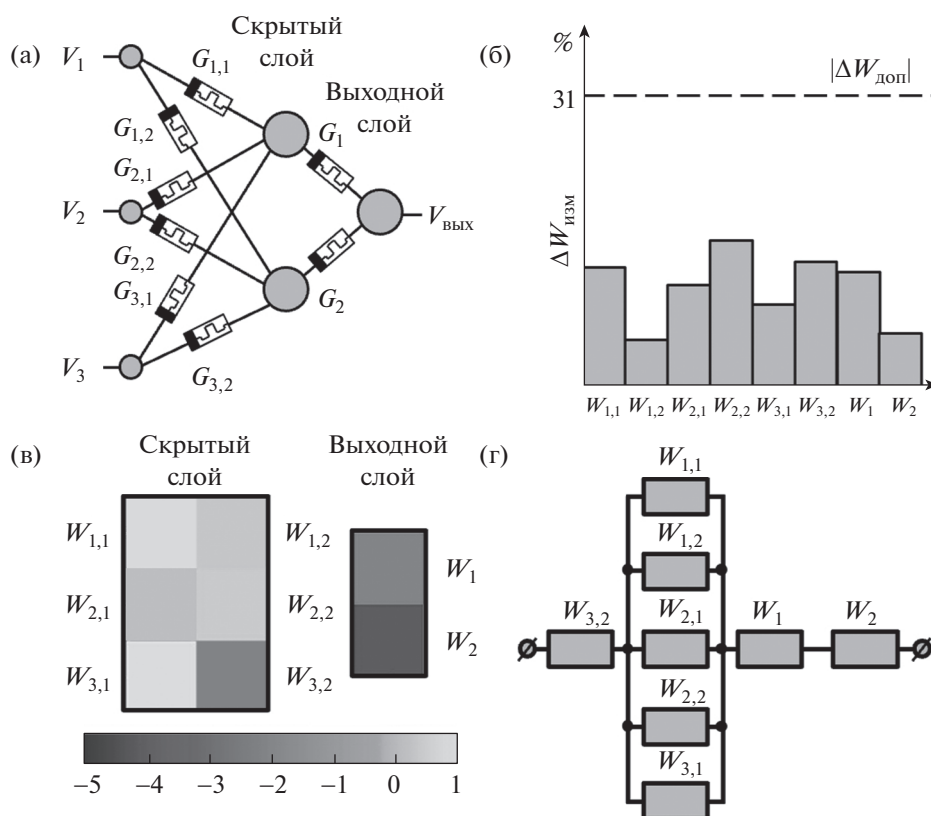


Рис. 5. Пример применения общего подхода: а – архитектура тестовой ИНС, б – поля допусков для весов ИНС, в – карта отказоустойчивости НСМ, г – схема надежности НСМ.

минальных, превышение которых вызывает отказ НСМ. На рис. 5б допустимое отклонение отмечено линией  $|\Delta W_{\text{доп}}|$  на уровне 31%. Вернемся к НСМ и проведем измерение проводимостей  $G$  мемристивных устройств в процессе функционирования. Полученную статистику аппроксимируем, внесем в имитационную модель (рис. 3 “модели НСМ низкого уровня”) и проведем численный эксперимент, результаты которого представим на рис. 5б. Из рисунка видно, что отклонения значений весов  $|\Delta W_{\text{изм}}|$  находятся внутри поля допуска. Для рассматриваемой НСМ такой результат означает, что в процессе функционирования вариации проводимостей  $G$  не вызывают отказа НСМ.

**Оценка отказоустойчивости НСМ.** На данном этапе на имеющейся имитационной модели, полученной на предыдущем этапе, проведем моделирование отказов отдельных компонентов. Отказоустойчивость НСМ рассчитаем по относительному критерию отказоустойчивости, значение которого становится отрицательным в случае наступления отказа НСМ, и находится на интервале от 0 до 1 в противном случае. На рис. 5в представлены результаты оценки отказоустойчивости при наступлении отказов весов  $W$  нейронов для каждого слоя. Из рисунка видно, что отрицательные значения критерия отказоустойчивости наблюдаются

для  $W_{3,2}$ ,  $W_1$  и  $W_2$ . Это означает, что изменение значения любого из них выше допустимого отклонения вызовет отказ НСМ. Для весов  $W_{1,1}$ ,  $W_{1,2}$ ,  $W_{2,1}$ ,  $W_{2,2}$ ,  $W_{3,1}$  отказ любого из них не вызовет отказа всей НСМ в целом.

**Оценка надежности НСМ.** В соответствии с теорией надежности веса  $W_{1,1}$ ,  $W_{1,2}$ ,  $W_{2,1}$ ,  $W_{2,2}$ ,  $W_{3,1}$  расположим на схеме надежности (рис. 5г) параллельно, а веса  $W_{3,2}$ ,  $W_1$  и  $W_2$  последовательно. Данная схема необходима для вывода формул расчета основных показателей надежности системы при наличии экспериментально определенной интенсивности отказов. Данную информацию можно использовать в дальнейшем при выработке мер по повышению надежности разрабатываемой НСМ.

Описанная методика отражает лишь часть вариантов использования системы ПАМ НСМ, приведенных в предыдущем разделе. При этом такой анализ можно проводить не только на уровне отдельных мемристоров, но и на уровне отдельных конструктивных узлов. Например, если один нейрон с большим количеством весов конструктивно выполнен на одном чипе, можно оценить влияние отказа всего чипа (т.е. нейрона) на точность работы НСМ в целом. Общий подход,

описанный в статье, требует адаптации под конкретные архитектуры и структуры ИНС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной вывод данной работы состоит в том, что специализированные под конкретную область (в данном случае НСМ) программно-аппаратные комплексы и имитационные модели позволяют повысить эффективность разработки и исследования сложных систем. Такие задачи, как оценки точности, отказоустойчивости и надежности, являются сложными для аналитического решения ввиду большого количества факторов, влияющих на них, и “проклятия размерности”. Это особенно сильно проявляется при разработке НСМ ввиду их особенностей, приведенных в статье.

Данная работа рассматривает только техническую сторону НСМ, не учитывая ошибок, вызываемых неправильным составлением обучающих выборок или некорректным выбором метрик и целей в процессе обучения и т.д. Эти факторы в купе со сложностью оценки надежности НСМ с технической точки зрения, возможно, на данный момент и являются основной причиной того, что ИНС, развивающиеся на протяжении более 60 лет, до сих пор находят свое применение в основном в сфере медиа и развлечений, где задача обеспечения надежности не актуальна.

Отдельные результаты работы получены при поддержке результата Российской Федерации (государственная поддержка научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых, Договор № 074-02-2018-330(2)), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-07-01215) и Стипендии Президента Российской Федерации (СП-5411.2021.5).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chua L.O.* // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. V. 18. № 5. P. 507.
2. *Qin Y.F., Bao H., Wang F. et al.* // Adv. Intell. Syst. Wiley. 2020. V. 2. № 11. P. 2000114.
3. *Amirsoleimani A., Alibart F., Yon V. et al.* // Adv. Intell. Syst. 2020. V. 2. P. 2000115.
4. *Xia Q., Yang J.J.* // Nature Mater. 2019. V. 18. № 4. P. 309.
5. *Zhang Y., Wang Z., Zhu J. et al.* // Appl. Phys. Rev. 2020. V. 7. P. 011308.
6. *Williams S.* // Faraday Discuss. 2019. V. 213. P. 579.
7. *Erokhin V.* // Bionanosci. 2020. V. 10. № 4. P. 834.
8. *Demin V.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A. et al.* // Crystallography Reports. 2016. V. 61. P. 992.
9. *Mikhaylov A., Pimashkin A., Pigareva Y. et al.* // Front. Neurosci. 2020. V. 14. P. 358.
10. *Serb A., Papandroulidakis G., Khiat A., Prodromakis T.* // 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2018. P. 1.
11. *Gerasimov Y., Zykov E., Prudnikov N. et al.* // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 143. P. 110549.
12. *Van de Burgt Y., Gkoupidenis P.* // MRS Bull. 2020. V. 45. P. 631.
13. *Battistoni S.* // Bionanosci. 2021. V. 11. P. 227.
14. *Guseinov D.V., Tetelbaum D.I., Mikhaylov A.N. et al.* // Int. J. Nanotechnol. 2017. V. 14. P. 604.
15. *Vasileiadis N., Karakolis P., Mandylas P. et al.* // IEEE Trans. Nanotechnol. 2021. V. 20. P. 356.
16. *Emelyanov A.V., Nikiruy K.E., Demin V.A. et al.* // Microelectron. Eng. 2019. V. 215. P. 110988.
17. *Ситников А.В., Бабкина И.В., Калинин Ю.Е. и др.* // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4. С. 570.
18. *Yao P., Wu H., Gao B. et al.* // Nature. 2020. V. 577. № 7792. P. 641.
19. *Ielmini D., Wong H.S.P.* // Nature Electronics. 2018. V. 1. № 6. P. 333.
20. *Bi J.S., Han Z.S., Zhang E.X. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013. V. 60. № 6. P. 4540.
21. *Mikhaylov A.N., Morozov O.A., Ovchinnikov P.E. et al.* // IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. Intell. 2018. V. 2. № 5. P. 371.
22. *Danilin S., Shchanikov S., Zuev A. et al.* // 2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). IEEE, 2019. P. 533.
23. *Zhou Y., Wu H., Gao B. et al.* // Adv. Funct. Mater. 2019. V. 29. № 30. P. 1900155.
24. *Yakopcic C., Alom M.Z., Taha T.M.* // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. V. May. P. 1696.
25. *Bayat F.M., Prezioso M., Chakrabarti B. et al.* // Nat. Commun. 2018. V. 9. № 1. P. 1.
26. *Shchanikov S., Zuev A., Bordanov I. et al.* // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 142. P. 110504.
27. *Yang C., Kim H., Adhikari S.P., Chua L.O.* // Sensors. 2016. V. 17. № 12. P. 16.
28. *Andreeva N.V., Ryndin E.A., Gerasimova M.I.* // Bionanosci. 2020. V. 10. P. 824.
29. *Surazhevsky I.A., Demin V.A., Ilyasov A.I. et al.* // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 146. P. 110890.
30. *Zhevnenko D., Meshchaninov F., Kozhevnikov V. et al.* // Chaos Solitons Fractals. 2020. V. 142. P. 110382.
31. *Demin V.A., Surazhevsky I.A., Emelyanov A.V. et al.* // J. Comput. Electron. 2020. V. 19. P. 565.
32. *Bengel C., Cüppers F., Payvand M. et al.* // Front. Neurosci. 2021. V. 15. P. 621.
33. *Stathopoulos S., Serb A., Khiat A. et al.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2019. V. 66. № 7. P. 2946.
34. *Danilin S.N., Shchanikov S.A., Bordanov I.A., Zuev A.D.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1333. № 6. P. 062026.
35. *Bouscayrol A.* // Control and Mechatronics. 2018. V. 1. P. 31.
36. *Schriber T.J.* Simulation Using GPSS. New York: Wiley, 1974. 533 p.



37. *Danilin S.N., Shchanikov S.A., Galushkin A.I.* // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. P. 1.
38. *Nagel L.W., Pederson D.O.* SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). 1973. № UCB/ERL M382.
39. *Biolek D., Biolkova V., Kolka Z.* // 2017 14th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD). 2017. P. 1.
40. *González-Cordero G., González M.B., Campabadal F. et al.* // 2020 XXXV Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS). 2020. P. 1.
41. *Walsh A., Carley R., Feely O., Ascoli A.* // 2013 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). 2013. P. 1.
42. *Абгарян К.К., Ревизников Д.Л., Бажанов Д.И.* // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4. С. 587.
43. *Абгарян К.К., Гаврилов Е.С.* // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14. № 2. С. 104.
44. *Firdos M., Hussain F., Imran M. et al.* // Mater. Res. Express. 2017. V. 4. № 10. P. 106301.
45. *Aldana S., Pérez E., Jiménez-Molinos F. et al.* // Semicond. Sci. Technol. 2020. V. 35. № 11. P. 115012.
46. *Guseinov D.V., Korolev D.S., Belov A.I. et al.* // Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 2019. V. 28. № 1. P. 15007.
47. *Ielmini D., Waser R.* Resistive Switching: From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016. 784 p.
48. *Pershin Y.V., Slipko V.A.* // EPL (Europhysics Lett. IOP Publishing, 2019. V. 125. № 2. P. 20002.
49. *Guseinov D.V., Matyushkin I.V., Chernyaev N.V. et al.* // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 144. P. 110699.
50. *Mikhaylov A.N., Guseinov D.V., Belov A.I. et al.* // Chaos Solitons Fractals. 2021. V. 144. P. 110723.
51. *Serb A., Bill J., Khiat A. et al.* // Nat. Commun. 2016. V. 7. № 1. P. 12611.
52. *Gupta I., Serb A., Khiat A. et al.* // Nat. Commun. 2016. V. 7. P. 1.
53. *Danilin S.N., Shchanikov S.A., Sakulin A.E., Bordanov I.A.* // Proceedings – 5th International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT-MIPT 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 205.
54. *Danilin S.N., Shchanikov S.A., Pantelev S.V.* // 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). IEEE, 2016. P. 34.
55. *Shchanikov S., Bordanov I., Zuev A. et al.* // Bionanoscience. 2021. V. 11. № 1. P. 84.