
Информационные системы и модели

УДК 004.383.8.032.26

Разработка методов и алгоритмов оптимизации отказоустойчивости и надежности искусственных нейронных сетей на основе мемристоров

Данилин С.Н., Борданов И.А., Зуев А.Д., Жиганов С.Н. Щаников С.А.

Статья посвящена решению проблем технической реализации нейроморфных вычислительных систем на базе мемристорных нейронных сетей (ИНСМ). Не решенной теорией ИНСМ задачей, является разработка методов и алгоритмов оптимизации отказоустойчивости и надежности ИНСМ. В работе дано описание разработанного авторами общего подхода к разработке методов и алгоритмов структурно-функциональной оптимизации ИНСМ по основным критериям в условиях дестабилизирующих информационных и физических воздействий. Для демонстрации работы общего подхода рассмотрен практический пример демонстрационного уровня сложности.

Ключевые слова: Нейроморфные вычислительные системы, нейронные сети, надежность, отказоустойчивость, точность, методы, алгоритмы, оптимизация.

Введение

Анализ ряда современных обзорно-аналитических работ [1-3], позволяет сделать вывод, что нейроморфные вычислительные системы, выполненные на основе мемристорных чипов (мемристорные нейронные сети – ИНСМ), являются наилучшими техническими средствами для реализации функций искусственного интеллекта в различных системах гражданского или военного назначения по функциональным возможностям и основным показателям (производительности, безопасности, точности, отказоустойчивости, надежности, энергозатратам, стоимости).

В работах [4-11] рассмотрены проблемы определения, обеспечения, оптимизации отказоустойчивости искусственных нейронных сетей (ИНС) различного типа и назначения, функционирующих в современных, в том числе, высоконадежных системах [12]. Анализ этих работ позволяет заключить, что классические методы определения и оптимизации надежности технических систем применимы очень ограниченно для искусственных нейронных сетей (ИНС) и ИНСМ, входящих в состав различных программно-технических комплексов. По этой причине активно развиваются теория функциональной надежности

информационных систем (ИС) [13], системной инженерии (СИ) [14] и имитационного моделирования (ИМ) [15].

Можно выделить следующие причины данной проблемы:

1. Классическая теория многокритериальной оптимизации работает только при формализуемости объектов ее применения [16].

2. Классическая теория надежности [13] не учитывает функциональные свойства любых информационных систем, в том числе содержащих ИНС, являющихся для них основными.

3. ИНС имеют ярко выраженный системный характер структуры, процессов функционирования, технологий их создания и эксплуатации, вероятностный характер решаемых ими задач, неформализуемость, нелинейность, многомерность. [17].

4. Теория надежности ИНС на базе мемристоров находится на начальном этапе развития [18-20].

5. Не разработаны общепринятые или стандартные количественные метрики для измерения отказоустойчивости (ОУ) ИНС и ИНСМ [5].

6. Более низкая надежность мемристоров, чипов на их основе по сравнению с другими

электронными элементами [18, 19]. Это явление вызвано несовершенством теории и технологий их проектирования, производства и эксплуатации.

Данная статья посвящена вопросу разработки общего подхода к определению и оптимизации отказоустойчивости и надежности ИНС и ИНСМ.

1. Общий подход к структурно-функциональной оптимизации ИНСМ

На базе работ коллективов, ведущих российских и зарубежных ученых и проведенных собственных исследований, авторы разработали и применили общий подход (ОП) к структурно-функциональной оптимизации ИНСМ (в том числе, всех их физических и информационных компонентов).

ОП основан на методологии СИ, общей теории оптимизации, общей теории ИНС, классической и современной теории надежности ИС, ИМ, концепции построения перспективных ИНСМ профессора А.И.Галушкина и включает в себя следующие основные положения и допущения:

– задачи в области оптимизации отказоустойчивости и надежности ИНСМ необходимо рассматривать и решать в соответствии с положениями СИ;

– на всех стадиях жизненного цикла ИНСМ представляют собой единые физиче-

ско-информационные системы, реализованные аппаратно-программными обучаемыми средствами;

– ИНС являются компонентами современных и перспективных ИС;

– ИНСМ плохо формализуемые или неформализуемые, нелинейные, динамические, многомерные, мультирежимные объекты, с вероятностным характером всех внутренних и внешних явлений и процессов, что ограничивает возможности применения к ним классических методов оптимизации;

– следует применять новый подход к анализу и синтезу (определению, обеспечению, оптимизации) надежности ИНСМ (и их компонентов) любой природы, сложности и назначения от точности через отказоустойчивость [21];

– основными инструментами решения задач надежности ИНСМ являются методы классической и современной теории надежности ИС, авторская системная технология, системный динамический критерий отказоустойчивости (fault tolerance measure - FTM) [7], адаптированные методы ИМ информационных процессов и систем [15], новые современные метрики надежности ИНСМ [18].

– перспективным направлением разработки технологий системной оптимизации отказоустойчивости и надежности ИНСМ является группа V-моделей.

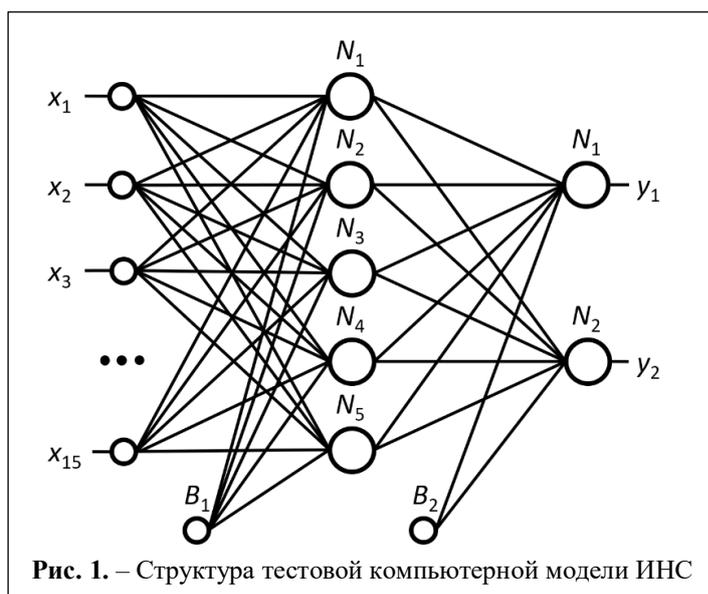


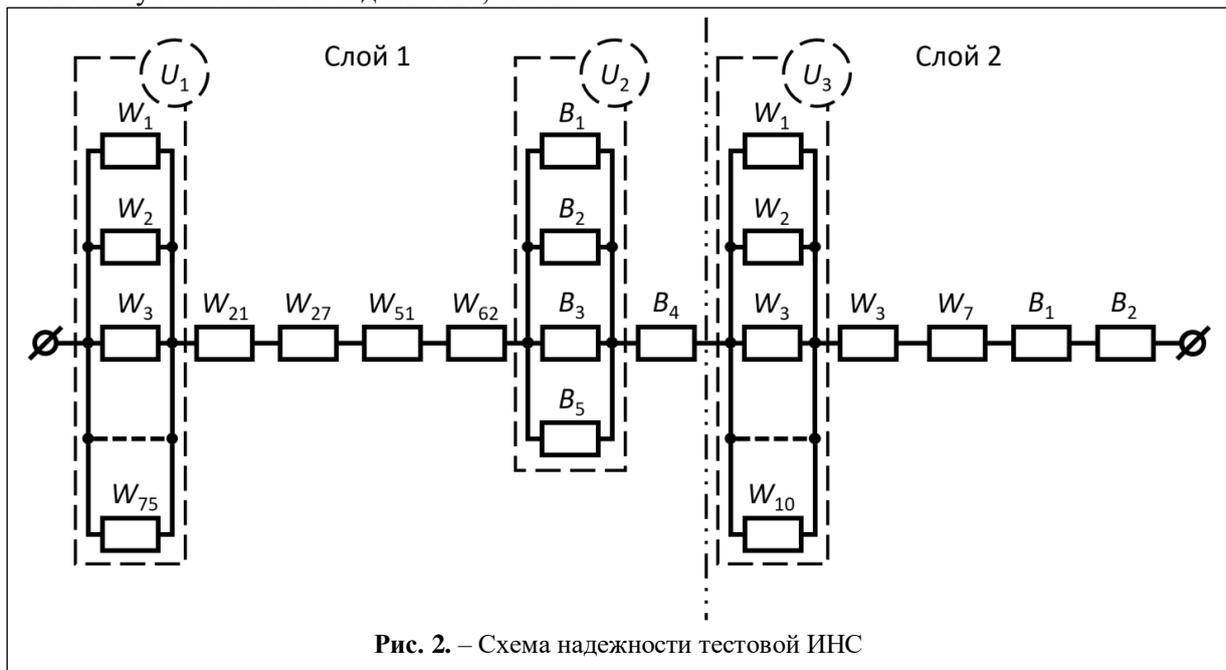
Рис. 1. – Структура тестовой компьютерной модели ИНС

2. Пример применения общего подхода

Для демонстрации работы общего подхода рассмотрим следующий пример. Создадим компьютерную модель ИНС и зададим для неё набор весовых коэффициентов и пороговых смещений, значения которых будем считать номинальными. Архитектура тестовой ИНС – двухслойный персептрон (рис. 1). По структуре ИНС имеет 15 входных нейронов, 5 в скрытом слое и 2 выходных нейрона, следовательно, скрытый слой состоит из 75 синапсов, а выходной – из 10.

Для того, чтобы перейти к расчету и оптимизации надежности необходимо для данной модели построить схему надежности. В статьях [7, 10] описана методика построения схем надежности через точность путем определения критерия отказоустойчивости. Данная методика реализована в виде программы для построения схем надежности [11]. Значение критерия отказоустойчивости для каждого компонента ИНС определим путем имитационного моделирования на компьютерной модели при заданном допуске на погрешность выходной информации не более 3%. Выполнив исследование влияния погрешностей отдельных синапсов и пороговых смещений нейронов на точность работы ИНС в пределах определённого допуска, построим схему надёжности (рис. 2).

По полученной схеме надёжности, можно



рассчитать показатели надежности для ИНС такие как вероятность безотказной работы $P(t)$, вероятность отказа $Q(t)$, среднюю наработку до отказа T_{cp} и др. в соответствии с действующими стандартами. В качестве примера рассчитаем вероятность безотказной работы (ВБР) P для всей ИНС. Для расчета ВБР ИНС необходимо рассчитать ВБР отдельных элементов по формуле (1).

$$P_{эл} = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

где $P_{эл}$ – ВБР элементов аппаратной базы реализации весовых коэффициентов и пороговых смещений (в данном случае мемристоров); λ – интенсивность отказов (1/ч). Для оптимизации ВБР ИНСМ зададим следующие параметры интенсивности отказов:

- $\lambda_0 = 0,00001(1/ч)$ – минимальное значение интенсивности отказов;
- $\Delta\lambda = 0,00001(1/ч)$ – шаг изменения интенсивности отказов в процессе моделирования;
- $\lambda_{max} = 0,00009(1/ч)$ – максимальное значение интенсивности отказов.

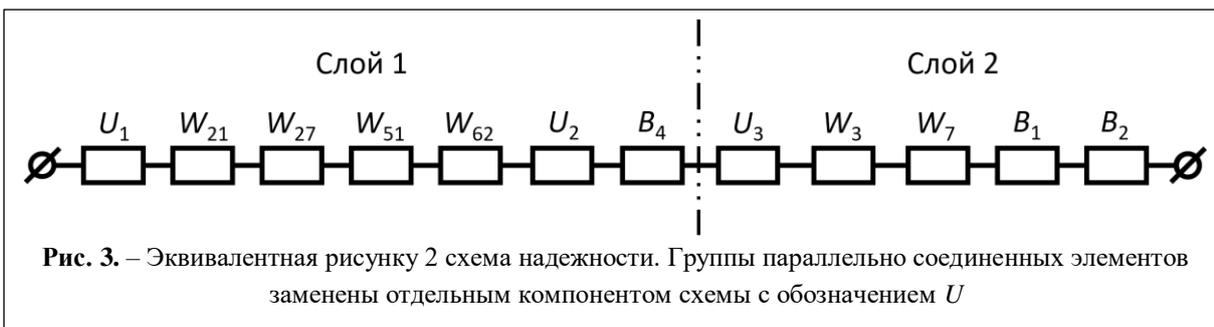
Зафиксируем время t в районе 1000 часов. Далее меняя значение λ от λ_0 до λ_{max} с шагом $\Delta\lambda$ будем вычислять значение ВБР ИНСМ для данной схемы надежности, предварительно представив её в следующем виде (рис. 3).

Для расчета надёжности групп параллельных элементов U_1, U_2, U_3 необходимо рассчитать надёжность каждого параллельного сегмента схемы в отдельности по формуле (2):

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)), \quad (2)$$

где n — это количество элементов параллельно соединенного сегмента; i – номер сегмента; $P_i(t)$ – ВБР отдельного элемента.

Общую ВБР для всей ИНС можно рассчитать по формуле (3).



$$P_{\text{ИНС}} = \prod_{i=1}^n (P_i(t)), \quad (3)$$

где n — это количество элементов последовательно соединенных элементов; i – номер сегмента; $P(t)$ – ВБР отдельного элемента или параллельного сегмента в целом.

В результате выполнения эксперимента по расчету $P_{\text{ИНС}}$ для каждого значения λ был получен график, который представлен на рис. 4.

Данные результаты (рис. 4) можно использовать двумя путями:

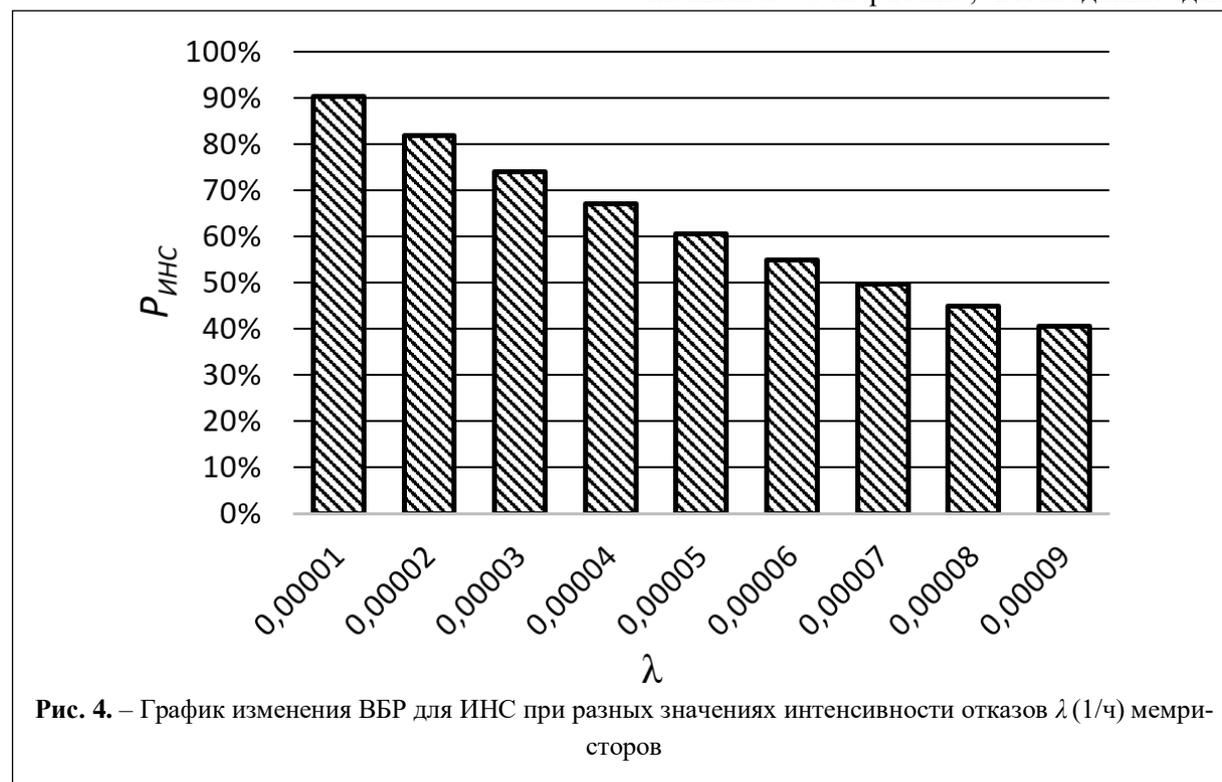
Задав допустимый уровень $P_{\text{ИНС}}$ можно назначить необходимый уровень интенсивности отказов мемристоров, используемых при аппаратной реализации ИНС

Зная интенсивность отказов мемристоров, оценить уровень ВБР ИНС и при его соответствии ТЗ предложить реализовать ИНС аппаратно с их применением.

Заключение

Разработанный авторами общий подход к структурно-функциональной оптимизации ИНСМ позволил разработать и применить:

- методы и алгоритмы оптимизации ОУ и надежности ИНСМ произвольной структуры по основным критериям;
- методы и алгоритмы оптимизации ОУ и надежности ИНСМ в условиях дестабилизирующих информационных и физических воздействий;
- новые модули авторского программного комплекса «МемриСим», необходимые для



решения задач структурно-функциональной оптимизации ИНСМ, в частности, производительности, отказоустойчивости, надежности; – оптимизацию выбора и применения программного обеспечения для реализации ИНСМ с требуемой надежностью;

Приведенный в данной статье пример применения общего подхода к оптимизации надежности показывает его перспективность. Применение на практике разработанного общего подхода, методов и алгоритмов позволяет эффективно решать задачи в сфере оптимизации надежности произвольных ИНСМ, как на уровне компьютерных моделей («цифровых двойников») [22], так и на уровне технических средств их реализации

Литература

1. Новые области применения искусственного интеллекта. // Экспресс-информация по зарубежной электронной технике. Выпуск 9 (6733) от 6 мая 2021 г. С.3-8.
2. Искусственный интеллект и нейроморфные вычисления. // Экспресс-информация по зарубежной электронной технике. Выпуск 9 (6733) от 6 мая 2021 г. С.10-15.
3. Amirsoleimani A, et al. In-Memory Vector-Matrix Multiplication in Monolithic Complementary Metal–Oxide–Semiconductor-Memristor Integrated Circuits: Design Choices, Challenges, and Perspectives // *Advanced Intelligent Systems*. 2020. P.1-23.
4. Schuman C.D. A Survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware [Электронный ресурс] // *Proceedings of CoRR journal*. URL: <https://arxiv.org/pdf/1705.06963.pdf> (Дата обращения: 02.09.2021)
5. Torres-Huitzil C., Girau B. Fault and error tolerance in neural networks: A review. // *IEEE Access*. 2017. V. 5. P. 17322-17341.
6. Потапов И.В. Модели, методы и задачи прикладной теории надежности нейрокомпьютерных систем. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск, 2010. 348 с.
7. Данилин С.Н., Щаников С.А., Борданов И.А., Зуев А.Д. Количественное определение отказоустойчивости искусственных нейронных сетей на базе мемристоров // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2020. № . С. 55-65.
8. Данилин С.Н., Борданов И.А., Пантелеев С.В., Щаников С.А., Жиганов С.Н. Сравнение методов аппроксимации функциональных зависимостей // *Методы и устройства передачи и обработки информации*. 2020. №22. С. 30-34
9. Кулик С. Д. Оценка эффективности технических систем с использованием нейронных сетей / С. Д. Кулик, К. И. Ткаченко // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2009. – № 9. – С. 47-60.
10. Данилин С.Н., Щаников С.А., Борданов И.А., Зуев А.Д. Разработка методов определения и обеспечения надежности искусственных нейронных сетей на базе мемристивных устройств // *Телекоммуникации*. 2021. № 4. С. 20-26.
11. Данилин С.Н., Щаников С.А., Борданов И.А. Программа автоматизированного построения схемы надёжности искусственной нейронной сети // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020619399*. Внесено в Реестр программ для ЭВМ 17.08.2020.
12. J. Schumann, Y. Liu (Eds.): *Appl. of Neural Networks in High Assur. Sys., SCI 268*, pp. 1–19. springerlink.com с Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010 *Application of Neural Networks in High Assurance Systems: A Survey* (Применение нейронных сетей в высоконадежных системах: обзор) Johann Schumann, Pramod Gupta, and Yan Liu
13. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза / И.Б. Шубинский. М.: «Журнал Надежность», 2016, 546 с.
14. Данилин С. Н., Щаников С. А., Борданов И. А., Зуев А.Д., Пантелеев С.В. Актуальные задачи теории и практики системной инженерии // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2020. №4. С. 42-55..
15. Борданов И.А., Щаников С.А. Перспектива применения имитационного моделирования при проектировании искусственных нейронных сетей на базе мемристоров // *Алгоритмы, методы и системы обработки данных*. 2019. № 2(40). С. 13-19.
16. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 256 с.
17. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. Москва: Горячая линия-Телеком, 2013. 496 с.
18. Meiran Zhao et al. Reliability of analog resistive switching memory for neuromorphic computing // *Applied Physics Reviews*. 2020. № 7.
19. *Handbook of Memristor Networks* / L. Chua, G. Sirakoulis, A. Adamatzky. Springer, 2019. 1357 p.
20. Kataeva I. et al. Towards the development of analog neuromorphic chip prototype with 2.4m integrated memristors // *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2019. P. 1-5.
21. Shchanikov, S., Bordanov, I., Zuev, A., Danilin, S., Korolev, D., Belov, A., & Mikhaylov, A. (2020). Fault Tolerance of Memristor-Based Perceptron Network for Neural Interface. *BioNanoScience*. doi:10.1007/s12668-020-00807-0.
22. ГОСТ Р 57700.37—2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. Москва. Российский институт стандартизации. 2021- 16 с.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-07-01215.

Поступила 05 марта 2021 г.

The article is devoted to solving the problems of technical implementation of neuromorphic computing systems based on memristor neural networks (ANNMs). The task not solved by the ANNMs theory is the development of methods and algorithms for optimizing the fault tolerance and reliability of the INSM. The paper gives a description of the general approach developed by the authors to the development of methods and algorithms for the structural and functional optimization of ANNMs according to the main criteria under destabilizing informational and physical influences. To demonstrate the operation of the general approach, a practical example of a demonstration level of complexity is considered.

Key words: Neuromorphic computing systems, neural networks, reliability, fault tolerance, accuracy, methods, algorithms, optimization.

Данилин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры программно-инженерии Муромского института (филиала) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: dsn-55@mail.ru.

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.

Борданов Илья Алексеевич – инженер кафедры информационных систем Муромского института (филиала) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: bordanov2011@yandex.ru.

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.

Зув Антон Дмитриевич – инженер кафедры информационных систем Муромского института (филиала) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: ad-nemo@mail.ru.

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.

Жиганов Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: s_zh_72@mail.ru.

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.

Щаников Сергей Андреевич – кандидат технических наук, декан факультета информационных технологий Муромского института (филиала) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: seach@inbox.ru.

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.