Выходит с 1999 г. ISSN 1999-8554

НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ
разработка применение

Том 23, номер 1, 2021

Международный научно-технический журнал, посвященный актуальным вопросам разработки и применения интеллектуальных информационных систем и технологий, приложениям теории искусственных нейронных сетей и нейрокомпьютинга, нейронауке и интеллекту в целом.
Включен в Перечень ВАК

Главный редактор член-корреспондент РАН, профессор
Вадим Анатольевич Шахнов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Заместители главного редактора

Алакоз Геннадий Михайлович – д.т.н., проф., ФГПУ НИИСУ
Власов Андрей Игоревич – к.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Терехов Валерий Игоревич – к.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Абламейко Сергей Владимирович – д.т.н., проф., Академик НАН Беларуси
Алексеев Андрей Юрьевич – д.филос. н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова
Владимирский Борис Михайлович – д.б.н., проф., Южный федеральный университет
Басараб Михаил Алексеевич – д.ф.-м.н., проф., зав. каф. МГТУ им. Н.Э. Баумана
Борисов Вадим Владимирович – д.т.н., проф., Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске
Васенин Валерий Александрович – д.т.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова
Гасанов Эльяр Эльдарович – д.т.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова
Горбаченко Владимир Иванович – д.т.н., проф., Пензенский государственный университет
Дунин-Барковский Виталий Львович – д.б.н., проф., НИИСИ РАН
Каляев Игорь Анатольевич – академик РАН, д.т.н., проф., Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону)
Карпенко Анатолий Павлович – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Корнеев Виктор Владимирович – академик Академии криптографии РФ, д.т.н., проф., НИИ «Квант»
Кулик Сергей Дмитриевич – д.т.н., проф., НИЯУ МИФИ
Куравский Лев Семенович – д.т.н., проф., Московский государственный психолого-педагогический университет
Лосева Елена Владимировна – академик МАН, д.б.н., проф., Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (Москва)
Махортов Сергей Дмитриевич – д.т.н., проф., Воронежский государственный университет
Милов Владимир Ростиславович – д.т.н., проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Петрунин Юрий Юрьевич – д.филос.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова
Рожнов Алексей Владимирович – к.т.н., ИПУ РАН
Степанян Иван Викторович – д.б.н., проф., Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва), МГК им. П.И. Чайковского, НИИМТ РАН им. Н.Ф. Измерова (Москва)
Трофимов Александр Геннадьевич – к.т.н., НИЯУ МИФИ
Умрюхин Евгений Алексеевич – чл.-корр. РАН, д.б.н., проф., НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина (Москва)
Ясницкий Леонид Нахимович – д.т.н., проф., Пермский государственный национальный исследовательский университет
Дун Гэ (Dong Ge) – Ph.D., Университет Цинхуа (Пекин, КНР)
Либкин Леонид М. – Ph.D., проф., Эдинбургский университет (Великобритания)
Нгуен Куанг Тхыонг – д.т.н. (СРВ), проф., каф. «Управление в международном бизнесе и индустрии туризма» ГУУ
Фэн Лэй (Feng Ley) – Ph.D., проф., Харбинский политехнический институт
Хорошенко Кирилл Вячеславович – Ph.D., Школа инженерии, дизайна и технологий Бредфордского университета (Великобритания)
Zenkin Nikolay – Ph.D. (Biol.), проф., Ньюкаслский университет (Великобритания)

Научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Содержание

Главному редактору журнала «Нейрокомпьютеры: разработка, применение» Вадиму Анатольевичу Шахнову 80 лет! 5

Научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» МГТУ им. Н.Э. Баумана 8

НЕЙРОКОМПЬЮТИНГ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Иерархическая пирамидальная субдискретизация в глубоких сверточных сетях для распознавания визуальных образов
Аверьянихин А.Е., Власов А.И., Евдокимова Е.В. 17

Распознавание рукописных символов на сенсорной матрице с использованием нейронной сети
Аминев Д.А., Данилевич В.А., Дёмин А.А., Самман А. 32

ТЕОРИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ

Использование рекуррентных нейронных сетей для вероятностной классификации архитектуры процессора исполняемых файлов
Гладких А.А., Комахин М.О., Симаньков А.В., Узеньков Д.А. 43

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ И САМООРГАНИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Направления интеллектуализации управления движением мобильного робота
Лапшинов С.А., Шахнов В.А., Юдин А.В. 50

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИХ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Нейросетевая система обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей
Власов А.И., Захаров Е.Р., Захарова В.О. 63

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Нейроаналитическая модель сопоставительных исследований клинической и кафистной активных ортостатических проб
Микита Г.И. 81

Established in 1999

ISSN 1999-8554

Neurocomputers / Neirokompiutery

Vol. 23, No. 1, 2021

Scientific and technical journal devoted to development and applications of artificial neural networks and neurocomputers

Editor-in-Chief
Dr.Sc. (Eng.), Prof.
Vadim A. Shakhnov

EDITORIAL BOARD

Deputy of Editor-in-Chief

Alakoz Gennady Mikhaylovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., FGPU NIISU
Vlasov Andrey Igorevich – Ph.D. (Eng.), MSTU of N.E. Bauman
Terekhov Valery Igorevich – Ph.D.(Eng.), MSTU of N.E. Bauman

Ablameyko Sergey Vladimirovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Academician of NAN of Belarus
Alekseev Andrey Yuryevich – Dr.Sc.(Phylos), Prof., Lomonosov Moscow State University
Vladimirsky Boris Mikhaylovich – Dr.Sc. (Biol.), Prof., Southern Federal University
Basarab Mikhail Alekseyevich – Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof., Head of Department of Bauman Moscow State Technological University
Borisov Vadim Vladimirovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Branch "National research university "MEI" in Smolensk
Vasenin Valery Aleksandrovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Lomonosov Moscow State University
Gasanov Elyar Eldarovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Lomonosov Moscow State University
Gorbachenko Vladimir Ivanovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Penza State University
Dunin-Barkovsky Vitaly Lvovich – Dr.Sc. (Biol.), Prof., SRISA of RAS
Kalyaev Igor Anatolyevich – Academician of RAS, Dr.Sc.(Eng.), Prof., Southern Federal University (Rostov-on-Don)
Karpenko Anatoly Pavlovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Bauman Moscow State Technological University
Korneev Victor Vladimirovich – Academician of Academy of cryptography of the RF, Dr.Sc. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute "Kvant"
Kulik Sergey Dmitrievich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., NIYaU MEPhI
Kuravsky Lev Semyonovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Moscow State Psychology and Pedagogical University
Loseva Elena Vladimirovna – Academician of MAS, Dr.Sc. (Biol.), Prof., Institute of higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS (Moscow)
Makhortov Sergey Dmitrievich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Voronezh State University
Milov Vladimir Rostislavovich – Dr.Sc. (Eng.), R.E. Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University
Petrunin Yury Yuryevich – Dr.Sc. (Phylos.), Prof., Lomonosov Moscow State University
Rozhnov Alexey Vladimirovich – Ph.D. (Eng.), YIP RAHN
Stepanyan Ivan Viktorovich – Dr.Sc. (Biol.), Prof., Institute of a mashirovedeniye of A.A. Blagonravov RAS (Moscow), MSC of P.I. Tchaikovsky, NIIMT of RAS of N.F. Izmerov (Moscow)
Trofimov Alexander Gennadyevich – Ph.D. (Eng.), NIYaU MEPhI
Umryukhin Evgeny Alekseyevich – Member Corresponding of RAS, Dr.Sc. (Biol.), Prof., P.K. Anokhin Scientific Research Institute of Normal Physiology (Moscow)
Yasnitsky Leonid Nakhimovich – Dr.Sc. (Eng.), Prof., Perm State National Research University
Dong Ge – Ph.D., National Tsing Hua University (Beijing, People's Republic of China)
Libkin Leonid M. – Ph.D., Prof., University of Edinburgh (Great Britain)
Nguyen Kuangg Tkhyong – Dr.Sc. (Eng.) (SRV), Prof., Department "Management in the international business and industry of tourism" GUU
Feng Ley – Ph.D., Prof., Harbin Technical Institute
Horoshenko Kirill Vyacheslavovich – Ph.D., School of Engineering, Design and Technologies of the Bredford University (Great Britain)
Zenkin Nikolay – Ph.D. (Biol.), Prof., Newcastle University (Great Britain)

Contents

NEUROCOMPUTING IN SIGNAL AND IMAGE PROCESSING SYSTEMS

Hierarchical pyramidal subsampling in deep convolutional networks for visual pattern recognition
Averyanikhin A.E., Vlasov A.I., Evdokimova E.V. 30

Recognition of handwritten characters on the sensor matrix using a neural network
Aminev D.A., Danilevich V.A., Demin A.A., Samman A. 41

THEORY OF NEURAL NETWORKS

Using recurrent neural networks for probabilistic classification of the processor architecture of executable files
Gladkikh A.A., Komakhin M.O., Simankov A.V., Uzenkov D.A. 48

METHODS AND MODELS OF INTELLECTUALIZATION AND SELF-ORGANIZATION OF COMPLEX SYSTEMS

Approaches to motion control intellectualization of a mobile robot
Lapshinov S.A., Shakhnov V.A., Yudin A.V. 61

DESIGN OF INTELLIGENT SYSTEMS AND THEIR SOFTWARE IMPLEMENTATION

Neural network system for detecting and neutralizing remote unauthorized interference into the components of the Internet of Things
Vlasov A.I., Zakharov E.R., Zakharova V.O. 79

NEUROPHYSIOLOGICAL MODELS OF NEURAL NETWORKS

Neuroanalytical model for comparative studies of clinical and kaphist active orthostatic samples
Mikita G.I. 92

Все статьи, представленные в данном выпуске журнала, соответствуют номенклатуре специальностей научных работников (Приказ Минобрнауки РФ от 23.10.2017 № 1027).

Учредитель ООО «Издательство «Радиотехника». Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-76556.
Сдано в набор 29.12.2020. Подписано в печать 20.01.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Печ.л. 11,75. Тираж 700 экз. Изд. № 55.
ООО «Издательство «Радиотехника»: 107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6. Тел./факс: +7(495)625-92-41.
107031, Russian Federation, Moscow, Kuznetsky Most, 20/6, tel./fax +7(495)625-92-41.
Http://www.radiotec.ru
E-mail: info@radiotec.ru

Дизайн и допечатная подготовка ООО «САЙНС-ПРЕСС».
Отпечатано с предоставленных готовых файлов в полиграфическом центре ФГУП Издательство «Известия».
127254, Москва, ул. Добролюбова, д. 6. Тел.: +7(495) 650-38-80.
Заказ №

ISSN 1999-8554

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2021 г.

Незаконное тиражирование и перевод печатного материала, включенного в журнал, в электронном и любом другом виде запрещено и карается административной и уголовной ответственностью по закону РФ «Об авторском праве и смежных правах»

j19998554-202101-01

Главному редактору журнала «Нейрокомпьютеры: разработка, применение» Вадиму Анатольевичу Шахнову 80 лет!

Вадим Анатольевич Шахнов родился 29 января 1941 г. в Москве. Когда началась война, его семья переехала в г. Фрунзе. После окончания средней школы Вадим Анатольевич работал фрезеровщиком на инструментальном заводе им. В.И. Ленина. В 1959 г., сдав все экзамены на «отлично», он поступил во Фрунзенский политехнический институт (г. Фрунзе). В вузовской учебе тогда было нововведение: учились вечером, а днем работали на производстве, осваивая будущие специальности [1]. После окончания второго курса Вадим Анатольевич приезжает в Москву и становится студентом кафедры «Вычислительные машины» (П6) МВТУ им. Н.Э. Баумана, руководимой профессором Б.В. Анисимовым [2].

Во время учебы Вадим Анатольевич активно занимался спортом, участвовал в межинститутской спартакиаде по легкой атлетике, увлекался альпинизмом (покорил пик «Электра» на Памире, 4050 м). Принимал участие в работе студенческого театра, даже участвовал в съемках фильма «Война и мир».

В 1966 г., окончив МВТУ им. Н.Э. Баумана и получив диплом инженера по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства», В.А. Шахнов приступил к работе в Зеленоградском НПО «Научный центр», где начал заниматься исследованиями быстропротекающих процессов в тонких магнитных пленках и проблемами разработки быстродействующих запоминающих устройств ЭВМ. В этом же году он поступил в заочную аспирантуру Московского института электронной техники (МИЭТ) и в 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию под руководством докт. техн. наук, профессора Л.Н. Преснухина.

С 1970 г. В.А. Шахнов участвовал в разработках мини- и микро-ЭВМ, микропроцессоров и микропроцессорных средств вычислительной техники в Специализированном вычислительном центре (СВЦ), руководимом докт. техн. наук, профессором Д.И. Юдицким. В это время в СВЦ была создана первая в стране мини-ЭВМ, разработаны первые в мире 16-разрядные КМОП – микропроцессоры с оригинальной архитектурой и микро-ЭВМ на их основе. Итоги исследований этих лет нашли отражение в книге «Конструирование ЭВМ и систем», которая была подготовлена совместно с Л.Н. Преснухиным и много лет была настольной книгой инженеров-разработчиков вычислительных систем.

С 1970 г. Вадим Анатольевич занимался преподавательской работой, работая по совместительству доцентом на кафедре «Электронно-вычислительные машины» Московского института электронной техники.

С 1976 г. В.А. Шахнов руководил работой отраслевого отдела микропроцессоров и микропроцессорных средств вычислительной техники Минэлектронпрома СССР, координируя работы всех предприятий отрасли в этом важнейшем направлении развития науки и технологии. Основные научные исследования в то время были связаны с созданием и развитием функционально и технологически сложных больших интегральных схем и средств вычислительной техники на их основе, внедрением этих схем и средств в серийное производство. На основе анализа уровня развития отечественных предприятий были сформулированы комплексные межотраслевые программы создания и применения микропроцессоров и микро-ЭВМ. В их основу были заложены системные принципы и экономически целесообразные подходы к созданию микропроцессоров и микро-ЭВМ нового поколения, что нашло отражение в первых отечественных стандартах, монографиях и учебных пособиях [3].

В 1983 г. В.А. Шахнову была присуждена премия Совета Министров СССР в области науки и техники [4], а в 1985 г. – Государственная премия СССР в области науки и техники за разработку и внедрение специальной техники на базе микропроцессоров [5].

В 1989 г. за успешную работу по внедрению микропроцессоров в космическую аппаратуру Федерация космонавтики СССР наградила В.А. Шахнова медалью им. академика М.В. Келдыша.

В 1991 г. Вадим Анатольевич был приглашен в МГТУ им. Н.Э. Баумана, где возглавил кафедру «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» (ИУ4) [6]. В этом же году он защитил докторскую диссертацию на тему «Системное конструирование ЭВМ на больших интегральных схемах».

В области создания новых видов электронной аппаратуры и методов их проектирования под руководством В.А. Шахнова была разработана ресурсосберегающая методология проектирования несущих конструкций электронной аппаратуры, работающей в условиях квазистатического и динамического нагружения. На кафедре были проведены исследования и разработка активных методов управления волновыми полями.

Вадим Анатольевич уделял огромное внимание подготовке молодых научных кадров, научно-исследовательской работе по прорывным новым направлениям науки и техники [7, 8]. В 1996 г. В.А. Шахнову за новаторскую деятельность в области образования и подготовки научных кадров Международным обществом инженерной педагогики присвоено почетное звание «Европейский инженер-педагог».

В 1999 г. В.А. Шахнову за вклад в развитие электронной техники был вручен Памятный знак «90 лет со дня рождения Александра Ивановича Шокина» Российским Агентством по системам управления.

Дальнейшее развитие исследований было сконцентрировано на создании новых видов высокоточной электромагнитной измерительной аппаратуры, за разработку которой В.А. Шахнову в 2001 г. присвоено звание лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники [9].

Общие принципы разработки конструкции и технологии производства современных видов электронной аппаратуры легли в основу изданного в 2002 г. и переизданного в 2005 г. базового учебника для вузов «Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры». В 2009 г. В.А. Шахнов принял активное участие в создании научно-практического и методического инновационного комплекса персонифицированной профессиональной подготовки высококвалифицированных специалистов в области информационно-телекоммуникационных технологий для образовательных учреждений высшего профессионального образования, за разработку которого коллективу ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана присуждена премия Правительства РФ в области образования 2009 г. [10].

Возглавляемая В.А. Шахновым научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» отмечена грантами Президента РФ в 2006, 2008, 2010, 2012 и 2014 годах.

В 2004 г. на кафедре организована первая в университете лаборатория по изучению нанотехнологий. Разработан учебно-методический комплекс подготовки специалистов «Библиотека Наноинженерии» в 17-ти томах. Вадим Анатольевич стоял у истоков издания периодического журнала «Наноинженерия», проведения ежегодной школы-семинара «Наноинженерия». В 2009 г. при кафедре создан Научно-образовательный центр «Нанотехнологические системы и наноэлектроника», результаты разработок которого в области МЭМС сенсоров нашли широкое применение в специальной и космической технике.

Полученные В.А. Шахновым и сотрудниками кафедры результаты исследований неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и симпозиумах. При непосредственном участии Вадима Анатольевича ежегодно, начиная с 2000 г., проводится международная молодежная научно-техническая конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы».

На базе этих результатов под научным руководством В.А. Шахнова подготовлены и защищены 16 кандидатских и 2 докторских диссертаций сотрудниками кафедры, докторантами и аспирантами. В.А. Шахнов – автор более 250 научных и учебно-методических работ (в том числе 16 учебников, учебных пособий и 7 монографий) и 12 изобретений.

Вадим Анатольевич Шахнов является главным редактором журнала «Нейрокомпьютеры: разработка, применение», членом редакционных коллегий многих научно-технических журналов и трех диссертационных советов.

Его заслуги были отмечены рядом государственных наград, в том числе медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени (2005) [11] и медалями «Ветеран труда» (1987), «В память 800-летия Москвы» (1997). В 2001 г. ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» [12]. 29 мая 2008 г. Вадим Анатольевич Шахнов был избран членом-корреспондентом РАН [13]. С 2010 г. он является ученым секретарем Российского фонда фундаментальных исследований [14].

В 2012 г. В.А. Шахнов награжден медалью ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий» [15]. Награждение происходило в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже. Медаль вручала генеральный директор ЮНЕСКО Ирина Бокова.

В 2016 г. за заслуги в развитии науки и образования, в подготовке квалифицированных специалистов и за многолетнюю плодотворную работу Вадим Анатольевич награжден орденом Дружбы.

Поздравляем Вадима Анатольевича Шахнова с юбилеем!
Желаем ему крепкого здоровья, активного долголетия и творческих успехов в работе на благо России!

Список источников

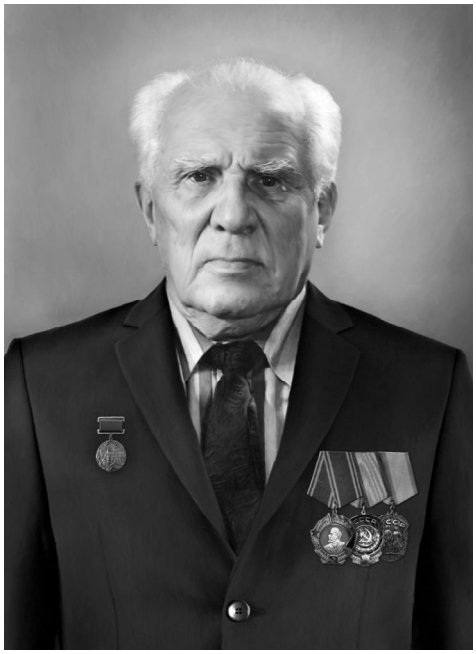
1. Наш отчий дом. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. С. 278.
2. *Медведь Н.Т.* Бауманцы. М.: Рекламно-полиграфический центр. 1998. С. 76.
3. Наука и Образование: научно-техническое издание: 29 января 2016 год Шахнов В.А., член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э.Баумана [Электронный ресурс] / URL: technomag.edu.ru (дата обращения: 6 марта 2016).
4. Постановление Совета Министров СССР от 16 апреля 1983 г.
5. Постановление Центрального комитета КПСС и Совета Министров СССР от 2 ноября 1985 г. (№ уд. 17734).
6. Кафедра ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана [Электронный ресурс] / URL: iu4.ru.
7. Указ Президента Российской Федерации от 20 июня 1995 г.
8. Указ Президента Российской Федерации от 6 октября 2000 г. № 1730.
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 марта 2001 г.
10. Распоряжение Правительства России от 28 августа 2009 г. № 1246-р.
11. Владимир Путин наградил ректора и 27 преподавателей МГТУ // Студенческая правда (дата обращения: 10 февраля 2011; архивировано 6 октября 2011).
12. Указ Президента РФ от 19.07.2001 № 894 «О награждении государственными наградами Российской Федерации» (дата обращения: 10 февраля 2011).
13. Члены-корреспонденты РАН (дата обращения: 11 февраля 2011; архивировано 22 декабря 2010).
14. Кто есть кто в РФФИ (дата обращения: 10 февраля 2011; архивировано 18 января 2011).
15. В.А. Шахнов награжден медалью UNESCO «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий» (дата обращения: 5 декабря 2012).

Основные работы В.А. Шахнова в области конструкторско-технологической информатики и наноинформатики

1. Библиотека Наноинженерии: Учеб. пособие в 17-ти томах / Под ред. *В.А. Шахнова*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011.
2. *Парфенов Е.М., Костиков В.Г., Шахнов В.А.* Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование. М.: 2009.
3. *Парфенов Е.М., Костиков В.Г., Шахнов В.А.* Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры. М.: 2008.
4. *Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В.* и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств / Под общ. ред. *В.А. Шахнова*. Сер. «Информатика в техническом университете». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. *Шахнов В.А., Власов А.И., Кузнецов А.С., Поляков Ю.А.* Нейрокомпьютеры: архитектура и схемотехника. М.: Машиностроение. 2000.
6. *Березин О.К., Костиков В.Г., Шахнов В.А.* Справочник: Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь. 2000.
7. Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных схем. Справочник / Под ред. *В.А. Шахнова*. В 2-х томах. М.: Радио и связь. 1998.
8. Комплекты интегральных микросхем / Под ред. *В.А. Шахнова*. М.: Радио и связь. 1987.
9. *Преснухин А.Н., Шахнов В.А.* Конструирование электронно-вычислительных машин и систем. М.: Высшая школа. 1986.
10. *Шахнов В.А., Виноградов Б.Н.* Отечественные микро-ЭВМ. М.: Машиностроение. 1983.

j19998554-202101-02

Научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» МГТУ им. Н.Э. Баумана



Основатель научной школы
Алексей Николаевич Малов,

Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Лидер научной школы
Вадим Анатольевич Шахнов,

член-корреспондент РАН,
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор,
лауреат Государственной премии СССР,
лауреат премии Совета Министров СССР,
лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники,
лауреат премии Правительства РФ
в области образования

Основные направления научной школы:

- конструкторско-технологическая информатика;
- конструкторско-технологическое проектирование электронных средств;
- наноинженерия и нейроинформатика;
- цифровая трансформация радиоэлектронной промышленности;
- новые методы передачи знаний.

Основной состав научной школы:

Адамова Арина Александровна – к.т.н., доцент;
Артемьев Борис Викторович – д.т.н., профессор;
Верстов Владимир Александрович – к.т.н., доцент;
Власов Андрей Игоревич – к.т.н., доцент, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники для молодых ученых, почетный работник сферы образования РФ;
Демин Алексей Анатольевич – к.т.н., доцент;
Дронов Николай Николаевич – заведующий лабораториями;
Гладких Алексей Алексеевич – к.т.н., доцент;
Глушко Андрей Александрович – к.т.н., доцент;
Жалнин Владимир Петрович – к.т.н., доцент;
Журавлева Людмила Васильевна – к.т.н., доцент, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники;
Костиков Владимир Григорьевич – д.т.н., профессор;
Курносенко Алексей Евгеньевич – доцент;
Лавров Алексей Васильевич – к.т.н., доцент;
Макарчук Владимир Васильевич – к.т.н., доцент;
Резчикова Елена Викентьевна – к.т.н., доцент, чл.-корр. аэрокосмической академии;
Родионов Илья Анатольевич – к.т.н., доцент, директор научно-образовательного центра «Функциональные микро/наносистемы», лауреат премии Правительства Москвы молодым ученым;
Семенцов Станислав Григорьевич – д.т.н.;
Соловьев Владимир Анатольевич – доцент, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники для молодых ученых.
Всего 30 человек.

Публикации и защиты

Членами научной школы по направлению деятельности опубликовано более 1500 научных работ, защищено 2 докторских диссертации, свыше 20 кандидатских диссертаций.

Работа с молодежью

Выпуск студентов по направлению – свыше 100 человек ежегодно, из них магистров – более 30 человек. Студенты, реализующие исследовательские работы по тематике научной школы, неоднократно становились победителями различных всероссийских и международных олимпиад и выставок: Д.В. Козлов – серебряная медаль XV международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед–2012» за проект «Термомеханические актюаторы для систем микроперемещений»; Д.В. Якимец – диплом I степени НТТМ за проект «Электрохромные покрытия» (2011); М. Чернов – победитель финала Международной олимпиады в сфере информационных технологий «IT Планета» в конкурсе «Программирование Oracle СУБД Olympic» (2010); А.С. Смолина – победитель конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых V Всероссийского интеллектуального форума – олимпиады по нанотехнологиям «Нанотехнологии – прорыв в будущее» (2010); К. Коновалов – победитель Международной олимпиады «ИТ-Планета», номинация «Цифровое творчество» (2011); А.С. Шепель, О. Кирбабин – победители 1-й Всероссийской олимпиады по СУБД Oracle в командном зачете (2007); Р.В. Громов – победитель Всероссийской олимпиады по технологии приборостроения (СПб) в личном зачете (2006).

Сотрудничество

Кафедра активно сотрудничает с ведущими предприятиями радиотехнической отрасли и институтами РАН: Курчатовским институтом (Москва), НИИСИ РАН (Москва), МНТПО «Спектр» (Москва), РНИИ КП (Москва), «СОВ-ТЕСТ» (г. Курск), «JS Nanotech» (г. Гусев, Калининградская обл.), NT-MDT (г. Зеленоград), Концерном «Наноиндустрия» (Москва) и другими отечественными и зарубежными научными центрами.

Научное направление «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» активно развивается в МГТУ им. Н.Э. Баумана усилиями сотрудников кафедры «Проектирование и производство электронной аппаратуры» (ИУ4), которая была образована в 1938 г. на факультете «Приборостроение» под названием «Технология точного приборостроения» (П8). Это междисциплинарное направление, в котором рассматриваются вопросы, связанные с конструированием современных электронных систем, технологией их производства, компьютерным сопровождением жизненного цикла изделий.

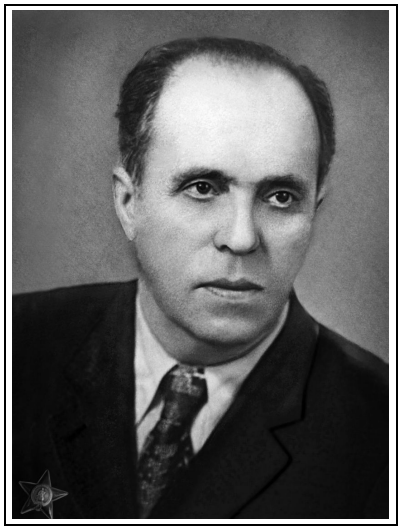
Возглавляемая в настоящее время членом-корреспондентом РАН, профессором, доктором технических наук В.А. Шахновым научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» прошла долгий путь становления – от организации прецизионного производства элементной базы механических вычислителей в начале 1940-х годов, создания технологий элекровакуумной и полупроводниковой электроники в 1950–70-х годах, разработки систем автоматизации и компьютеризации проектирования и производства радиоэлектронного и электронно-вычислительного оборудования в 1980–90-х годах до внедрения достижений наноинженерии и цифровой трансформации промышленности в наши дни.

Предметом исследований научной школы являются методы и средства цифрового управления производственными процессами и проектированием в радиопромышленности. Такого рода решения востребованы в части информационных управляющих систем, систем контроля производства (контроль качества), проактивного мониторинга оборудования (предиктивная аналитика), автоматизации проектирования и производства, внедрения технологий цифровых двойников, перехода на бесчертежное проектирование. Все это требует эффективных алгоритмов обработки больших данных, внедрения синхронных технологий обработки документации в распределенных системах, эффективных средств аналитики и прогноза.

При решении данных задач активно используются элементы искусственного интеллекта. Развитие современного производства и проектирования невозможно без всеобъемлющего управления цифровыми данными, внедрения машинного обучения, smart-технологий и элементов концепции «Индустрия 4.0». Уже в недалеком будущем smart-системы будут оказывать определяющее влияние на развитие предприятий и даже целых отраслей.

Можно считать, что научная школа в области точного приборостроения зародилась в 1930 г., когда на механическом факультете для специальности «Точная механика» профессор **Абрам Борисович Яхин** (1901–1957) начал читать курс, который назывался «Технология приборостроения».

В 1938 г. на приборостроительном факультете училища была образована кафедра «Технология точного приборостроения», которую возглавил профессор А.Б. Яхин. В то время кафедра не являлась выпускающей и проводила общетехнологическую подготовку среди студентов факультета. Коллектив кафедры стоял у истоков развития нового направления науки и техники, связанного с глубокой проработкой вопросов точности, надежности и качества в точном приборостроении и радиоэлектронике. Научные работы того времени были направлены на создание прецизионных технологических процессов производства, сборки, контроля элементов радиоэлектронных систем.



Абрам Борисович Яхин

В 1941 г. А.Б. Яхин эвакуировался в г. Ижевск, где совмещал педагогическую деятельность с работой по производству точных приборов для оборонной техники на заводе 74 Наркомата вооружений. В 1943 г. он возвратился в Москву и продолжил работу в качестве заведующего кафедрой «Технология точного приборостроения» (П8, тогда кафедра входила в состав Артиллерийско-зенитного факультета (АЗ)) вплоть до 1957 г. В трудный для страны и высшего образования период проявился незаурядный организаторский талант профессора А.Б. Яхина, объединившего вокруг себя талантливых ученых, инженеров, педагогов.

В кратчайшие сроки коллектив кафедры, возглавляемой профессором А.Б. Яхиным, сумел организовать подготовку высоко-

квалифицированных кадров для радиотехнических и приборостроительных предприятий и организаций. В начале 1950-х годов с началом бурного развития электроники и вычислительной техники А.Б. Яхин выступил инициатором реформирования учебных планов и программ для новых специальностей в системе подготовки кадров МВТУ им. Н.Э. Баумана. Доктор технических наук, профессор Абрам Борисович Яхин – основоположник научно-производственной дисциплины «Технология приборостроения». Он посвятил этой науке всю свою жизнь, передав последующим поколениям преподавателей, специалистов и ученых свои знания и опыт, опубликовав целый ряд фундаментальных работ в области точности и технологии приборостроения. Он был награжден орденами Красной Звезды, Трудового Красного Знамени и множеством медалей.

В 1958 г. кафедру возглавил профессор **Алексей Николаевич Малов** (1906–1977). С его приходом значительно расширились научные исследования в области конструирования и технологии приборов и радиоэлектронной аппаратуры, были проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию новых методов расчета конструкций аппаратуры, отработке и внедрению новых технологических процессов. Впервые на междисциплинарной основе был разработан учебный план подготовки инженера-конструктора и инженера-технолога электронно-вычислительной и радиоэлектронной аппаратуры.

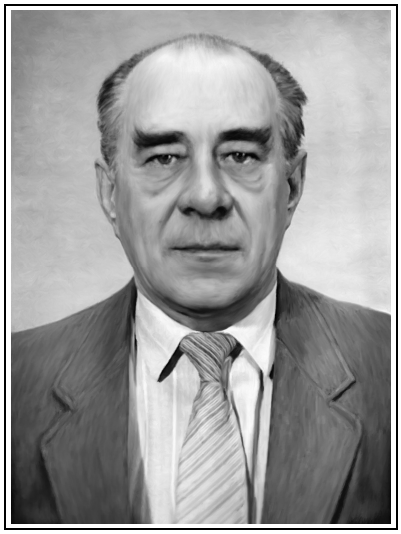
С начала 1960-х годов на кафедре получили развитие научно-исследовательские работы, связанные с вопросами технологического обеспечения качества прецизионных приборов. В этот период сотрудники кафедры вели большую работу по подготовке учебников, учебных пособий, монографий и справочной литературы. В 1960-х годах на кафедре впервые в практике вузов была проведена большая работа по созданию новых специальных технологических курсов по отраслям приборостроения и оснащению их учебно-методическими пособиями. Одновременно с развитием основ технологического обеспечения качества приборов на кафедре велись работы по автоматизации технологических процессов в приборостроении.

Кафедра «Технологии точного приборостроения» в 1966 г. становится профилирующей. Ей поручается подготовка инженеров по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». Одновременно она продолжает обеспечивать обучение студентов факультета «П» по курсу «Технология приборостроения». С 1969 г. этой кафедре поручена подготовка инженеров по специальности «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА)».

Начиная с 1976 г. на кафедре «Конструирование и технология производства ЭВА» стали активно развиваться направления, связанные с разработкой элементной базы ЭВМ и перспективных технологий их производства. Под научным руководством А.Н. Малова подготовлено свыше 50 кандидатов технических наук. Алексей Николаевич вел большую издательскую деятельность: он написал свыше 40 учебников, учебных пособий и монографий. А.Н. Малов занимал активную жизненную позицию, являлся членом технико-экономического совета Бауманского РК КППС, членом ВАК и Комитета по Ленинским и Государственным премиям, членом ученых советов предприятий и МВТУ им. Н.Э. Баумана.

За плодотворную работу в промышленности и успехи в деле подготовки инженерных кадров А.Н. Малов награжден орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета» и многими медалями. Имя профессора Алексея Николаевича Малова занесено в Книгу Почета МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г.

В 1978 г. кафедру «Конструирование и технология производства ЭВА» возглавил доктор технических наук, профессор **Борис Иванович Белов** (1929–2010). В это время научные исследования сотрудников кафедры были ориентированы на внедрение современных достижений микроэлектроники в разработку конструкций и технологии изготовления радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры. Именно в этот период основное внимание при подготовке специалистов уделяется их способности проводить сквозное (комплексное) проектирование при активном использовании средств автоматизации. Были заложены основы нового научного направления «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике». Это позволило существенно сократить сроки проектирования при одновременном повышении конструкторской и технологической дисциплины. Под руководством Б.И. Белова были проведены работы по совершенствованию схемотехнического проектирования элементов и устройств, результаты которых обобще-



Борис Иванович Белов

ны в следующих книгах: *Белов Б.И.* «Расчет электронных схем на ЭЦВМ» (1971); *Анисимов Б.В.*, *Белов Б.И.*, *Норенков И.П.* «Машинный расчет элементов ЭВМ» (1976). В этих публикациях рассматриваются вопросы влияния точности компонентов электронных схем на их выходные параметры с учетом воздействий дестабилизирующих факторов (отклонений питающего напряжения, изменения температуры, воздействия вибраций, акустического шума и т.п.), а также описываются методики расчета выхода годных изделий при различной степени нагрузки. Эти работы дают возможность проводить целенаправленное конструирование узлов и блоков ЭВМ, осуществлять итерационный процесс совершенствования схемотехнических и конструкторских решений.

Всего профессором Б.И. Беловым опубликовано более 100 научных трудов, среди которых работы в области разработки современных методов автоматизированного проектирования ЭВМ, методик аппарата формального описания вычислительных устройств, построения формализованных моделей узлов и блоков ЭВМ.

Высокую оценку специалистов промышленности получили результаты научно-исследовательских работ (ОКБ «Рязанский радиотехнический институт», Научно-исследовательский институт автоматической аппаратуры и др.), проведенных кафедрой под руководством проф. Б.И. Белова в области автоматизированного проектирования электронных узлов и блоков, а также автоматизации раскладки кабельных соединений узлов, шкафов и стоек вычислительной и радиоэлектронной аппаратуры. Была создана подсистема САПР «Монтаж», позволяющая при помощи ЭВМ проводить монтаж плоскими ленточными кабелями с оптимизацией суммарной длины кабелей, оптимизировать расположение шкафов и стоек в пределах отведенных объемов.

За успехи в организации подготовки специалистов для оборонных отраслей промышленности Б.И. Белов награжден рядом медалей.

Большую роль в становлении и развитии кафедры сыграл профессор **Юрий Иванович Нестеров** (1945–2000), заложивший основы научной школы в области математического моделирования электронных элементов и систем. Ю.И. Нестеров – автор ряда изобретений в области автоматизации конструирования и технологии производства РЭА, которые подтверждены более 73 авторскими свидетельствами. Ему принадлежат несколько учебников, монографий и 139 печатных работ, в которых заложены базовые основы применения математического моделирования и оптимизации при проектировании электронной аппаратуры.

В 1987 г. за разработку методов и средств технологического обеспечения устойчивости и стабильности процессов механической абразивной доводки в условиях механических возбуждений Ю.И. Нестеров был удостоен премии Совета Министров СССР.

В 1991 г. кафедру «Проектирование и технология производства ЭА» (ИУ4) возглавил член-корреспондент Академии наук РФ, Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор, лауреат Государственной премии СССР, премии Совета Министров СССР, премий Правительства России **Вадим Анатольевич Шахнов**. С его приходом окончательно сформировалось базовое научное направление кафедры «Проектирование и производство электронной аппаратуры» («Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике»). Оно предполагает исследование и разработку цифровых интеллектуальных методов и средств для решения конструкторских и технологических задач создания электронных систем в условиях комплексной информационной поддержки жизненного цикла изделий, в основе которого лежат три основные составляющие:

1) конструкция (лат. constructio – строение, устройство, построение, план, взаимное расположение частей, англ. – construction, нем. – die Konstruktion, фр. – construction);

2) технология (греч. techne – исскусство, мастерство, logos – понятие, учение, англ. – technology, нем. – die technologie, фр. – technologie);

3) информатика (ср. нем. Informatik, англ. Information science, фр. Informatique, англ. computer science – компьютерная наука – в США, англ. computing science – вычислительная наука – в Вели-

кобритании) – наука о способах получения, накопления, хранения, преобразования, передачи, защиты и использования информации (в данном случае конструкторско-технологической).

По своему характеру исследования коллектива научной школы кафедры являются междисциплинарными и охватывают область фундаментальной и прикладной науки и техники, предметом которой являются проектирование и совершенствование методов производства и применения интегрированных систем в условиях сквозной информатизации жизненного цикла изделий. Результаты исследований научной школы формируются на основе последних достижений инженерных методов проектирования и системного анализа, физики твердого тела, квантовой электроники, физической химии, оптики и электронных технологий. Их содержание определяется необходимостью установления фундаментальных закономерностей, определяющих физико-химические особенности формирования микро- и наноразмерных структур, формирования заданных механических, электронных и оптических свойств данных структур и синтез на основе микро- и наносистемной элементной базы функциональных средств и систем нового поколения. Проводимые коллективом научной школы исследования важны для разработки новых принципов, а вместе с ними и нового поколения сверхминиатюрных супербыстродействующих систем обработки информации и управления. Направление исследований включает в себя разработку и создание функционально законченных сложных микро- и нанокомпонентов, материалов, элементной базы, синтез технологических процессов их изготовления, исследования физических и физико-химических явлений в процессах их получения, проектирование и конструирование приборов на основе современной элементной базы и перспективных материалов, методы разработки и применения диагностического и технологического оборудования, синтез математических моделей процессов электронных технологии и объектов электроники в рамках комплексной сквозной информатизации.

Большой вклад в становление научной школы внесли сотрудники кафедры: к.т.н., доцент Константин Иванович Билибин, к.т.н., доцент Владимир Николаевич Гриднев, к.т.н., доцент Эмилия Николаевна Камышная, д.т.н., профессор Владимир Григорьевич Костиков, д.т.н., профессор Юрий Викторович Иванов, к.т.н., доцент Виктор Васильевич Маркелов, к.т.н., профессор Эдуард Викентьевич Мысловский, д.т.н., профессор Евгений Михайлович Парфенов, к.т.н., доцент Вячеслав Викторович Шерстнев, к.т.н., профессор Анатолий Николаевич Чеканов и другие.

Коллектив научной школы неоднократно становился победителем конкурса грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

В области создания новых видов электронной аппаратуры и методов их проектирования под руководством В.А. Шахнова разработана ресурсосберегающая методология проектирования несущих конструкций электронной аппаратуры, работающей в условиях квазистатического и динамического нагружения. Проведены исследования и разработка активных методов управления волновыми полями.

Вадим Анатольевич всегда уделял огромное внимание подготовке молодых научных кадров, постановке научно-исследовательской работы по прорывным, новым направлениям науки и техники. В 1995 г. четверо молодых исследователей кафедры (В.А. Соловьев, П.В. Горюнов, А.И. Ельников, И.В. Кормушин) стали лауреатами Государственной премии РФ в области науки и техники для молодых ученых за разработку ресурсосберегающей методологии проектирования несущих конструкций электронной аппаратуры. В 2000 г. за разработку теории и создание экспериментальной установки активного противодействия акустическим шумам сотрудник кафедры А.И. Власов был удостоен звания лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники для молодых ученых. В 2015 г. А.В. Юдин стал лауреатом Премии Правительства России в области образования.

Большую роль в деле подготовки специалистов по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» играет филиал кафедры в НИЭМИ (отраслевой радиотехнический факультет). Выпускники филиала и студенты принимают активное участие в создании современных зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) ПВО. На первое место в подготовке специалистов в области проектирования современных радиоэлектронных систем выходят системотехническая подготовка и подготовка в области параметрической САПР, интегрированной в единую CALS-систему

предприятия. На филиале кафедры обучаются около 120 студентов. Учебный процесс ведут 12 профессоров и преподавателей. В учебно-воспитательной и научно-исследовательской работе принимают участие высококвалифицированные научные и инженерные кадры базового предприятия. Благодаря использованию контрольно-измерительной аппаратуры, оборудования и программного обеспечения отделов и цехов базового предприятия студентами выполняются реальные курсовые и дипломные проекты.

В 1996 г. В.А. Шахнову за новаторскую деятельность в области образования и подготовки научных кадров Международным обществом инженерной педагогики (IGIP) присвоено почетное звание «Европейский инженер-педагог».

В 1999 г. Российским Агентством по системам управления за вклад в развитие электронной техники В.А. Шахнову был вручен Памятный знак «90 лет со дня рождения Александра Ивановича Шокина».

Дальнейшее развитие исследований научной школы было сконцентрировано на создании новых видов высокоточной электромагнитной измерительной аппаратуры, за разработку которой В.А. Шахнову в 2001 г. присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники.

Общие принципы разработки конструкции и технологии производства современных видов электронной аппаратуры легли в основу изданного в 2002 г. и переизданного в 2005 г. базового учебника для вузов «Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры».

В 2009 г. В.А. Шахнов принял активное участие в создании научно-практического и методического инновационного комплекса персонифицированной профессиональной подготовки высококвалифицированных специалистов в области информационно-телекоммуникационных технологий для образовательных учреждений высшего профессионального образования, за разработку которого коллективу ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана присуждена премия Правительства РФ в области образования 2009 года. За успехи в организации подготовки специалистов для оборонных отраслей промышленности В.А. Шахнов награжден орденом Дружбы и множеством медалей.

В 2004 г. на кафедре организована первая в университете лаборатория по изучению нанотехнологий, а в 2009 г. образован научно-образовательный центр «Нанотехнологические системы и наноэлектроника». Разработан учебно-методический комплекс подготовки специалистов «Библиотека наноинженерии» в 17-ти томах. В 2014 г. начато издание библиотеки «Конструирование и технология электронных средств» (25 томов). В 2012 г. за достижения в области нанотехнологий и подготовку специалистов в этом направлении В.А. Шахнов был награжден почетной медалью ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий».

С начала 2000-х годов активизируются совместные исследования с НИИСИ РАН по созданию перспективной элементной базы (руководитель работ – доцент В.В. Макарчук). В 2018 г. доцент кафедры, директор научно-образовательного центра «Функциональные микро/наносистемы» И.А. Родионов удостоен премии Правительства Москвы молодым ученым за цикл работ по созданию уникального опытного производства, разработке и внедрению технологической платформы на основе нового класса эпитаксиальных материалов для комплексов квантовых вычислений, систем безопасности и медицинской диагностики.

Среди основных направлений исследований последних лет можно отметить разработку микропроцессорных систем активного управления волновыми полями, исследование технологических режимов поверхностного монтажа электронных компонентов, разработку методов оптимизационного конструирования несущих конструкций электронной аппаратуры в стандарте «Евромеханика», разработку методов экспертного анализа состава потоков данных систем связи, исследование методов поиска информации в распределенных информационных сетях (в том числе и в сети интернет), проектирование операционных систем реального времени и прикладного программного обеспечения для систем управления технологическими и телематическими комплексами на LINUX-платформе, отработку расчетных методик по моделированию тепловых, вибрационных, акустических, электромагнитных и др. волновых полей сеточными методами, разработку систем цифровой обработки сигналов для управления и контроля технологическими системами и т.д. Большое внимание уделяется созданию системы открытого инженерного образования по направлению «Проектирование и технология производства ЭС». Многие из исследований поддержаны грантами Минпромнауки РФ, Министерства образования РФ и грантами Президента РФ.

Большая часть работ кафедры посвящена созданию средств и методов защиты конструкций систем от нежелательных воздействий (вибраций, акустических шумов, тепловых полей и т.п.) высокой интенсивности. В последнее время на кафедре получили развитие направления, связанные с теорией и практикой создания и применения нейрокомпьютеров и нейросетевых технологий, цифровой обработки сигналов, а также разработкой новых средств и методов повышения надежности электронной аппаратуры. Так, в части исследований систем активного управления волновыми полями (научный руководитель – доцент А.И. Власов), которые находят применение для снижения низкочастотных шумов и вибраций на транспорте, в авиации, на судах (в том числе и для палубной авиации), в конструкциях космических систем, радиотелескопов и радиолокаторов, требующих высокой точности позиционирования, в нанотехнологических комплексах, для обеспечения заданной разрешающей способности и т.п., на кафедре разработаны экспериментальные установки для исследований снижения широкополосного низкочастотного шума в одномерном воздуховоде (например, шума выхлопа дизельного двигателя), активных наушников, низкочастотной системы активной виброзащиты на базе электродинамического вибростенда. Результаты разработок сотрудников, студентов и аспирантов кафедры по данному направлению неоднократно представлялись на различных выставках, конференциях и конкурсах. Так, студенты Д. Смагин и Б. Першин в 1999 г. стали стипендиатами Американского акустического общества за работы в области систем активного гашения звука. Аспирант кафедры С.Г. Семенцов удостоен стипендии Президента России 2001 г. за цикл работ по созданию микропроцессорных систем активной индивидуальной защиты (активных наушников). В 2002 г. студент Е. Володин стал лауреатом стипендии Правительства РФ за разработку математических моделей систем активной виброзащиты, и в том же году он был отмечен медалью Министерства образования РФ как автор работы, победившей на конкурсе лучших студенческих научно-исследовательских работ. В части разработки и исследований активных систем кафедра целенаправленно сотрудничает с промышленными предприятиями и научными центрами: ОКБ «Камов», Институтом машиноведения им. А.А. Благонравого, ГНЦ РФ «Акустический институт им. Н.Н. Андреева», Научным центром нейрокомпьютеров (РАСУ), МНПО «Спектр» и др.

В 1999 г. под редакцией А.И. Галушкина и В.А. Шахнова выходит первый номер библиотеки информационных технологий «Проблемы построения и обучения нейронных сетей». В 2000 г. под редакцией В.А. Шахнова выходит очередной номер библиотеки информационных технологий «Нейрокомпьютеры: архитектура и схемотехника».

В части исследований, связанных с вопросами технологической подготовки производства, современных технологических процессов производства элементной базы, несущих конструкций, сборки и монтажа на кафедре развиваются исследования, связанные с методами поверхностного монтажа элементов (научные руководители – доцент Л.В. Журавлева и доцент К.В. Селиванов). Создан опытный участок монтажа SMD-элементов, на котором отрабатываются технологические режимы и методы обеспечения качества. Для выполнения трудоемких операций контроля на кафедре в начале 2000-х годов разработаны нейросетевой аппаратно-программный комплекс дефектоскопии печатных плат по микрошлифам и нейросетевой аппаратно-программный комплекс контроля правильности монтажа SMD-компонентов. За работу по созданию системы и методов анализа отказов в электронных средствах к.т.н., доцент кафедры Л.В. Журавлева была удостоена Государственной премии РФ в области науки техники.

В последние годы на кафедре большое внимание уделяется исследованиям в области сетевых и телекоммуникационных технологий, разработкам современного пассивного и активного сетевого оборудования, цифровой трансформации промышленности. Также развиваются направления, связанные с построением систем автоматизированного управления процессами проектирования и производства, разработки концепции внедрения CALS-технологий на радиотехнических предприятиях. В тесном взаимодействии с ВНИИЭМ проводились исследования и разработки операционных UNIX-систем реального времени и их использование в системах управления атомными станциями.

Под руководством профессоров В.А. Шахнова и Э.В. Мысловского в сотрудничестве с ВЭИ и ОАО «Электросила» проводились работы по созданию систем управления и мониторинга крупных

энергетических систем. По заданию ОАО «Электросила» на кафедре разработан опытный образец компьютерного диагностирующего комплекса для поиска коротких замыканий в обмотках статоров и роторов турбогенераторов. Результаты исследований неоднократно представлялись на различных выставках. Так, на проведенном в 2002 г. ОАО «Мосэнерго» конкурсе лучших дипломных проектов по энергетическому направлению одним из победителей стал студент 2-го курса кафедры ИУ-4 М. Учуваткин, представивший свой проект на тему «Исследование применимости сеточных методов для моделирования магнитных полей электрических машин». В 2003 г. победителем всероссийского конкурса на лучшие научно-технические и инновационные работы студентов по техническим наукам стал студент третьего курса кафедры А. Афанасьев, представивший свой проект на тему «Автоматизированная система вибромониторинга крупногабаритных энергетических комплексов».

Большую работу в части разработки систем неразрушающего контроля кафедра проводит совместно с МНПО «Спектр». На кафедре проводятся работы по направлениям, связанным с решением системотехнических и конструкторско-технологических проблем создания современной, высоконадежной электронной аппаратуры, стойкой к воздействию разнообразных дестабилизирующих факторов и обладающей высокими эргономическими характеристиками (руководитель – профессор Б.В. Артемьев).

Работу над созданием параметрической базы конструктивов несущих конструкций (НК) телекоммуникационных систем кафедра осуществляет в сотрудничестве с ассоциацией «Евромеханика». На развернутом на кафедре опытном стенде НК различного уровня модульности проходит отработка вопросов оптимизации межмодульных соединений, электромагнитной защиты, новых компоновочных решений. Под руководством профессоров Е.М. Парфенова и А.Н. Чеканова сформированы принципы методологии вероятностной оптимизации НК электронных систем. Проводимые в течение ряда лет исследования по оптимизации параметров НК электронной аппаратуры легли в основу методологии проектирования НК высоконадежной ЭА.

Производство современной техники в настоящее время практически невозможно без комплексного внедрения CALS-технологий – технологий компьютерного сопровождения жизненного цикла изделий. Этого требуют и международные стандарты качества ISO9001. В начале 2000-х годов перед специалистами кафедры была поставлена задача создать информационную модель современного предприятия, объединив вычислительными сетями имеющиеся лаборатории с серверным центром кафедры, и тем самым реализовать виртуальную модель радиотехнического предприятия со всеми необходимыми компонентами, в которой будет присутствовать единое ядро управления данными, проектирующие, производственные (лабораторные) и исследовательские модули. Развитие работ в области цифровой трансформации промышленности, применения интеллектуальных методов обработки информации нашло в диссертационных исследованиях С.С. Папулина («Поиск изображений с использованием семантических признаков», 2015, руководитель – А.И. Власов) и А.А. Демина («Адаптивная обработка каллиграфической информации, представленной в виде рукописных символов», 2015, руководитель – А.И. Власов).

На кафедре широко используются параметрические САПР для конструкторского и технологического проектирования, сеточные методы и пакеты на их основе для моделирования функционирования конструктивных элементов электронных средств в различных условиях эксплуатации (руководитель работ – доцент А.Е. Курносенко). Широко внедряются в практику научных исследований и педагогической деятельности элементы ТРИЗ (руководитель работ – доцент Е.В. Резчикова). В последнее время широко проводятся исследования перспективной элементной базы на основе мемристивных эффектов (руководитель работ – доцент В.П. Жалнин).

Сфера деятельности научной школы «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» включает создание программно-аппаратных комплексов визуального проектирования сложных и наукоемких систем, анализ прикладных проблем применения информационных технологий и компонентов цифровой трансформации промышленности, исследование и разработку современных видов радиоэлектронной аппаратуры, в том числе с использованием новых принципов функционирования, внедрение новых методов передачи знаний.

Научная статья
УДК 681.142
DOI: 10.18127/j19998554-202101-03

Иерархическая пирамидальная субдискретизация в глубоких сверточных сетях для распознавания визуальных образов

А. Е. Аверьянихин[1], **А. И. Власов**[2], **Е. В. Евдокимова**[3]
[1–3] кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)
[1, 3] info@iu4.bmstu.ru, [2] vlasovai@bmstu.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Основной проблемой известных глубоких сверточных нейронных сетей является то, что им требуется входное изображение фиксированного размера. Это требование является «искусственным» и может снизить точность распознавания для изображений или его частей произвольного размера/масштаба. Авторами предложена стратегия объединения «иерархической пирамидальной субдискретизации», позволяющая устранить указанное ограничение. Структура нейронной сети с использованием предложенной стратегии объединения позволяет генерировать предсказание независимо от размера/масштаба исходного изображения, а также повышает точность распознавания.
Цель. Повысить эффективность распознавания дефектов проводящего рисунка печатных плат и монтажа компонентов за счет создания методов, алгоритмов и программ, инвариантных к смещениям, поворотам и смене ракурса входных данных.
Результаты. Исследованы особенности применения сверточных нейронных сетей на примере выделения и распознавания дефектов проводящего рисунка заготовок печатных плат. Кратко рассмотрены особенности дефектов проводящего рисунка заготовок печатных плат. Предложено использование искусственных сверточных нейронных сетей, которые имеют преимущества по скорости и точности в решении задач распознавания объектов на изображениях относительно существующих методов. Основное внимание уделено архитектуре сверточных нейронных сетей с использованием иерархической пирамидальной субдискретизации. Показаны возможности по применению сверточных нейронных сетей для распознавания дефектов проводящего рисунка заготовок печатных плат. Сделаны выводы о возможностях применении методов и средств обработки изображений в дефектоскопии радиоэлектронной аппаратуры и приборов.
Практическая значимость. Предложенная иерархическая пирамидальная субдискретизация в глубоких сверточных сетях реализована в программном комплексе, который позволяет обрабатывать цифровые данные фотографий проводящего рисунка печатных плат, в частности, при их дефектоскопии, и может быть использован для локализации присутствующих дефектов проводящего рисунка.

Ключевые слова

Обработка изображений, искусственный интеллект, нейронные сети, сверточные нейронные сети, иерархическая пирамидальная субдискретизация.

Для цитирования

Аверьянихин А.Е., Власов А.И., Евдокимова Е.В. **Иерархическая пирамидальная субдискретизация в глубоких сверточных сетях для распознавания визуальных образов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 17–31. DOI: 10.18127/j19998554-202101-03.**

Введение

С ростом микроминиатюризации электронной аппаратуры все острее встает задача автоматизированного проведения ее дефектоскопии. Наиболее ярко данная проблема проявляется при дефектоскопии печатных плат (ПП) [1–8] и интегральных структур (ИС) [9]. Одной из самых сложных задач при обработке цифровых данных в дефектоскопии является обработка и распознавание объектов, обладающих набором характерных признаков на изображениях. Исследования по данной тематике включены в перечень приоритетных направлений науки и техники и критических технологий федерального уровня, что подчеркивает важность исследований в данной области.

Современные методы распознавания объектов на изображениях используются для решения широкого круга задач, таких как распознавание текста, изображений маркировки, выявление неоднородностей на медицинских изображениях и др. [10–14].

© Аверьянихин А.Е., Власов А.И., Евдокимова Е.В., 2021

Процесс обнаружения объектов на изображениях со сложным фоновым рисунком можно в общем случае разделить на *следующие этапы* [11, 12]:

1) выделение области расположения объекта на изображении;

2) выделение отдельного объекта;

3) распознавание объекта (определение принадлежности объекта к определенному классу).

К получившим наибольшее распространение можно отнести такие методы реализации технологии обнаружения, как структурные, признаковые и шаблонные. Однако для каждого из этих методов необходимы определенные условия использования. Также данные методы обладают существенными недостатками. Например, при изменении угла регистрации изображения, изменении масштаба или наличии большого числа посторонних объектов на фоне существенно снижается точность распознавания с их помощью.

К шаблонным методам реализации технологии обнаружения дефектов можно отнести неразрушающий оптический контроль, который позволяет обнаруживать дефекты проводящего рисунка и контролировать соответствие геометрических параметров проводящего рисунка заданным нормам [2, 3]. Реализация данной технологии представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для получения, преобразования и хранения полученных изображений. Работа системы заключается в пошаговом получении изображения печатной платы (микрошлифов [8]), последовательном вводе отдельных фрагментов и последующем составлении единого изображения, которое сравнивается с эталонным. Эталонные изображения находятся во встроенной базе данных и обновляются перед каждым тестированием. Степень соответствия изображения эталону зависит от разрешающей способности и резкости оптической части контрольного устройства, а также от применяемых алгоритмов сопоставления и полноты эталона. Все это накладывает значительные ограничения на обеспечение эффективности распознавания дефектов проводящего рисунка заготовок печатных плат.

Из-за наличия явных недостатков существующих методов реализации технологии обнаружения объектов на изображениях одним из возможных методов усовершенствования технологии является применение искусственных нейронных сетей, так как они являются слабочувствительными к искажениям входного сигнала, обладают возможностью получения классификатора, а также хорошо моделируют сложные функции распределения объектов на изображениях, тем самым выигрывая по скорости и точности в решении задач распознавания объектов.

Ц е л ь р а б о т ы – повысить эффективность распознавания дефектов проводящего рисунка печатных плат и монтажа компонентов за счет создания методов, алгоритмов и программ, инвариантных к смещениям, поворотам и смене ракурса входных данных.

Для решения поставленных задач использованы методы искусственного интеллекта [13–15], идентификации и распознавания образов на изображениях и теории искусственных нейронных сетей [11, 12, 16, 17], сверточные нейронные сети [18–24], теория вероятности и математическая статистика.

В настоящее время происходят революционные изменения в области распознавания визуальных образов, связанные в основном с развитием глубоких сверточных нейронных сетей и доступностью качественных обучающих данных [18–24]. Подходы, основанные на использовании глубоких сверточных нейронных сетей, существенно улучшают качество классификации изображений, обнаружения объектов и многих других задач распознавания.

Обзор предшествующих работ

Решение задачи дефектоскопии функциональных узлов электронной техники можно разбить на два класса: *задачи дефектоскопии коммутационных структур* (проблема коммутации) и *задачи размещения компонентной базы на коммутационных структурах* (проблемы монтажа). Сложность и многостадийность процесса производства коммутационных структур приводит к появлению различных технологических дефектов, которые локализуются в элементах конструкции. Например, для печатных плат образование каждого конкретного дефекта указывает на определенные отклонения в технологии их производства. Так, ГОСТ Р 56251-2014 разделяет дефекты на визуально различимые и неразличимые. К визуально различимым дефектам относятся [1, 8]: дефекты поверхности; дефекты под поверхностью; дефекты в проводящем рисунке; дефекты отверстия; дефекты маркировки; дефекты паяльной маски; размерные дефекты.

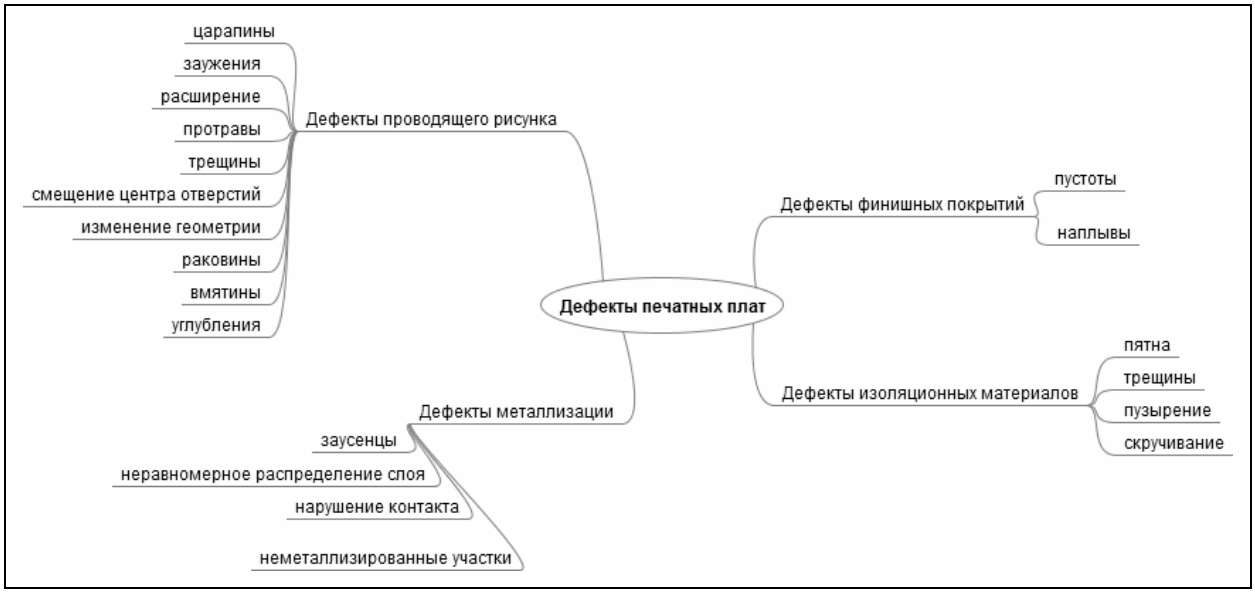


Рис. 1. Классификация типовых дефектов печатных плат
Fig. 1. Classification of typical defects in printed circuit boards

В дальнейшем основное внимание будет уделено рассмотрению дефектов проводящего рисунка, к которым относятся отсутствие адгезии, уменьшение ширины или толщины проводника вследствие выбоин, проколов, царапин. Классифицируем типовые дефекты печатных плат по характерным признакам (рис. 1).

Предлагаемая классификация по признакам помогает ускорить определение неисправностей и, соответственно, выстроить последовательность действий, необходимую для разработки программно-аппаратного комплекса распознавания дефектов печатных плат [25]. На рис. 2 представлены примеры дефектов топологии печатной платы: смещение отверстия в контактной площадке (*1*), раковина (*2*), обрыв проводника (*3*), недотравливание (*4*), вырыв (*5*), отсутствие проводника (*6*), выступ (*7*), короткое замыкание (*8*), некорректный размер отверстия (*9*), некорректное минимальное расстояние между проводниками (*10*), островок (*11*), лишний проводник (*12*), отсутствие отверстия (*13*), перетравливание (*14*). Для анализа дефектов внутренней структуры печатных плат используются специально изготовленные микрошлифы [8].

Для решения задачи распознавания и идентификации дефектов проводящего рисунка, регистрируемого в виде изображения, необходимо использовать *сегментацию* – разбиение изображения на области, соответствующие различным объектам, для дальнейшего их обнаружения [26, 27].

Существуют решения задач распознавания и идентификации изображений с использованием классической нейросетевой архитектуры (многослойный персептрон, сети с радиально-базисной функцией и др.), но применение классических архитектур нейронных сетей для данной задачи является неэффективным, так как [11, 12]:

1) изображения обладают большой размерностью, вследствие чего возрастает размер нейронной сети;

2) большое число входных параметров системы увеличивает ее вместимость и требует большой тренировочной выборки, что увеличивает время процесса обучения и его вычислительную сложность;

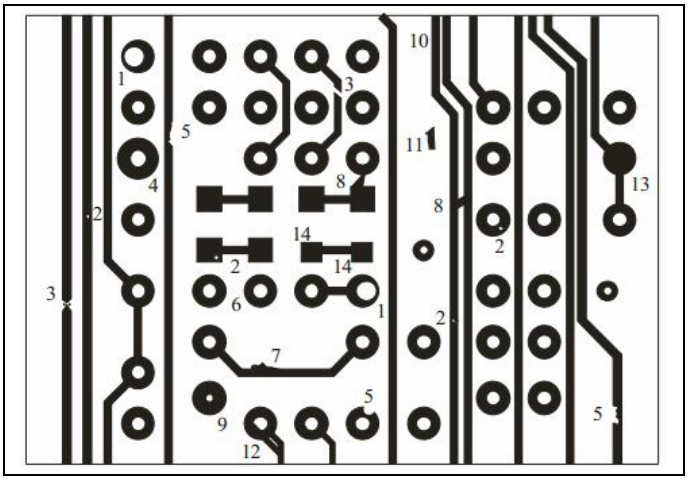


Рис. 2. Примеры дефектов топологии печатной платы
Fig. 2. Examples of the printed circuit board layout defects

3) отсутствует инвариантность относительно возможного отклонения угла съемки или поворота исходного изображения, а также возможных геометрических отклонений входного сигнала.

Следовательно, для решения задачи распознавания области расположения объекта на изображении целесообразно использовать сверточную нейронную сеть, которая обеспечивает устойчивость к изменениям масштаба исходного изображения, поворотам и прочим геометрическим искажениям [18–24].

Каждый слой сверточной нейронной сети является набором плоскостей, которые состоят из нейронов. Нейроны одной плоскости имеют одинаковые синаптические коэффициенты, ведущие ко всем локальным участкам предыдущего слоя. Каждый из нейронов получает входы от некоторой области предыдущего слоя, которая называется локальным рецептивным полем. Таким образом, входное изображение предыдущего слоя сканируется небольшим окном и пропускается через набор синаптических коэффициентов, а результат отображается на соответствующий нейрон текущего слоя. Следовательно, совокупность плоскостей является картой характеристик, за счет чего каждая плоскость находит необходимые участки изображения в любом месте предыдущего слоя. Размер локального рецептивного поля задается разработчиком нейронной сети.

Сверточная нейронная сеть имеет *два типа слоев*: сверточные и подвыборочные. При сканировании рецептивные поля сверточных слоев наслаиваются друг на друга, в предвыборочных же слоях, напротив, области соседних нейронов не перекрываются. При помощи локального усреднения значений выходных нейронов подвыборочный слой уменьшает масштаб плоскостей, тем самым реализуя иерархическую организацию сети. Последующие слои извлекают общие характеристики, меньше зависящие от искажений исходного изображения.

Следовательно, архитектура нейронной сети с такой последовательностью слоев сначала уменьшает пространственное разрешение изображения, а потом увеличивает его, предварительно объединив с данными изображения и пропустив через другие слои свертки. Таким образом, сеть играет роль своеобразного фильтра.

Для обучения сети определяется коэффициент Дайса, который показывает меру сходства – в данном случае меру площади правильно отмеченных сегментов (отношение площади пересечения к площади объединения).

Со временем такая нейронная сеть постепенно обучается выделять ключевые характеристики искомых объектов, находящихся на входном изображении [18–24].

Для существенного повышения эффективности выделения и распознавания дефектов проводящего рисунка печатных плат предложено использование сверточных нейронных сетей, обладающих устойчивостью к смещениям и искажениям входных данных. Однако при обучении и тестировании сверточных нейронных сетей существует техническая проблема: необходимо фиксировать размер исходного входного изображения. Данное требование накладывает ограничения как на соотношение сторон исходного изображения, так и на его масштаб. При применении сверточных нейронных сетей к изображениям произвольных размеров обычно используют обрезку или деформацию исходного изображения для получения требуемого фиксированного размера. Если обрезанная область может не содержать весь или часть необходимого объекта на изображении, то деформация может привести к нежелательным геометрическим искажениям. Точность распознавания нарушается из-за применения таких способов приведения исходных изображений к фиксированным размерам. Кроме того, предопределенный масштаб может не подходить для случаев, когда масштаб объекта варьируется.

Как уже было отмечено выше, основной проблемой сверточных нейронных сетей является требование фиксированного размера входного изображения. Это обусловлено тем, что сверточные нейронные сети состоят из сверточных слоев и полносвязных слоев. Сверточные слои работают в режиме скользящего окна и выводят карты признаков. Фактически сверточные слои не требуют фиксированного размера изображения и могут генерировать карты признаков любых размеров. Однако полносвязные слои должны иметь фиксированный размер/длину по их определению. Следовательно, ограничение фиксированного размера происходит только из специфики полносвязных слоев, которые существуют на более глубоких уровнях сети.

Иерархический пирамидальный пулинг позволяет снять ограничение на фиксированный размер входного изображения. Данный слой добавляется поверх последнего сверточного слоя. Слой иерархического пирамидального пулинга объединяет элементы и генерирует выходные данные с фиксированной длиной, которые затем подаются в полносвязные слои (или другие классификаторы). Другими словами, выполняется некоторая агрегация информации на более глубоком этапе архитектуры сети (между сверточными и полносвязными слоями), чтобы избежать необходимости обрезки или деформации входных изображений.

Применение иерархического пирамидального пулинга (ИПП) приводит к нескольким *ценным свойствам сверточных нейронных сетей*:

1) ИПП способен генерировать выходные данные с фиксированной длиной независимо от размера входного изображения, в то время как пулинг скользящего окна, используемый в предыдущих архитектурах сверточных сетей глубокого обучения, не способен;

2) ИПП использует многоуровневые пространственные ячейки, в то время как пулинг скользящего окна может обладать лишь фиксированным размером окна. Также многоуровневое объединение устойчиво к деформациям объекта;

3) ИПП может объединять признаки, извлеченные в изображениях различного масштаба, за счет гибкости входных данных, что приводит к повышению точности распознавания сетей глубокого обучения.

Сверточная нейронная сеть глубокого обучения с использованием ИПП не только позволяет генерировать предсказания из изображений произвольного размера для тестирования системы, но и позволяет подавать изображения с различными размерами и масштабами во время обучения сети. Обучающая выборка, содержащая изображения переменного размера, увеличивает масштабную инвариантность и уменьшает вероятность переобучения.

С учетом вышеизложенного анализа рассмотрим иерархическую пирамидальную субдискретизацию как один из способов увеличения масштабной инвариантности с одновременным увеличением восприимчивости к контекстам.

Глобальная усредненная субдискретизация и глобальные контекстные вероятности являются хорошими базовыми моделями для задач классификации и семантической сегментации изображений. Но применительно к наборам данным, содержащим сложные сцены на изображениях, данных подходов оказывается недостаточно. Пиксели на таких входных данных содержат большое количество информации о контексте сцены, и непосредственное объединение их в единый вектор может вызвать неоднозначность интерпретации. В таких случаях полезно учитывать глобальную контекстную информацию и контексты субрегионов изображений, которые позволяют лучше различать разные категории.

Модуль иерархической субдискретизации

Модуль иерархической субдискретизации, как правило, состоит из четырех параллельных расширенных сверточных слоев с различными степенями расширения с последующим объединением выходов в один. На рис. 3 представлена структура сверточной нейронной сети с модулем иерархической субдискретизации.

При увеличении степени расширения количество весов фильтра, которые перемножаются непосредственно на значения пикселей изображения, а не на достроенные участки, уменьшается. Это приводит к тому, что если значение степени расширения станет близким к разрешению карты признаков, то фильтр выродится к размеру 1×1, так как центральное значение фильтра совпадет с исходным пикселем.

Для решения этой проблемы необходимо выделить дополнительные признаки на уровне изображения. Процесс извлечения дополнительных признаков можно разделить на следующие этапы: применение глобальной усредненной субдискретизации к карте признаков модели, свертка 1×1 после каждого из пирамидальных уровней для сбалансирования вклада каждого из уровней и билинейная интерполяция до требуемого пространственного расширения.

Число уровней иерархической пирамидальной субдискретизации и размер каждого из уровней могут быть различными. Они связаны с разрешением карты признаков, которая подается в данный слой.

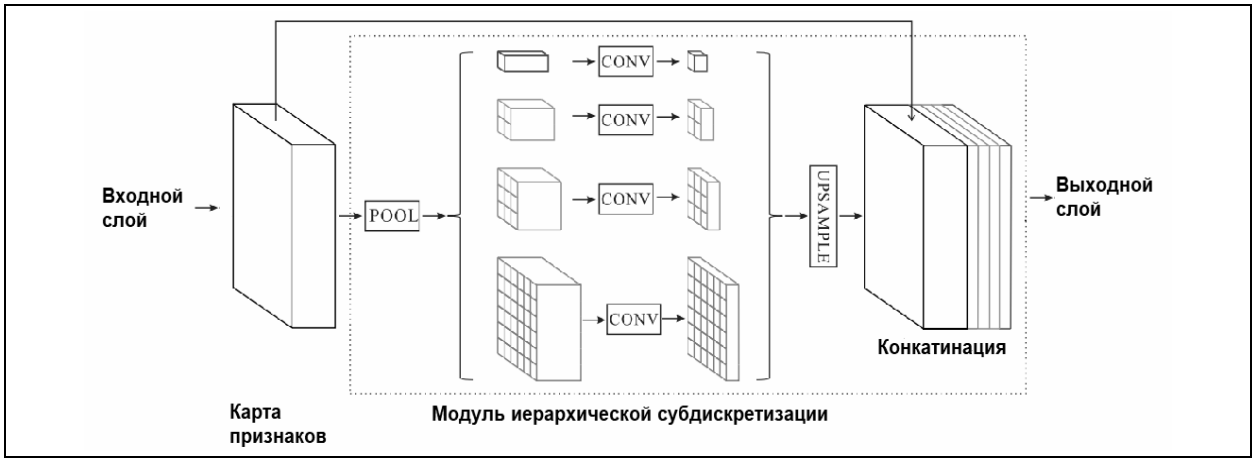


Рис. 3. Структура сверточной нейронной сети с модулем иерархической субдискретизации
Fig. 3. Structure of a convolutional neural network with a hierarchical subsampling module

Практическое применение модуля иерархической субдискретизации

С учетом того, что сверточная нейронная сеть глубокого обучения с использованием модуля иерархической субдискретизации позволяет использовать в качестве входного набора данных изображения переменных размеров и учитывает контекст сцен исходного изображения для генерации предсказаний, тестирование нейронной сети с такой архитектурой проводилось для решения задачи обнаружения дефектов проводящего рисунка печатных плат.

Для входных изображений из обучающего набора данных использовалась предварительно обученная модель ResNet со стратегией расширенной сети для извлечения карты объектов. Использование предварительно обученных сетей приводит к увеличению производительности и сокращению времени обучения системы [18–24].

Результаты работы нейронной сверточной сети с модулем иерархической субдискретизации (PSP-Net) сравниваются относительно нейронной сети с архитектурой U-Net, которая в общем виде представляет собой полносвязную нейронную сеть, модифицированную таким образом, чтобы она могла работать с меньшим числом обучающих образов и при этом проводила более точную сегментацию. В процессе экспериментального исследования было проведено 200 эпох обучения, в каждой из которых весь входной набор данных проходит через нейронную сеть в прямом и обратном направлении только один раз. Так как размер входных данных ограничен по числу изображений, для оптимизации обучения используется метод адаптивной инерции (ADAM), который итеративно «подстраивает» кривую обучения под данные. Ввиду итеративности данного процесса, обновления весов после всего одного прохода полного набора данных через нейронную сеть недостаточно. При увеличении числа эпох обучения происходит соответственное увеличение изменений весов нейронной сети. Оптимальное число эпох выбирается для каждой задачи индивидуально в зависимости от сложности сегментированных объектов и числа изображений во входном наборе данных.

В результате тестирования разработанных нейронных сетей были получены кривые обучения, представляющие собой зависимость величины ошибки обучения от числа пройденных эпох обучения. Эпохой обучения является одна итерация, включающая в себя предъявление всех примеров из обучающего множества. Функция ошибки является целевой функцией, требующей минимизации в процессе управляемого обучения нейронной сети. При помощи построения зависимости функции ошибки от числа пройденных эпох обучения можно дать оценку качеству работы нейронной сети во время обучения, так как именно от качества обучения нейронной сети зависит ее способность решать поставленную задачу обнаружения дефектов проводящего рисунка печатных плат по их изображениям.

При использовании алгоритма обратного распространения ошибки применяется разновидность градиентного спуска, т.е. осуществляется спуск вниз по поверхности функции ошибки с непрерывной подстройкой веса в направлении к минимуму функции. При анализе графиков обучения

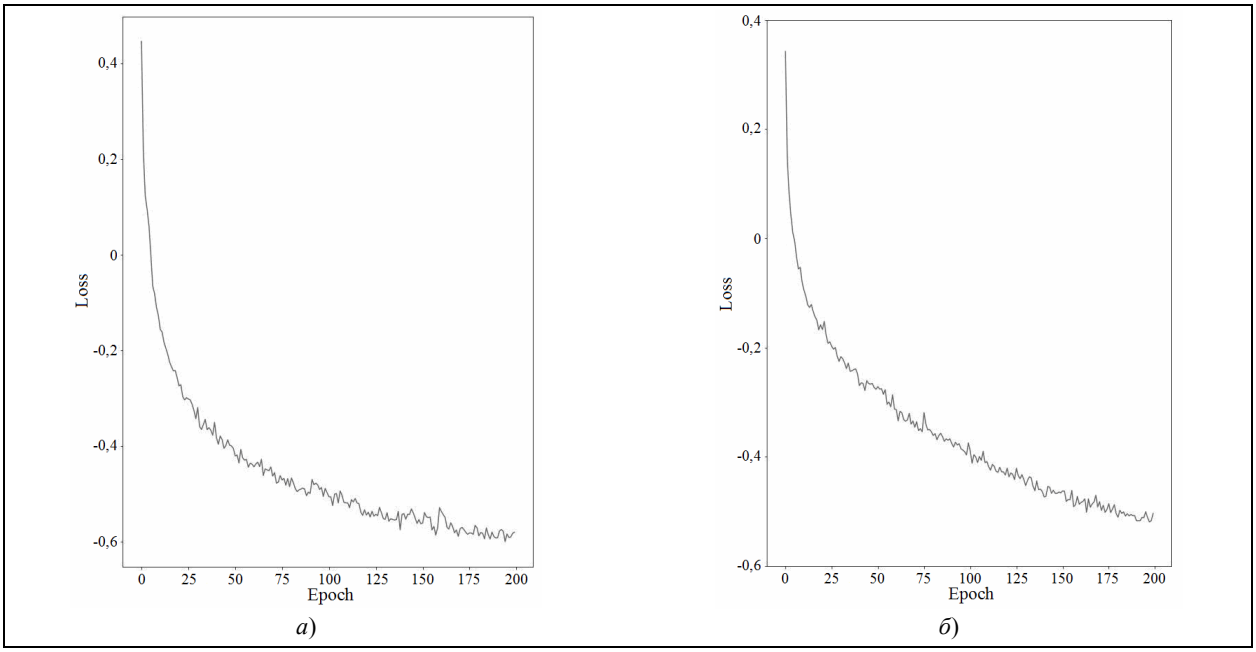


Рис. 4. Графики зависимости функции ошибки обучения сети от числа эпох обучения для нейронных сетей на основе разных архитектур: *а* – PSP-Net; *б* – U-Net

Fig. 4. Graphs of the dependence of the network learning error function on the number of epochs for neural networks based on different architectures: *a* – PSP-Net; *b* – U-Net

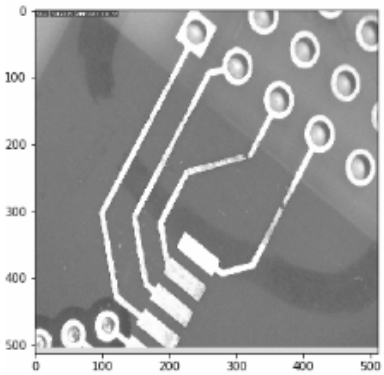
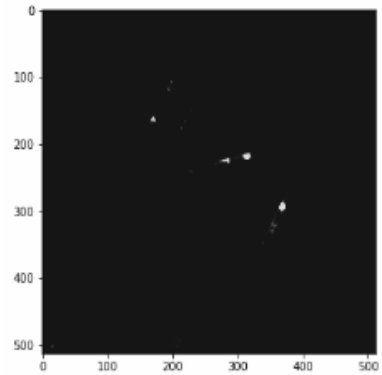
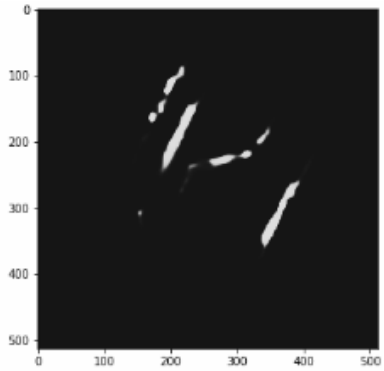
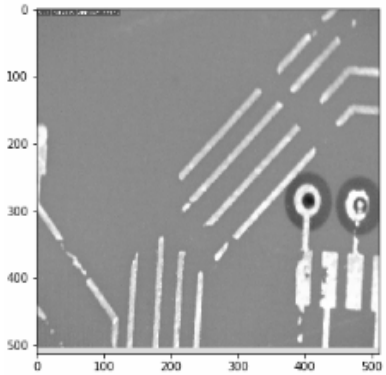
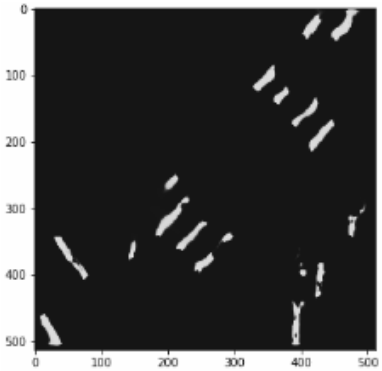
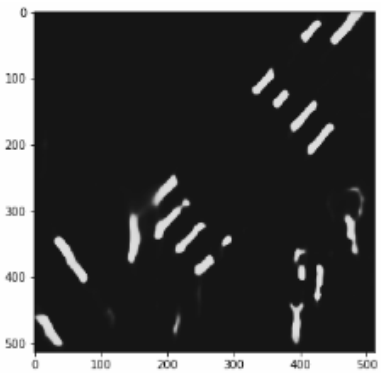
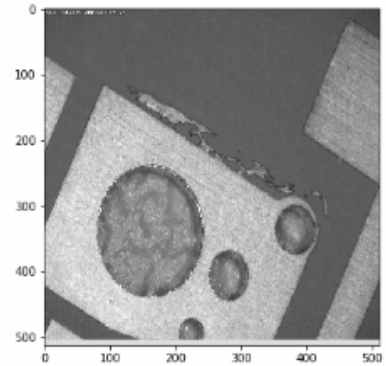
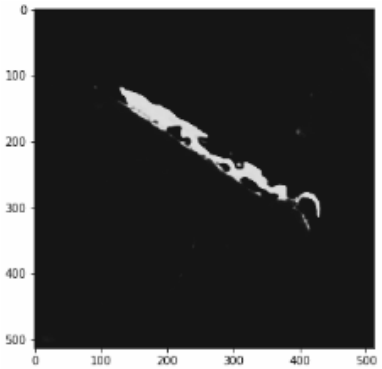
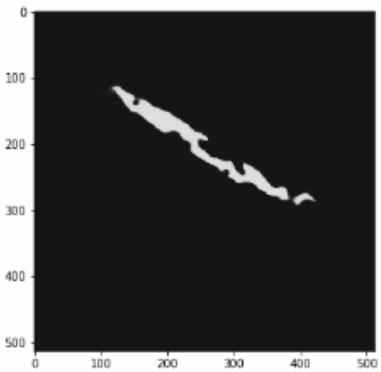
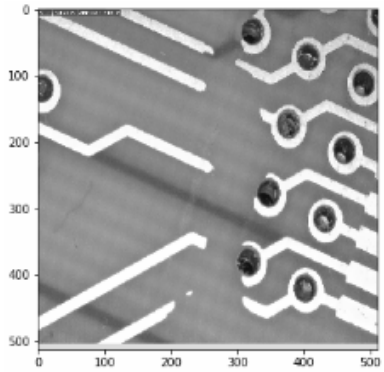
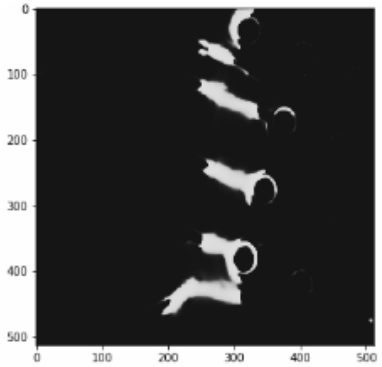
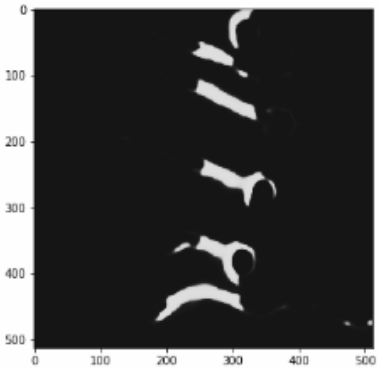
видно, что сеть может попасть в локальный минимум. Каждый раз при выходе из локального минимума ищется следующий при помощи того же метода обратного распространения ошибки до тех пор, пока найти выход из него уже не получится. При поиске выхода из локального минимума функции происходит рост функции ошибки. Графики зависимости функции ошибки обучения сети от числа эпох обучения для нейронных сетей на основе разных архитектур представлены на рис. 4, откуда видно, что для каждой из разработанных нейронных сетей происходит постепенное закономерное уменьшение величины ошибки с ростом числа эпох обучения, что свидетельствует о сходимости зависимости. Сходимость говорит о том, что архитектура нейронной сети построена правильно и гиперпараметры подобраны верно в соответствии с поставленной задачей.

В таблице приведено сравнение наиболее показательных результатов работы разработанных нейронных сетей, по которым можно делать выводы о сильных и слабых сторонах каждой из разработанных нейронных сетей. Светло-серым оттенком на полученных изображениях отображается тот участок, который нейронная сеть распознает как дефективный.

На изображениях, полученных при помощи нейронной сети с архитектурой на основе U-Net хорошо видно, что при анализе простых небольших протравов, вырывов и царапин данная нейронная сеть хорошо справляется с поставленной задачей распознавания и локализации дефекта проводящего рисунка. Но на более сложных и больших дефектах явно видно, что нейронной сети с архитектурой на основе U-Net не хватает данных о контексте изображения. Именно поэтому нейронная сеть с архитектурой на основе PSP-Net лучше справляется со сложными дефектами, как следует из таблицы. Модуль иерархической пирамидальной субдискретизации, применяемый поверх финальной карты признаков, позволяет агрегировать информацию о контексте исходного изображения, тем самым увеличивая качество семантической сегментации в задаче обнаружения и локализации дефектов.

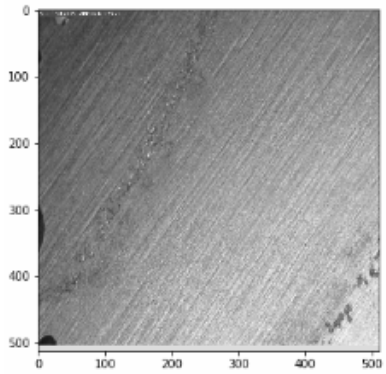
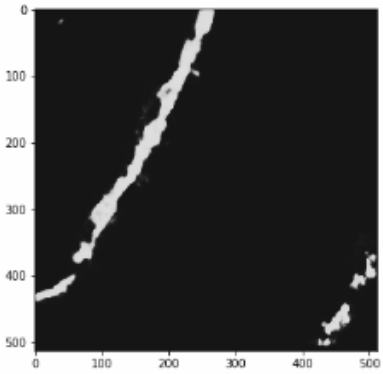
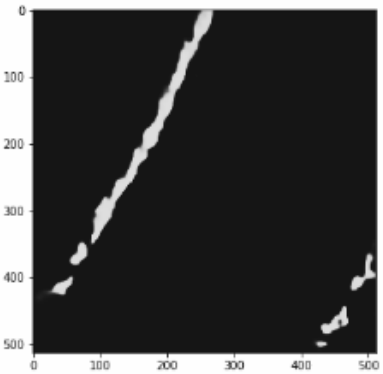
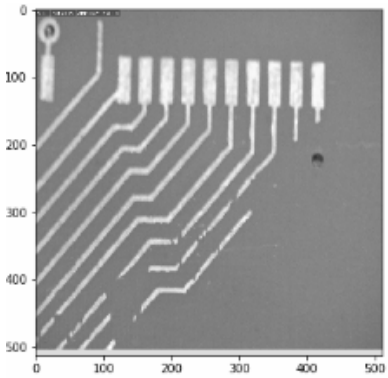
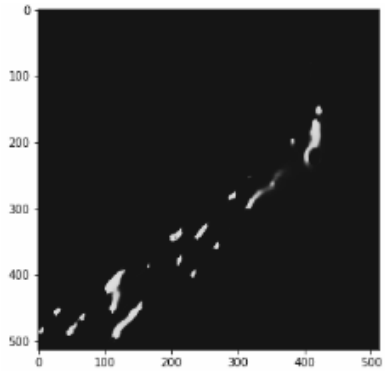
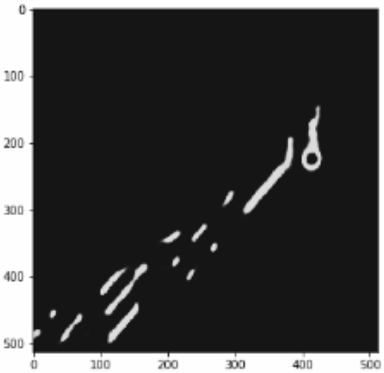
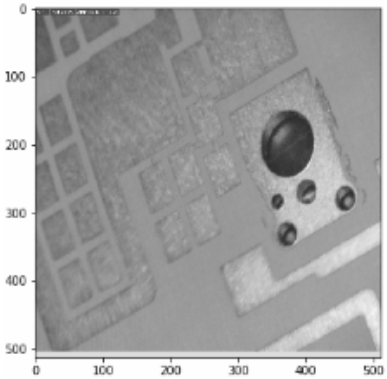
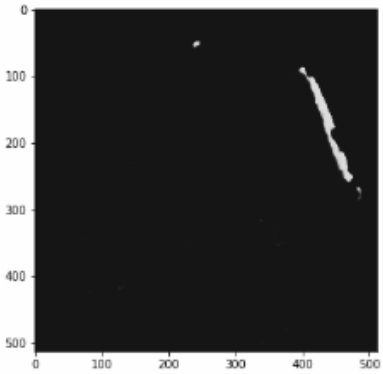
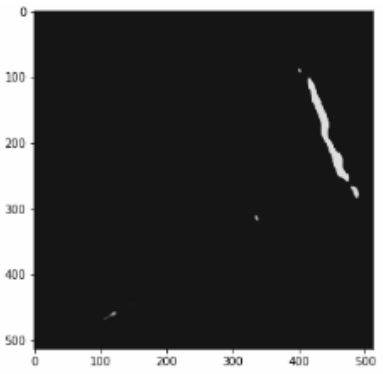
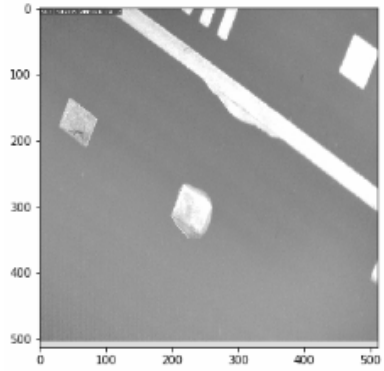
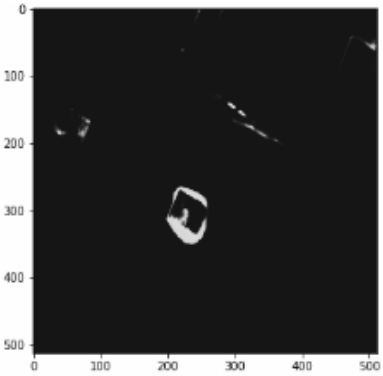
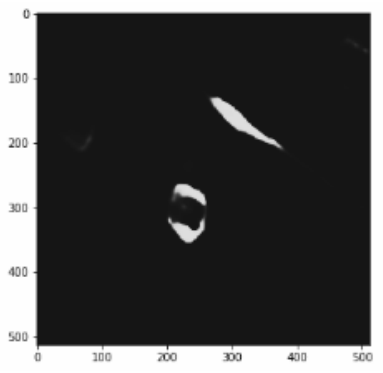
В строке № 1 таблицы результатов экспериментального исследования видно, что нейронная сеть с архитектурой на основе U-Net верно обнаружила следы протравов на дорожках (участки с отсутствующей медью), однако нейронная сеть с архитектурой на основе PSP-Net в качестве дефектных выделила и те участки дорожек, на которых медное покрытие неравномерное. Такой результат в последней достигается именно за счет использования данных о контексте изображения, так как данные дорожки проводящего рисунка отличаются от соседних, не имеющих целостных протравов.

Таблица. ***Сравнение результатов экспериментального исследования работы нейронных сетей***

№	Исходное изображение	Нейронная сеть с архитектурой U-Net	Нейронная сеть с модулем иерархической субдискретизации
1	2	3	4
1			
2			
3			
4			

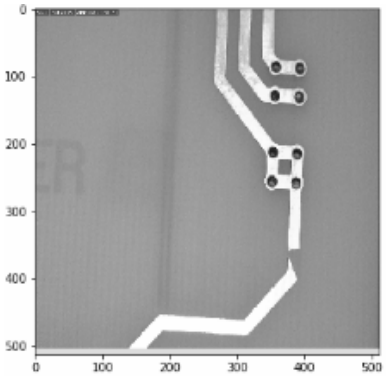
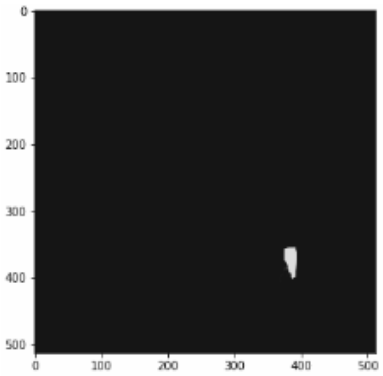
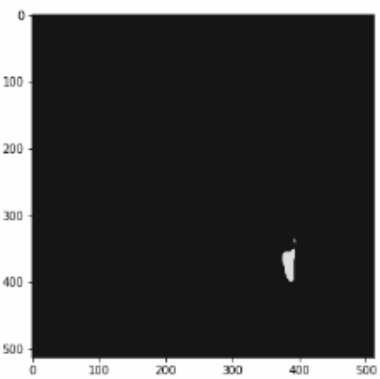
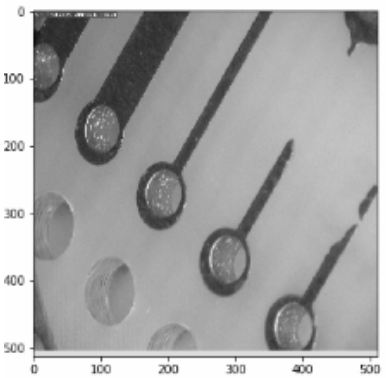
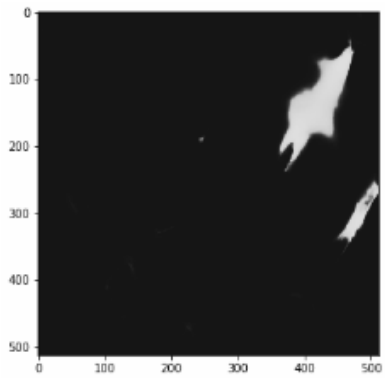
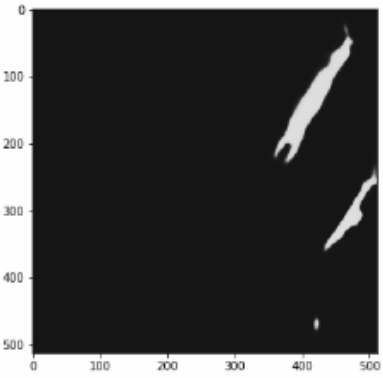
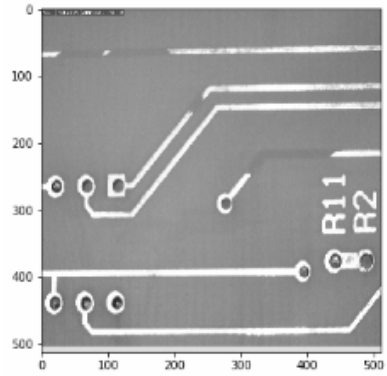
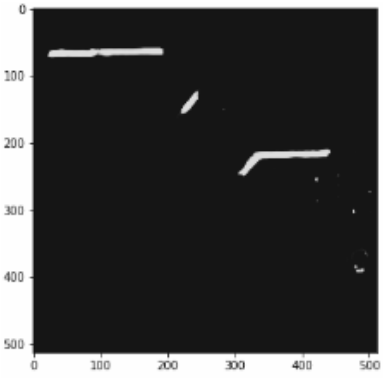
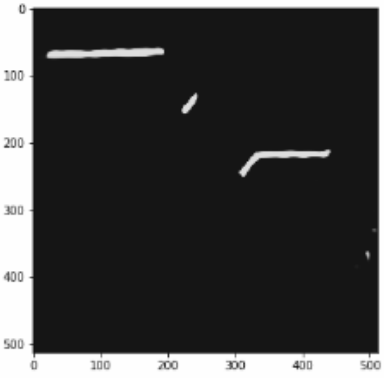
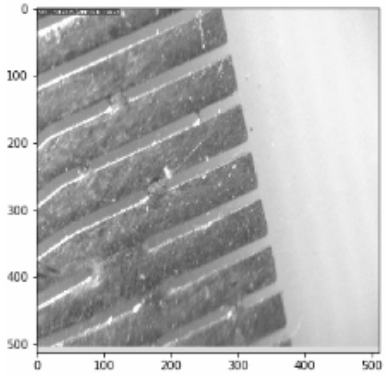
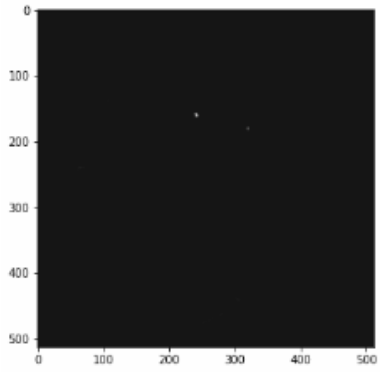
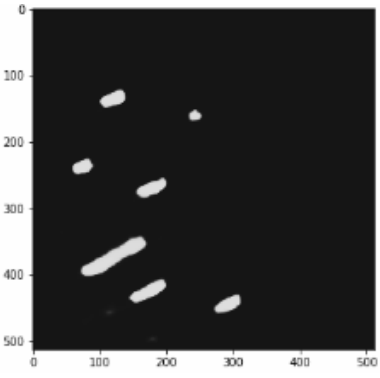
Продолжение таблицы – см. с. 25

Продолжение таблицы

1	2	3	4
5			
6			
7			
8			

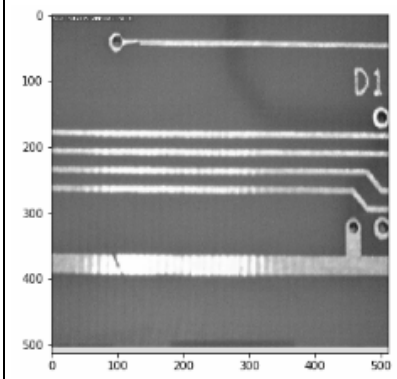
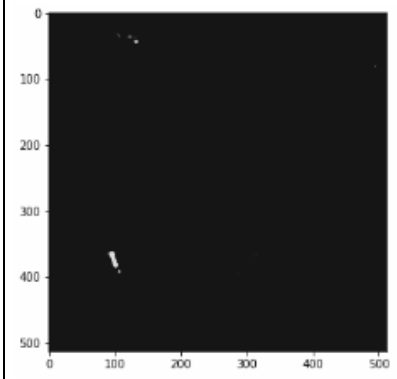
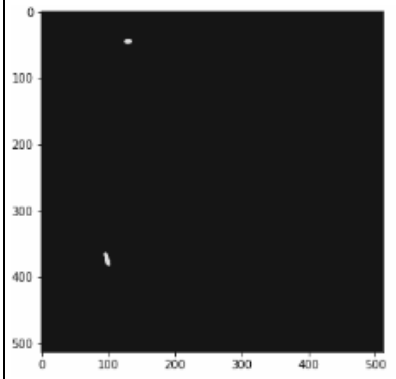
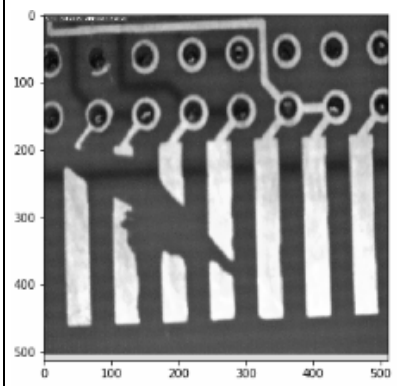
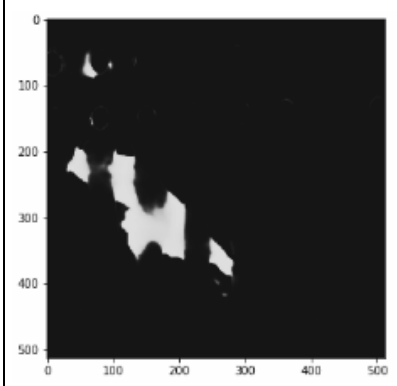
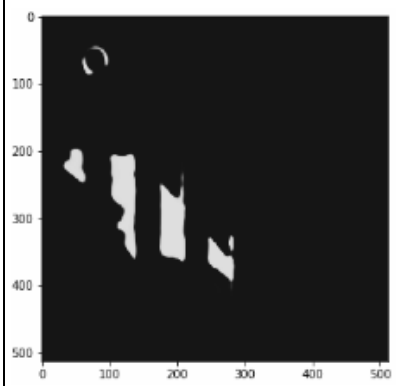
Продолжение таблицы – см. с. 26

Продолжение таблицы

1	2	3	4
9			
10			
11			
12			

Окончание таблицы – см. с. 27

Окончание таблицы

1	2	3	4
13			
14			

Использование информации о различных субрегионах входного изображения и общего контекста позволяет в случае нейронной сети с архитектурой на основе PSP-Net замечать следы, оставшиеся на месте протравленных участков, используя их для более точного определения местоположения и границ искомого дефекта проводящего рисунка.

В строках №№ 2, 3, 5, 7, 9, 11 и 13 таблицы наблюдается примерно одинаковое качество обнаружения дефектов проводящего рисунка. Стоит отметить, что точность границ участков с отсутствующим медным покрытием достигается за счет использования в качестве функции потерь функции, основанной на расчете коэффициента Дайса, представляющего собой меру перекрытия между выборками. За счет того, что при использовании функции потерь с коэффициентом Дайса происходит нормирование на представленность класса в каждом изображении, она хорошо подходит в случае решения задач, в которых искомый класс дефектов проводящего рисунка занимает малую часть кадра изображения заготовки печатной платы.

Результаты экспериментального исследования показали, что постановка задачи в виде попиксельной сегментации дала возможность получить хорошие результаты распознавания даже на малом размере обучающего набора изображений.

Заключение

Из сравнения исходного набора изображений дефектов проводящего рисунка печатных плат с результатами работы сверточных нейронных сетей можно сделать вывод, что нейронная сеть на основе архитектуры U-Net хорошо справляется с обнаружением таких дефектов как протравы, вырывы и царапины, но при увеличении сложности локализации и внешнего вида дефекта данная нейронная сеть обнаруживает границы дефектной области не совсем четко, что свидетельствует о недостаточности данных о контексте исходного изображения. Нейронная сеть на основе архитектуры PSP-Net лучше справляется с дефектами сложной формы и неочевидной локализации, так

как модуль иерархической пирамидальной субдискретизации, применяемый поверх финальной карты признаков, помогает агрегировать информацию о контексте исходного изображения, за счет чего достигается высокое качество семантической сегментации.

Список источников

1. *Гриднев В.Н., Гриднева Г.Н.* Проектирование коммутационных структур электронных средств. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014.
2. *Буянов А.И., Власов А.И., Загоскин А.В.* Применение нейросетевых методов при дефектоскопии печатных плат // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2002. № 3. С. 42–70.
3. *Власов А.И., Гриднев В.Н., Константинов П., Юдин А.В.* Нейросетевые методы дефектоскопии печатных плат // Электронные компоненты. 2004. № 8. С. 148–155.
4. *Панфилова С.П., Власов А.И., Гриднев В.Н., Червинский А.С.* Бесконтактный тепловой контроль изделий электронной техники // Производство электроники. 2007. № 3. С. 25–30.
5. *Панфилова С.П., Власов А.И., Гриднев В.Н., Червинский А.С.* Бесконтактный тепловой контроль электронно-вычислительных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. № 6. С. 42–49.
6. *Гриднев В.Н., Сергеева М.Д., Чебова А.И.* Линейные модели распознавания тепловизионных изображений неисправностей электронных ячеек // Контроль. Диагностика. 2014. № 8. С. 57–66.
7. *Buyanov A.A., Vlasov A.I., Gridnev V.N.* The neuronet hardware and software integrated system for defectoscopy of printed circuits based on microsections // Сб. тезисов докладов 3-й междунар. конф. «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике». 2002. С. 71.
8. *Макушина Н.В., Сергеева М.Д.* Анализ дефектов металлизированных отверстий печатных плат // Проектирование и технология электронных средств. 2018. № 1. С. 3–12.
9. *Вирясова А.Ю., Власов А.И., Гладких А.А.* Нейросетевые методы дефектоскопии интегральных структур // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2019. № 2. С. 54–67.
10. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: Мир. 1992.
11. *Балухто А.Н., Булаев В.И., Бурый Е.В.* и др. Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений. Сер. Библиотека журнала «Нейрокомпьютеры: разработка, применение». Т. 7. М.: Радиотехника. 2003.
12. *Балухто А.Н., Галушкин А.И., Ковальчук Д.В., Назаров Л.Е., Томашевич Н.С.* Нейрокомпьютеры в прикладных задачах обработки изображений. Сер. Библиотека журнала «Нейрокомпьютеры: разработка, применение». Т. 8. М.: Радиотехника. 2003.
13. *Дембицкий Н.Л., Назаров А.В.* Применение методов искусственного интеллекта в проектировании и производстве радиотехнических устройств. Сер. Научная библиотека. М.: Изд-во МАИ. 2009.
14. *Григорьев В.П., Камышная Э.Н., Нестеров Ю.И., Никитин С.А.* Применение методов искусственного интеллекта в САПР технологических процессов производства электронной аппаратуры. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998.
15. *Глушко А.А., Бусов В.Д., Передерин К.Д.* Методы алгоритмического проектирования искусственного интеллекта // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 2. С. 72–88.
16. *Шахнов В.А., Власов А.И., Поляков Ю.А., Кузнецов А.С.* Нейрокомпьютеры: архитектура и схемотехника. Сер. Приложение к журналу «Информационные технологии». № 9. М.: Машиностроение. 2000.
17. *Власов А.И., Папулин С.Ю.* Анализ данных с использованием гистограммной модели комбинации признаков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2019. Т. 21. № 5. С. 18–27.
18. *Рысьмятова А.А.* Использование сверточных нейронных сетей для задачи классификации текстов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2016.
19. *Прохоров В.Г.* Использование сверточных сетей для распознавания рукописных символов // Проблеми програмування. 2008. № 2–3. С. 669–674.
20. *Rowley H.A., Baluja S., Kanade T.* Neural network-based face detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1998. V. 20. № 1. P. 23–38.
21. *Juell P., Marsh R.* A hierarchical neural network for human face detection // Pattern Recognition 1996. V. 29. № 5. P. 781–787.
22. *Lin S.-H., Kung S.-Y., Lin L.-J.* Face recognition/detection by probabilistic decision-based neural network // IEEE Transactions on Neural Networks. 1997. V. 8. № 1. P. 114–132.
23. *Lawrence S., Giles C.L., Tsoi A.C., Back A.D.* Face recognition: A convolutional neural network approach // IEEE Transactions on Neural Networks. Special Issue on Neural Networks and Pattern Recognition. P. 1–24.
24. CS231n convolutional neural networks for visual recognition: Image classification [Электронный ресурс] / URL: http://cs231n.github.io/classification/.
25. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019618937. Экспертная система по обнаружению дефектов проводящего рисунка печатных плат / *Е.В. Евдокимова, А.Е. Аверьянихин, А.И. Власов.* Опубл. 08.07.2019.
26. *Демин А.А.* Методы автоматизированной оценки каллиграфии // Программные продукты и системы. 2011. № 1. С. 20–23.
27. *Демин А.А., Власов А.И., Шахнов В.А.* Методы и средства визуальных упражнений для адаптивной коррекции тонкой моторики кистей рук в условиях невесомости // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 3 (102). С. 23–38.

Информация об авторах

Артур Евгеньевич Аверьянихин – ст. преподаватель
SPIN-код: не представлен
Андрей Игоревич Власов – к.т.н., доцент
SPIN-код: не представлен
Екатерина Владимировна Евдокимова – магистр
SPIN-код: не представлен

Поступила в редакцию 19.11.2020.
Одобрена после рецензирования 03.12.2020.
Принята к публикации 15.12.2020.

Уважаемые читатели!

В Издательстве «Радиотехника» вышли книги

Андреев Г.И., Барвиненков В.В., Мушков А.Ю., Созинов П.А., Тихомиров В.А.

Методологические основы научной работы и принципы диссертационного исследования

Монография
Под ред. *П.А. Созинова*
DOI 10.18127/B9785931081625
ISBN 978-5-93108-162-5

Показаны методологические основы научной работы в исследовательских, научно-производственных организациях и высших учебных заведениях. Рассмотрены такие основополагающие понятия как принцип, парадигма, концепция и научные категории, в качестве которых выступают теоретическое знание, метод исследования и аргументация. Изложены методологические, логические и философские основания организации научных исследований. Дан анализ проблемных вопросов подтверждения и опровержения частных научных положений и теорий, рассмотрены методы проведения оценки достоверности получаемых результатов. Рассмотрена концепция моделирования как процесс эволюции методов научного познания. Приведены основные принципы и наиболее важные требования, предъявляемые к научному уровню диссертационных исследований. Даны методические советы по оформлению полученных научных результатов.

Для организаторов научных исследований, научных сотрудников, а также аспирантов и студентов.

Андреев Г.И., Созинов П.А., Тихомиров В.А.

Методология моделирования сложных технических систем. Основа системных исследований

DOI 10.18127/B9785931081960
ISBN 978-5-93108-196-0

Разработана новая универсальная методология моделирования, связанная с эффективным способом раскрытия широкого класса прикладных аспектов организации и проведения экспериментальных исследований и конструктивной детализации системного подхода к вычислительному эксперименту. Рассмотрены языки моделирования. Даны методы моделирования и алгоритмы построения моделей. Изложены основные положения теории подобия и планирования вычислительных экспериментов и представлены новые результаты теории моделирования в сфере построения «цифровых двойников». Вероятностно-статистические модели рассмотрены на энциклопедическом уровне с праксиологической точки зрения. Показана эффективность концепции вычислительного эксперимента при ведущей роли натурных испытаний при создании сложных технических систем. Существенное внимание уделено разработке методического аппарата построения прогнозных моделей и экспериментальным исследованиям методами моделирования на основе теории принятия управленческих решений.

Для студентов, аспирантов, научных сотрудников и руководителей, деятельность которых связана с вопросами принятия управленческих решений, процессов моделирования при создании сложных технических систем.

Original article

Hierarchical pyramidal subsampling in deep convolutional networks for visual pattern recognition

A. E. Averyanikhin[1], **A. I. Vlasov**[2], **E. V. Evdokimova**[3]
[1–3] Department IU4 of Designing and Technology of Electronic Equipment,
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
[1, 3] info@iu4.bmstu.ru, [2] vlasovai@bmstu.ru

Abstract

The main problem of known deep convolutional neural networks (CNN) is that they require a fixed-size input image. This requirement is "artificial" and can reduce recognition accuracy for images or its parts of arbitrary size/scale. The paper proposes a strategy of combining "hierarchical pyramidal subselection" to eliminate the above restriction. The structure of the neural network using the proposed combining strategy allows the generation of prediction regardless of the size/scale of the original image, and also improves the accuracy of recognition.

Features of application of CNN for identification and recognition of defects of conducting pattern of printed circuit board blanks have been considered. Features of defects of conductive pattern of printed circuit board blanks have been briefly discussed. The invention proposes the use of artificial CNN, which have advantages in speed and accuracy in solving problems of object recognition on images relative to existing methods. The focus is on the architecture of CNN using hierarchical pyramidal subselection. Capabilities of application of CNN for recognition of defects of conducting pattern of printed circuit board blanks have been shown.

Proposed method of hierarchical pyramidal subselection in deep convolutional networks has been implemented in software complex, which allows processing digital data of photographs of conducting pattern of printed circuit boards, in particular during their flaw detection, and can be used for localization of existing defects of conducting pattern. The conclusion draws the possibilities of using methods and means of image processing in flaw detection of radio-electronic equipment and instruments.

Keywords

Image processing, artificial intelligence, neural networks, convolutional neural networks, hierarchical pyramidal subsampling.

For citation

Averyanikhin A.E., Vlasov A.I., Evdokimova E.V. **Hierarchical pyramidal subsampling in deep convolutional networks for visual pattern recognition. Neurocomputers. 2021. Vol. 23. No. 1. P. 17–31. DOI: 10.18127/j19998554-202101-03. (in Russian)**

References

1. *Gridnev V.N., Gridneva G.N.* Proektirovanie kommutatsionnykh struktur elektronnykh sredstv. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. 2014. (in Russian)
2. *Buyanov A.I., Vlasov A.I., Zagoskin A.V.* Primenenie nejrosetevykh metodov pri defektoskopii pechatnykh plat. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. 2002. № 3. S. 42–70. (in Russian)
3. *Vlasov A.I., Gridnev V.N., Konstantinov P., Yudin A.V.* Nejrosetevye metody defektoskopii pechatnykh plat. Elektronnye komponenty. 2004. № 8. S. 148–155. (in Russian)
4. *Panfilova S.P., Vlasov A.I., Gridnev V.N., Chervinskij A.S.* Beskontaktnyj teplovoj kontrol' izdelij elektronnoj tekhniki. Proizvodstvo elektroniki. 2007. № 3. S. 25–30. (in Russian)
5. *Panfilova S.P., Vlasov A.I., Gridnev V.N., Chervinskij A.S.* Beskontaktnyj teplovoj kontrol' elektronno-vychislitel'nykh sredstv. Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoj apparature. 2007. № 6. S. 42–49. (in Russian)
6. *Gridnev V.N., Sergeeva M.D., Chebova A.I.* Linejnye modeli raspoznavaniya teplovizionnykh izobrazhenij neispravnostej elektronnykh yacheek. Kontrol'. Diagnostika. 2014. № 8. S. 57–66. (in Russian)
7. *Buyanov A.A., Vlasov A.I., Gridnev V.N.* The neuronet hardware and software integrated system for defectoscopy of printed circuits based on microsections. Sb. tezisov dokladov 3-j mezhdunar. konf. «Komp'yuternye metody i obratnye zadachi v nerazrushayushchem kontrole i diagnostike». 2002. S. 71.
8. *Makushina N.V., Sergeeva M.D.* Analiz defektov metallizirovannykh otverstij pechatnykh plat. Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv. 2018. № 1. S. 3–12. (in Russian)
9. *Viryasova A.Yu., Vlasov A.I., Gladkikh A.A.* Nejrosetevye metody defektoskopii integral'nykh struktur. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. 2019. № 2. S. 54–67. (in Russian)
10. *Uossermen F.* Nejrokomp'yuternaya tekhnika: Teoriya i praktika. M.: Mir. 1992. (in Russian)
11. *Balukhto A.N., Bulaev V.I., Buryj E.V.* i dr. Nejrokomp'yutery v sistemakh obrabotki izobrazhenij. Ser. Biblioteka zhurnala «Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie». T. 7. M.: Radiotekhnika. 2003. (in Russian)
12. *Balukhto A.N., Galushkin A.I., Koval'chuk D.V., Nazarov L.E., Tomashevich N.S.* Nejrokomp'yutery v prikladnykh zadachakh obrabotki izobrazhenij. Ser. Biblioteka zhurnala «Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie». T. 8. M.: Radiotekhnika. 2003. (in Russian)
13. *Dembitskij N.L., Nazarov A.V.* Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v proektirovanii i proizvodstve radiotekhnicheskikh ustrojstv. Ser. Nauchnaya biblioteka. M.: Izd-vo MAI. 2009. (in Russian)
14. *Grigor'ev V.P., Kamyshnaya E.N., Nesterov Yu.I., Nikitin S.A.* Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v SAPR tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva elektronnoj apparatury. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. 1998. (in Russian)

15. *Glushko A.A., Busov V.D., Perederin K.D.* Metody algoritmicheskogo proektirovaniya iskusstvennogo intellekta. Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem. 2019. № 2. S. 72–88. (in Russian)
16. *Shakhnov V.A., Vlasov A.I., Polyakov Yu.A., Kuznetsov A.S.* Nejrokomp'yutery: arkhitektura i skhemotekhnika. Ser. Prilozhenie k zhurnalu «Informatsionnye tekhnologii». № 9. M.: Mashinostroenie. 2000. (in Russian)
17. *Vlasov A.I., Papulin S.Yu.* Analiz dannykh s ispol'zovaniem gistogrammnoj modeli kombinatsii priznakov. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. 2019. T. 21. № 5. S. 18–27. (in Russian)
18. *Rys'myatova A.A.* Ispol'zovanie svertochnykh nejronnykh setej dlya zadachi klassifikatsii tekstov. M.: MGU im. M.V. Lomonosova. 2016. (in Russian)
19. *Prokhorov V.G.* Ispol'zovanie svertochnykh setej dlya raspoznavaniya rukopisnykh simvolov. Problemi programuvaniya. 2008. № 2–3. S. 669–674. (in Russian)
20. *Rowley H.A., Baluja S., Kanade T.* Neural network-based face detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1998. V. 20. № 1. P. 23–38.
21. *Juell P., Marsh R.* A hierarchical neural network for human face detection. Pattern Recognition 1996. V. 29. № 5. P. 781–787.
22. *Lin S.-H., Kung S.-Y., Lin L.-J.* Face recognition/detection by probabilistic decision-based neural network. IEEE Transactions on Neural Networks. 1997. V. 8. № 1. P. 114–132.
23. *Lawrence S., Giles C.L., Tsoi A.C., Back A.D.* Face recognition: A convolutional neural network approach. IEEE Transactions on Neural Networks. Special Issue on Neural Networks and Pattern Recognition. P. 1–24.
24. CS231n convolutional neural networks for visual recognition: Image classification [Elektronnyj resurs] / URL: http://cs231n.github.io/classification/.
25. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2019618937. Ekspertnaya sistema po obnaruzheniyu defektov provodyashchego risunka pechatnykh plat / *E.V. Evdokimova, A.E. Aver'yanikhin, A.I. Vlasov*. Opubl. 08.07.2019. (in Russian)
26. *Demin A.A.* Metody avtomatizirovannoj otsenki kalligrafii. Programmnye produkty i sistemy. 2011. № 1. S. 20–23. (in Russian)
27. *Demin A.A., Vlasov A.I., Shakhnov V.A.* Metody i sredstva vizual'nykh uprazhnenij dlya adaptivnoj korrektsii tonkoj motoriki kistej ruk v usloviyakh nevesomosti. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie. 2015. № 3 (102). S. 23–38. (in Russian)

Information about the authors

Artur E. Averyanikhin – Senior Lecturer
Andrey I. Vlasov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Ekaterina V. Evdokimova – Master

The article was submitted 19.11.2020.
Approved after reviewing 03.12.2020.
Accepted for publication 15.12.2020.

Научная статья
УДК 681.142
DOI: 10.18127/j19998554-202101-04

Распознавание рукописных символов на сенсорной матрице с использованием нейронной сети

Д. А. Аминев[1], В. А. Данилевич[2], А. А. Демин[3], А. Самман[4]
[1] Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)
[2–4] кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)
[1, 2] info@iu4.bmstu.ru, [3] fiz.alex@gmail.com, [4] abdulkadersamman1992@gmail.com

Аннотация

Постановка проблемы. В настоящее время все большее распространение получают сенсорные дисплеи. Такая конструкция совмещает устройство ввода и устройство вывода информации, а также позволяет создавать максимально удобные интерфейсы для взаимодействия с пользователем. Распознавание вводимых данных значительно расширяет функционал сенсорного ввода, предоставляя возможность применять распознавание введенных символов для запуска разнообразных функций и приложений. Существующие на сегодняшний день подобные системы недостаточно гибкие в настройке и использовании.

Цель. Создать систему анализа данных, вводимых посредством инфракрасной сенсорной панели, с использованием нейронной сети, решающей задачу распознавания рукописных символов.

Результаты. Кратко рассмотрено функциональное назначение блоков разработанной программы: графического интерфейса, программы чтения COM-порта, нейронной сети. Представлен графический интерфейс, визуализирующий используемую сенсорную матрицу и отображающий функциональные кнопки, поля ввода и вывода данных. Интерфейс состоит из основного рабочего окна, окна просмотра и настройки макросов и окна настройки таймера автоидентификации. Разработан блок программы, позволяющий создать нейронную сеть по заданным настройкам, сделать в нее запрос и обучить. Создан дополнительный функционал программы, позволяющий запускать внешние файлы по введенному символу, частично автоматизирующий работу программы, помогая пользователю. Проведено функциональное тестирование всех разработанных модулей в отдельности и всей программы в целом. Проанализированы принципы обучения нейронных сетей. Проведены эксперименты, в которых реализовано обучение нейронной сети с разными настройками и параметрами обучения, к которым относятся число эпох обучения, скорость обучения, число нейронов скрытого слоя. По итогам этих экспериментов выявлены факторы, влияющие на качество обучения нейронной сети.

Практическая значимость. По итогам обучения нейронной сети получен набор коэффициентов, обеспечивающий стабильную работу нейронной сети. Установлено, что точность работы нейронной сети составляет 96%, а скорость распознавания меньше секунды.

Ключевые слова

Сенсорный экран, устройство ввода, программирование, разработка оконных приложений, нейронные сети.

Для цитирования

Аминев Д.А., Данилевич В.А., Дёмин А.А., Самман А. **Распознавание рукописных символов на сенсорной матрице с использованием нейронной сети // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 32–42. DOI: 10.18127/j19998554-202101-04.**

Введение

В настоящее время все большее распространение получают сенсорные дисплеи. Такая конструкция совмещает устройство ввода и устройство вывода информации, а также позволяет создавать максимально удобные интерфейсы для взаимодействия с пользователем.

Распознавание вводимых данных значительно расширяет функционал сенсорного ввода, предоставляя возможность применять распознавание введенных символов для запуска разнообразных функций и приложений. Существующие на сегодняшний день подобные системы недостаточно гибкие в настройке и использовании.

Для решения задачи определения рукописного символа на матрице с известными размерами подойдет нейронная сеть с одним скрытым слоем [1]. Обучение сети будет происходить с учите-

© Аминев Д.А., Данилевич В.А., Дёмин А.А., Самман А., 2021

лем, а значит, понадобится набор маркированных данных. В качестве первоначального набора для обучения и контроля был использован набор MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology) [2]. Он содержит 60 тысяч изображений для обучения и 10 тысяч – для тестирования. Каждое изображение представлено строкой, в начале которой находится маркер, обозначающий настоящее значение числа. Само изображение монохромное (28×28 клеток) и представлено в виде строки из 784 чисел интенсивности цвета (от 0 до 255) [3]. Так как сенсорная матрица будет передавать значения узлов как активен или не активен, набор был преобразован из монохромного в бинарный. Также был реализован функционал создания собственных маркированных наборов, позволяющий получить новый набор или дополнить существующий. После успешного завершения испытаний на наборе рукописных чисел в систему будет добавлен полный набор символов алфавита.

Существует ряд аналогов разрабатываемой системы, причем как аппаратных, так и программных [4]. К *аппаратным аналогам* можно отнести другие варианты исполнения инфракрасных сенсорных матриц. Все они рассчитаны для использования на больших экранах, но имеют функциональные отличия. Поэтому и модули управления у них устроены иначе. У оптических экранов в углах матрицы установлены камеры с инфракрасной подсветкой, которые отслеживают угловое положение точки касания. Затем модуль управления вычисляет ее координаты и передает в ПК. Существуют схемы как с двумя датчиками, так и с четырьмя. Увеличение числа камер ведет к улучшению точности считывания касаний, однако возрастает время опроса [5]. Преимуществом данной технологии является дешевизна устройства и высокая скорость опроса датчиков, а недостатками – плохая работа с мультитач и сложная калибровка.

Для применения в мобильных встраиваемых системах существуют разработки проекционно-емкостной панели из матрицы конденсаторов, толстопленочной технологии производства сенсорного экрана и специализированного контроллера фиксирования касания. Проекционно-емкостной экран обладает таким же рыночным ценовым диапазоном, как и резистивные аналоги [6].

Существуют также разработки проекционно-емкостного сенсорного экрана, совмещающего в себе датчики и аналого-цифровой преобразователь, изготавливаемые из материалов на основе графена. Сенсорный экран представляет собой пленку толщиной в 100...150 мкм с чередующимися слоями из графена, имеющую светопропускаемость на 6–8% выше, чем у проекционно-емкостного экрана из оксидов индия и олова. Экран обладает высокими показателями гибкости и механической твердости, а также потенциально меньшей стоимостью материалов для его изготовления: сахароза, медная фольга, нитрид бора и т.д. [7].

Для применения сенсорных панелей на транспорте имеются разработки устройства сенсорного ввода с интегрированными дактилоскопическими датчиками в конструктиве сенсорного экрана бортовой панели [8]. Такие панели позволяют удовлетворить требованиям по виброустойчивости, безопасности при возникновении дорожно-транспортных происшествий, интеграции в бортовые панели управления транспортными средствами и другим специфичным для возимой аппаратуры параметрам.

К *программным аналогам* можно отнести систему «Электронная пропись» [9] для коррекции почерка. Эта система предназначена для работы в первую очередь с резистивными экранами или электронными ручками. За счет анализа последовательности написания символов система определяет отклонения в каллиграфии и позволяет подстраивать методику коррекции как для школьников, так и для взрослых пользователей, например, для тренировки космонавтов [10].

Ц е л ь р а б о т ы – создать систему анализа данных, вводимых посредством инфракрасной сенсорной панели, с использованием нейронной сети, решающей задачу распознавания рукописных символов.

Для разработки нейронной сети была использована библиотека NumPy [11]. Ее основное применение в разработанной программе – действия с матрицами. Также использована библиотека SciPy, реализующая сигмоидальную активационную функцию. Для увеличения производительности аппаратную часть можно заменить или дополнить специализированными нейронными ускорителями [12]. Например, тензорные процессоры позволяют многократно уменьшить время обучения нейронной сети по сравнению с вычислителями общего пользования [13].

Реализация системы распознавания рукописного символа на сенсорной матрице

Нейронная сеть реализована как класс в отдельном файле. Сначала была описана инициализация нейронной сети. Размер всех слоев задается при создании объекта. Входной слой зависит от входных данных. Так, при матрице 28×28 число нейронов во входном слое будет равно 784. Число нейронов в скрытом слое было подобрано экспериментальным путем. В выходном слое находится столько нейронов, сколько возможных результатов можно получить, определяя цифру, т.е. 10.

На основе выбранного числа нейронов в слоях были построены матрицы весовых коэффициентов связей нейронов. Таких матриц создано две: матрица связей между входным и скрытым слоями (ее размерность равна произведению числа нейронов скрытого слоя и числа нейронов входного слоя) и матрица связей между скрытым и выходным слоями (ее размерность равна произведению числа нейронов выходного слоя и числа нейронов скрытого слоя).

После создания матриц их необходимо заполнить случайными значениями. Для каждой связи задается случайное значение от –0,5 до 0,5. Здесь возможно использовать случайные значения, основанные на различных законах распределения. Популярной методикой является использование нормального распределения с центром в нуле.

Далее необходимо задать функцию активации для нейронов. В качестве функции активации была использована сигмоида (стандартно для такой задачи). Это значение выведено в отдельную переменную, чтобы иметь возможность при желании ее изменить. На этом инициализация нейронной сети завершена.

Рассмотрим метод запроса и метод обучения матрицы. Прежде всего был реализован метод запроса, так как он необходим для метода обучения.

Метод запроса принимает на вход одномерный массив, содержащий описание изображения. Для дальнейших матричных расчетов преобразуем его в матрицу и транспонируем ее.

Остается рассчитать переход сигналов между слоями нейронной сети. Для каждого перехода алгоритм одинаковый. Сначала рассчитывается сигнал на входе в слой, при этом учитываются весовые коэффициенты связей. Для этого нужно перемножить матрицу сигнала с матрицей коэффициентов. Затем рассчитывается сигнал, выходящий из слоя, и учитывается функция активации. Для этого надо применить каждое значение сигнала к функции активации. После прохождения сигнала через все слои нейронной сети будет получен результат. Индекс выходного массива с самым большим значением и есть ответ сети.

За основу *метода обучения* нейронной сети взят метод запроса, так как начало обучения аналогично запросу, однако добавлен еще один входной аргумент – маркерный массив.

Обучение основано на методе обратного распространения ошибки методом градиентного спуска. Для начала нужно найти ошибку – разность между маркерным массивом и выходным результатом. Реализуем этот процесс в виде разности матриц поэлементно. Далее рассчитывается обратное распространение ошибки для узлов скрытого слоя. Для распределения ошибки между узлами пропорционально весовым коэффициентам нужно перемножить транспонированную матрицу весовых коэффициентов и матрицу ошибок [2]. Теперь есть все необходимое для уточнения весовых коэффициентов для каждого слоя. Для этого воспользуемся формулой

$$\Delta W_{jk} = \alpha E_k f_{\text{активации}}(O_k)\left[1 - f_{\text{активации}}(O_k)\right] O_j^{\mathrm{T}},$$

где α – коэффициент скорости обучения; E_k – матрица ошибок; O_k – матрица выходных значений узла; O_j – матрица входных значений.

Дополнительно были добавлены методы сохранения и загрузки весовых коэффициентов в файл, чтобы иметь возможность сохранять удачные комбинации коэффициентов и затем использовать их снова.

После создания нейронной сети был добавлен вызов ее кода в главный файл программы. Для работы с нейронной сетью создан отдельный поток. Поток может работать в двух режимах: 1) режиме запроса нейронной сети; 2) режиме записи набора данных. В первом режиме создается экземпляр нейронной сети, загружаются сохраненные коэффициенты и проводится запрос. Вывод передается главному процессу для отображения в интерфейсе. Во втором режиме добавляется запись в набор. Запись составляется подобно записям из набора MNIST.

Экспериментальные исследования системы распознавания рукописного символа на сенсорной матрице

После разработки и тестирования основного функционала программы были добавлены функции, упрощающие взаимодействие пользователя с программой и расширяющие ее возможности.

Реализована настройка и вызов сторонних приложений. Была добавлена возможность использовать каждый символ в качестве короткого пути к любому доступному приложению или файлу на ПК. С помощью SQLite базы данных создана таблица, которая хранит в себе привязку символа к вызываемому файлу. Также имеется флаг активности, для того чтобы включать/выключать функционал по необходимости. На рис. 1 показана функция добавления вызова сторонних файлов.

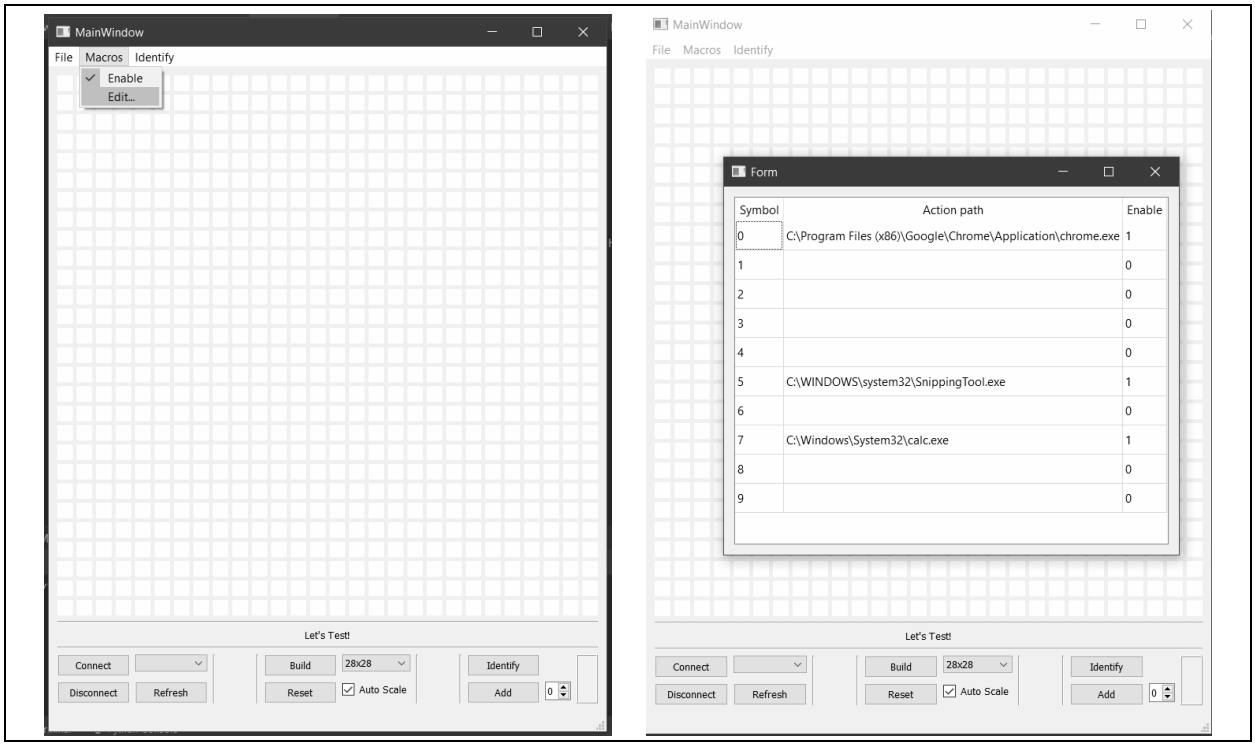


Рис. 1. Графическое представление функции добавления вызова сторонних файлов

Fig. 1. Graphical representation of the function of adding a call to third-party files

Для пользовательской настройки данного функционала реализовано модальное окно, в котором расположена интерактивная таблица. Таблица связана с базой данных.

Реализовано автоматическое определение размера матрицы. При установлении соединения «Модуль управления» единожды отправляет информацию о размере подключенной матрицы. Это сообщение перехватывается на этапе открытия порта программой. Если выбран режим автоматического изменения размера, то матрица перестроится перед тем, как принимать новые данные. Иначе сообщение будет получено, но матрица перестроена не будет.

Реализовано автоматическое распознавание символа. Данная функция автоматически активирует распознавание введенных данных после определенного времени отсутствия ввода новых значений. Время ожидания можно задать в настройках данной функции. Так же реализована автоматическая очистка введенных значений.

Для обучения и тестирования нейронной сети был использован набор данных MNIST. Однако содержащиеся там изображения не бинарные. Поэтому необходимо из монохромного изображения сделать битовую карту. На рис. 2 показано графическое представление бинаризации изображения.

Число, определяющее порог бинаризации, выбирается исходя из размеров узлов устройства ввода так, чтобы толщина линий рисунка была приближена к толщине линий с матрицы приемного устройства. Для тестов выберем порог равным 170. При данном пороге в моделируемой матрице одним пальцем перекрывается сразу два соседних приемника.

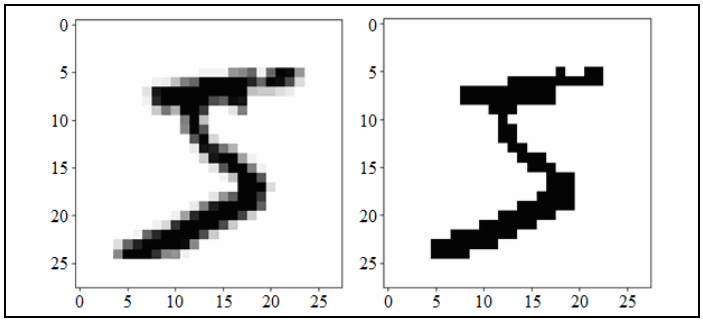


Рис. 2. Графическое представление бинаризации изображения

Fig. 2. Graphical representation of image binarization

В конце подготовки данных проводится масштабирование. Данные распределяются в пределах от 0,01 до 1. На основе этих приемов подготовки данных был написан алгоритм обучения нейронной сети.

Обучение на одном обучающем наборе данных называют *эпохой*. При этом предусмотрена возможность выбора числа эпох. Увеличивая число эпох, можно улучшить эффективность сети, однако не стоит увлекаться. При большом числе эпох происходит переобучение – тяготение сети к обучающим данным и плохая работа с тестовыми или рабочими данными.

Оценка качества обучения будет выявляться на тестовом наборе данных. Для большей объективности оценки точности сети тестовые данные не должны содержать данные из обучающего набора. Эффективность сети будет равна проценту верных ответов из всех попыток.

Результаты обучения нейронной сети

Сначала сеть была обучена на одной эпохе, но с разными скоростями обучения. Графическое представление эффективности сети в этом случае показано на рис. 3. После нескольких попыток наилучший результат составил 94%.

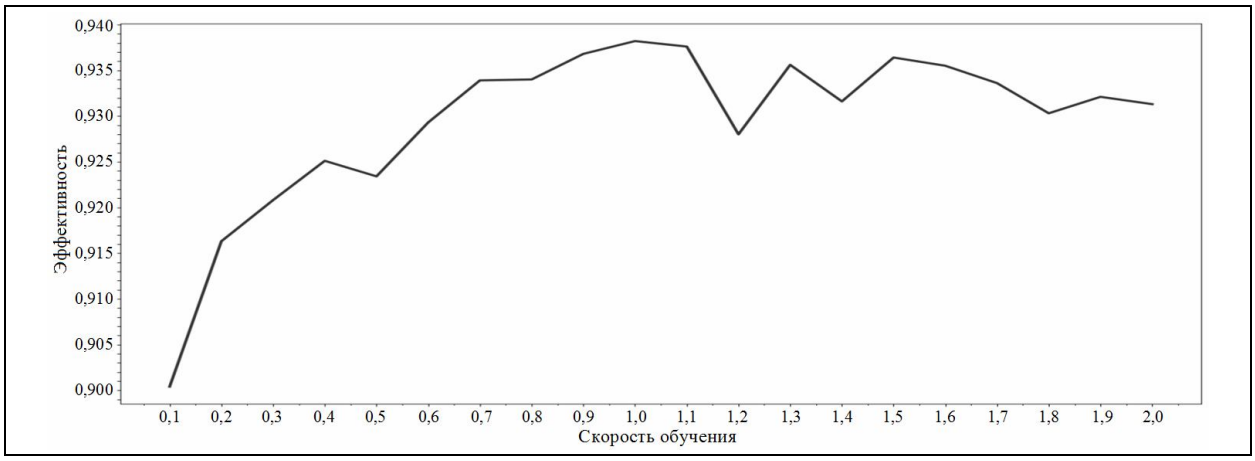


Рис. 3. Графическое представление эффективности сети при одной эпохе обучения с различной скоростью обучения

Fig. 3. Graphical representation of the network efficiency for one learning epoch with different learning rates

Как видно из рис. 3, лучший результат достигнут при скорости обучения, равной 1,0. Он не удовлетворяет требованиям, поэтому продолжим его улучшать.

Для этого число эпох было увеличено до 20. Скорость обучения постоянна и равна 1,0, как самая эффективная из предыдущего теста. Графическое представление эффективности обучения нейронной сети на каждой эпохе показано на рис. 4, откуда видно, что улучшение результата происходит до шестой эпохи, а затем эффективность снижается. Такое поведение сети называется *переобучением*. Лучший результат составил 95,1%, что уже удовлетворяет требованиям. Однако эксперимент был продолжен.

Необходимо совместить увеличенное число эпох с изменением скорости обучения. При переходе к последующим эпохам скорость обучения будет уменьшаться, чтобы подойти ближе к минимуму функции ошибки. На начальных этапах, наоборот, можно увеличить скорость, чтобы быстрее приблизиться к хорошему результату и избежать локальных минимумов ошибки. Скорость обучения будет уменьшаться, начиная с шестой эпохи, на 0,05, доходя до 0. На рис. 5 дано графическое представление эффективности обучения сети на 20 эпохах с изменением скорости обучения.

Результат удалось улучшить до 95,5%. Действуя в этом направлении, можно достичь лучшего результата. Но есть еще один действенный метод улучшить эффективность нейронной сети – увеличить число нейронов скрытого слоя. На рис. 6 показана эффективность обучения нейронной сети с постепенным увеличением числа нейронов скрытого слоя с шагом 50. Необходимо учитывать фактор случайности при обучении сети, однако наблюдается закономерность, что с увеличением нейронов скрытого слоя увеличивается и эффективность сети. Для одной эпохи с одинаковой скоростью обучения лучший результат был достигнут на 500 нейронах и составил 94,57%.

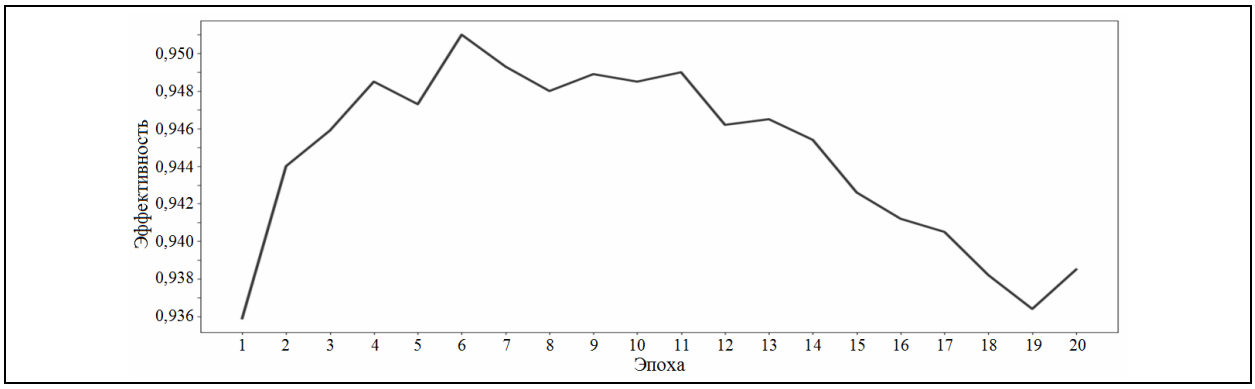


Рис. 4. Графическое представление эффективности обучения нейронной сети на 20 эпохах с постоянной скоростью обучения

Fig. 4. Graphical representation of neural network training efficiency during 20 epochs with constant learning rate

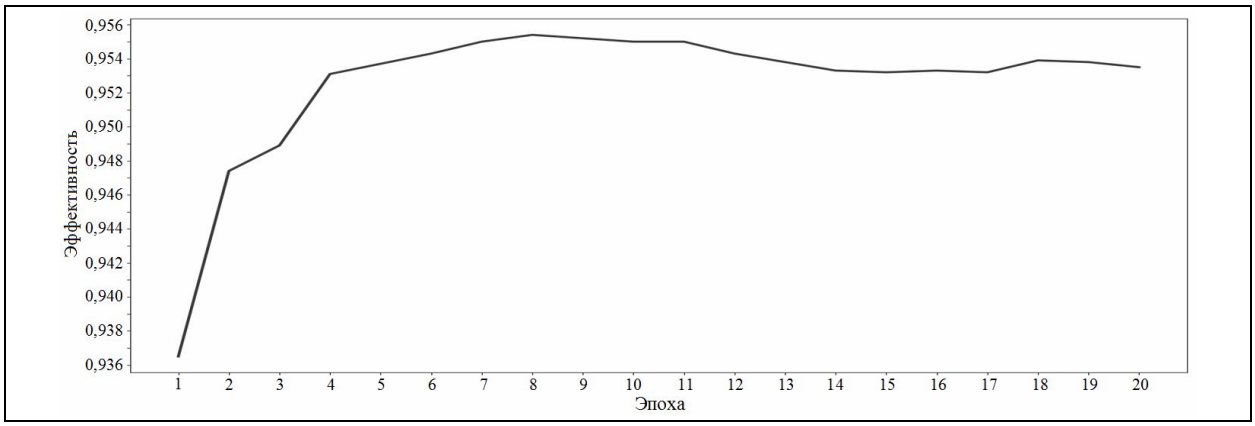


Рис. 5. Графическое представление эффективности обучения нейронной сети на 20 эпохах с изменением скорости обучения

Fig. 5. Graphical representation of neural network training efficiency during 20 epochs with changing the learning rate

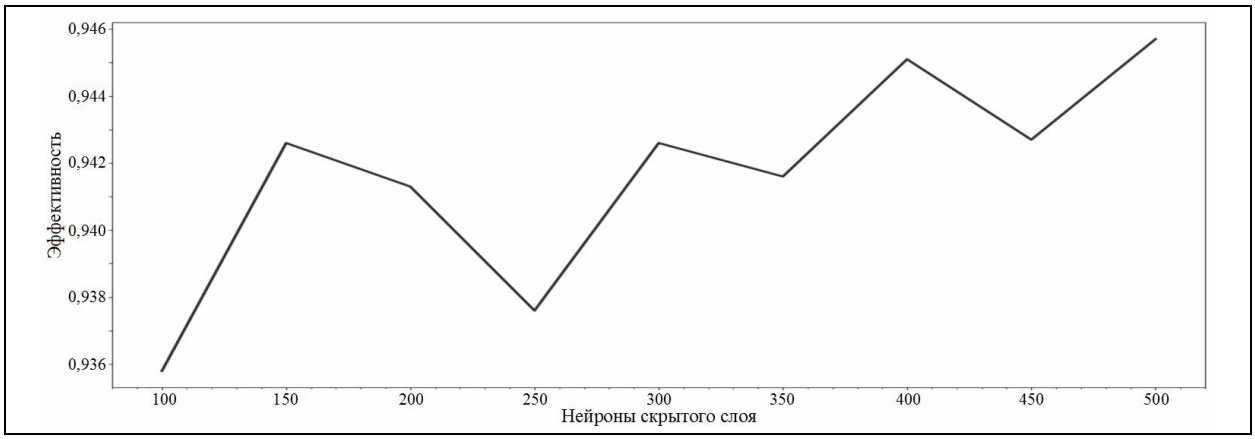


Рис. 6. Графическое представление эффективности обучения нейронной сети с постепенным увеличением числа нейронов скрытого слоя

Fig. 6. Graphical representation of neural network training efficiency with gradual increase in number of hidden layer neurons

Можно и дальше увеличивать число нейронов скрытого слоя, однако растут вычислительная сложность и время обучения. При увеличении нейронов в сети число эпох для качественного обучения также возрастет, так как ошибка будет распределяться между большим числом коэффициентов.

При обучении сети необходимо найти компромисс между точностью и сложностью вычислений. С использованием всех вышеописанных методов было проведено несколько попыток обучения нейронной сети. На рис. 7 показаны результаты оценки эффективности такого обучения.

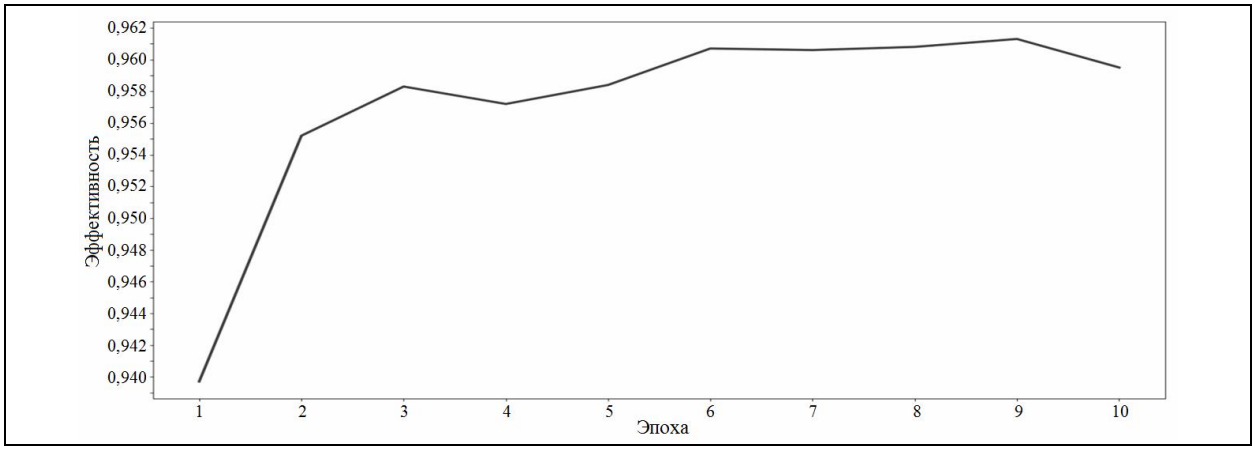


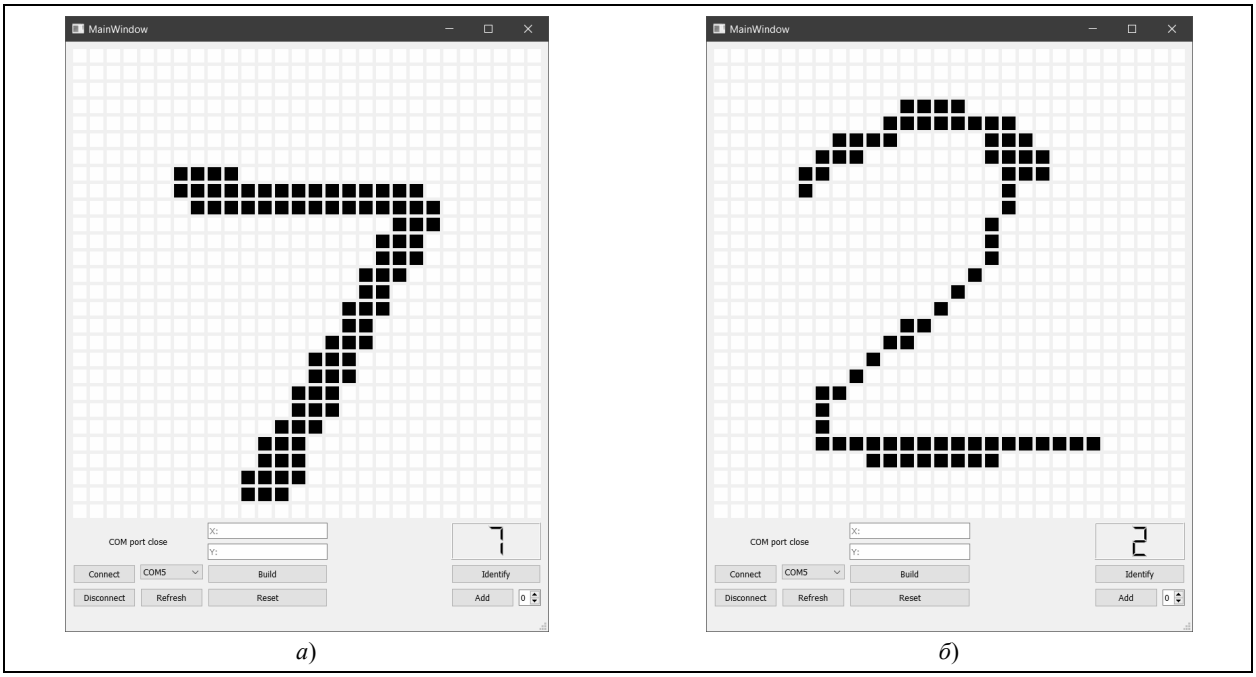
Рис. 7. Графическое представление эффективности обучения нейронной сети

Fig. 7. Graphical representation of neural network training efficiency

В результате удалось достигнуть 96% эффективности нейронной сети. Это хороший результат, полностью удовлетворяющий функциональным требованиям. Дальнейшее улучшение точности возможно, однако требует нерациональных вложений времени или вычислительных ресурсов.

Тестирование системы распознавания рукописного символа на сенсорной матрице

По окончании разработки необходимо провести функциональное тестирование системы (рис. 8), которое задействует весь ее функционал.



а) *б*)

Рис. 8. Тестирование системы: *а* – прием данных с внешнего устройства; *б* – ввод данных с ПК

Fig. 8. System testing: *a* – receiving data from an external device; *b* – data input from PC

Для тестирования макета устройства он подключается к ПК через доступный COM-порт. Программа выводит отображение введенных данных. Для определения введенной цифры нажимаем на кнопку Identify. Результат отображается в цифровом окне над кнопкой. Результат соответствует введенной цифре. Затем повторяем тест, но вводим значение с помощью компьютерной мыши. Символ также определился. Время, затрачиваемое на распознание символа, очень мало, визуально не чувствуется какой-либо задержки. Так же были проведены тесты с подключением инфракрасной сенсорной панели [3].

Заключение

Представлены результаты разработки программной системы анализа данных ввода инфракрасной сенсорной панели. Проведен обзор использованных инструментов для разработки программного обеспечения. Разработан общий алгоритм работы ПО, и выделены основные функциональные блоки программы: графический интерфейс, программа чтения COM-порта, нейронная сеть.

Разработан графический интерфейс, визуализирующий используемую сенсорную матрицу и отображающий функциональные кнопки, поля ввода и вывода данных. Интерфейс состоит из основного рабочего окна, окна просмотра и настройки макросов и окна настройки таймера автоидентификации.

Разработан блок программы, позволяющий создать нейронную сеть по заданным настройкам, сделать в нее запрос и обучить. Разработан дополнительный функционал программы, позволяющий запускать внешние файлы по введенному символу, частично автоматизирующий работу программы, помогая пользователю. Проведено функциональное тестирование всех разработанных модулей в отдельности и программы в целом. Проведены эксперименты, в которых выполнялось обучение нейронной сети с разными настройками и параметрами обучения, к которым относятся число эпох обучения, скорость обучения, число нейронов скрытого слоя. В результате проделанных экспериментов были выявлены факторы, влияющие на качество обучения нейронной сети.

По итогам обучения был получен набор коэффициентов, обеспечивающий стабильную работу нейронной сети. Точность работы нейронной сети составила 96%, а скорость распознавания меньше секунды.

Список источников

1. *Тарик Р.* Создаем нейронную сеть: Пер. с англ. СПб.: ООО «Альфа-книга». 2017.
2. *Власов А.И., Папулин С.Ю.* Анализ данных с использованием гистограммной модели комбинации признаков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2019. Т. 21. № 5. С. 18–27.
3. *Джоши П.* Искусственный интеллект с примерами на Python: Пер. с англ. СПб.: ООО «Диалектика». 2019.
4. *Власов А.И., Кривошеин А.И., Терентьев Д.С., Шахнов В.А.* Исследование конденсаторной решетки композитной емкостной сенсорной панели // Российская микроэлектроника. 2018. Т. 47. № 5. С. 299–306.
5. *Демин А.А., Терентьев Д.С., Шахнов В.А.* Альтернативная технология изготовления сенсорного емкостного экрана // Датчики и системы. 2013. № 9 (172). С. 56–64.
6. *Терентьев Д.С., Власов А.И., Токарев С.В.* Проекционно-емкостной сенсорный экран для встраиваемых мобильных систем // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2013. № 1 (21). С. 16–26.
7. *Власов А.И., Терентьев Д.С., Шахнов В.А.* Графеновый гибкий сенсорный экран со встроенным аналого-цифровым преобразователем // Российская микроэлектроника. 2017. Т. 46. № 3. С. 192–199.
8. *Терентьев Д.С., Власов А.И.* Бортовые сенсорные панели с дактилоскопическими датчиками на транспорте // Датчики и системы. 2014. № 4 (179). С. 45–55.
9. *Демин А.А.* Методы автоматизированной оценки каллиграфии // Программные продукты и системы. 2011. № 1. С. 20–23.
10. *Демин А.А., Власов А.И., Шахнов В.А.* Методы и средства визуальных упражнений для адаптивной коррекции тонкой моторики кистей рук в условиях невесомости // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 3 (102). С. 23–38.
11. *Балухто А.Н., Булаев В.И., Бурый Е.В.* и др. Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений. Сер. Библиотека журнала «Нейрокомпьютеры: разработка, применение». Т. 7. М.: Радиотехника. 2003.
12. *Шахнов В.А., Власов А.И., Поляков Ю.А., Кузнецов А.С.* Нейрокомпьютеры: архитектура и схемотехника. Сер. Приложение к журналу «Информационные технологии». № 9. М.: Машиностроение. 2000.
13. *Власов А.И.* Аппаратная реализация нейровычислительных управляющих систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 1999. № 2. С. 61–65.

Информация об авторах

Дмитрий Андреевич Аминев – к.т.н., ст. науч. сотрудник
SPIN-код: не представлен
Валентин Алексеевич Данилевич – магистрант
SPIN-код: не представлен
Алексей Анатольевич Демин – к.т.н., доцент
SPIN-код: не представлен
Абдулкадер Самман – аспирант
SPIN-код: не представлен

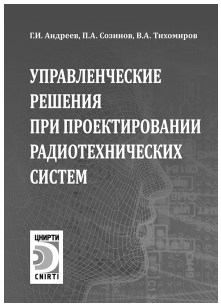
Поступила в редакцию 17.11.2020.
Одобрена после рецензирования 04.12.2020.
Принята к публикации 17.12.2020.

Уважаемые читатели!

В Издательстве «Радиотехника» вышли книги

Андреев Г.И., Созинов П.А., Тихомиров В.А.

Управленческие решения при проектировании радиотехнических систем



Монография
Под ред. *П.А. Созинова*
DOI 10.18127/B9785931081731
ISBN 978-5-93108-173-1

Впервые достаточно подробно раскрыты основные положения теории проектирования и рассмотрены вопросы методологии создания систем автоматизированного проектирования, принципиальные положения которой реализованы в обобщенной методике организации процесса проектирования радиотехнических систем. Осуществлена детальная проработка теоретических положений по реализации методов верификации в автоматизированной процедуре проверки выполнения требований к программно-аппаратным комплексам автоматизированного проектирования. Большое внимание уделено вопросам формирования собственных и внешних оснований теории проектирования, при этом существенно детализирована концепция формирования оснований математической модели стратегического прогноза и оценки эффективности принимаемых проектных решений.

Для аспирантов, научных сотрудников и руководителей, деятельность которых связана с проектированием и управлением техническими, экономическими и социальными процессами.

Анцев Г. В., Сарычев В. А.

Системы самонаведения высокоточного оружия
Тезаурус

Справочное издание
DOI 10.18127/B9785931081946
ISBN 978-5-93108-194-6

Уникальное издание, не имеющее аналогов и включающее результаты многолетнего исследования, позволившего пересмотреть некоторые традиционные представления в области высокоточного оружия. Словарь включает тщательно сбалансированный подбор более 80 000 современных дефиниций и устойчивых словосочетаний с доступным определением и объяснением значений, новые тематические вкладки, учитывает новейшие разработки науки и информационных технологий в области высокоточного оружия и его статуса, систем наведения ВТО, миссии самонаведения ракетного ВТО, оптико-электронных систем самонаведения ВТО. Является прекрасным дополнением к различным курсам по высокоточному оружию.

Адрес Издательства: 107031 Москва, Кузнецкий мост, 20/6
Тел./факс (495) 625-92-41, тел.: (495) 625-78-72, 621-48-37

Original article

Recognition of handwritten characters on the sensor matrix using a neural network

D. A. Aminev[1], **V. A. Danilevich**[2], **A. A. Demin**[3], **A. Samman**[3]
[1] V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS (Moscow, Russia)
[2–4] Department IU4 of Designing and Technology of Electronic Equipment,
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
[1, 2] info@iu4.bmstu.ru, [3] fiz.alex@gmail.com, [4] abdulkadersamman1992@gmail.com

Abstract

Nowadays, touch displays are becoming more common. This design combines an input device and an output device, and also allows you to create the most convenient interfaces for interacting with the user. Input recognition significantly expands the functionality of touch input, providing the ability to apply recognition of entered characters to launch a variety of functions and applications. Such systems existing today are not flexible enough in configuration and use.

This paper presents the process of developing an infrared touch panel input data analysis system. A neural network is configured and trained to solve the problem of recognizing handwritten characters. The functional purpose of the program units has been briefly presented: graphical interface, COM-port reader, neural network. A graphical interface has been developed that visualizes the used touch matrix and displays function buttons, input and output fields. The interface consists of a main work window, a macro view and setup window, and an auto-identification timer setup window. A program block has been developed that allows you to create a neural network according to given settings, make a request to it and train it. Additional program functionality has been developed that allows you to run external files using the entered symbol, partially automating the program, helping the user. All developed modules have been functionally tested individually and the entire program together. Principles of neural networks training have been analyzed. Experiments have been carried out in which training of a neural network with different settings and training parameters is implemented. Among these parameters are: the number of epochs of learning, the speed of learning, the number of neurons of the hidden layer. As a result of the experiments performed, factors affecting the quality of neural network training have been identified. As a result of the training, a set of coefficients has been obtained that ensures stable operation of the neural network. The accuracy of the neural network is 96%, and the recognition speed is less than a second.

Keywords

Touch screen, input device, programming, development of window applications, neural networks.

For citation

Aminev D.A., Danilevich V.A., Demin A.A., Samman A. **Recognition of handwritten characters on the sensor matrix using a neural network. Neurocomputers. 2021. Vol. 23. No. 1. P. 32–42. DOI: 10.18127/j19998554-202101-04. (in Russian)**

References

1. *Tarik R.* Sozdaem nejronnuyu set': Per. s angl. SPb.: OOO «Al'fa-kniga». 2017. (in Russian)
2. *Vlasov A.I., Papulin S.Yu.* Analiz dannykh s ispol'zovaniem gistogrammnoj modeli kombinatsii priznakov. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. 2019. T. 21. № 5. S. 18–27. (in Russian)
3. *Dzhoshi P.* Iskusstvennyj intellekt s primerami na Python: Per. s angl. SPb.: OOO «Dialektika». 2019. (in Russian)
4. *Vlasov A.I., Krivoshein A.I., Terent'ev D.S., Shakhnov V.A.* Issledovanie kondensatornoj reshetki kompozitnoj emkostnoj sensornoj paneli. Rossijskaya mikroelektronika. 2018. T. 47. № 5. S. 299–306. (in Russian)
5. *Demin A.A., Terent'ev D.S., Shakhnov V.A.* Al'ternativnaya tekhnologiya izgotovleniya sensornogo emkostnogo ekrana. Datchiki i sistemy. 2013. № 9 (172). S. 56–64. (in Russian)
6. *Terent'ev D.S., Vlasov A.I., Tokarev S.V.* Proektsionno-emkostnoj sensornyj ekran dlya vstraivaemykh mobil'nykh system. Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii. 2013. № 1 (21). S. 16–26. (in Russian)
7. *Vlasov A.I., Terent'ev D.S., Shakhnov V.A.* Grafenovyj gibkij sensornyj ekran so vstroennym analogo-tsifrovym preobrazovatelem. Rossijskaya mikroelektronika. 2017. T. 46. № 3. S. 192–199. (in Russian)
8. *Terent'ev D.S., Vlasov A.I.* Bortovye sensornye paneli s daktiloskopicheskimi datchikami na transporte. Datchiki i sistemy. 2014. № 4 (179). S. 45–55. (in Russian)
9. *Demin A.A.* Metody avtomatizirovannoj otsenki kalligrafii. Programmnye produkty i sistemy. 2011. № 1. S. 20–23. (in Russian)
10. *Demin A.A., Vlasov A.I., Shakhnov V.A.* Metody i sredstva vizual'nykh uprazhnenij dlya adaptivnoj korrektsii tonkoj motoriki kistej ruk v usloviyakh nevesomosti. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie. 2015. № 3 (102). S. 23–38. (in Russian)
11. *Balukhto A.N., Bulaev V.I., Buryj E.V.* i dr. Nejrokomp'yutery v sistemakh obrabotki izobrazhenij. Ser. Biblioteka zhurnala «Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie». T. 7. M.: Radiotekhnika. 2003. (in Russian)
12. *Shakhnov V.A., Vlasov A.I., Polyakov Yu.A., Kuznetsov A.S.* Nejrokomp'yutery: arkhitektura i skhemotekhnika. Ser. Prilozhenie k zhurnalu «Informatsionnye tekhnologii». № 9. M.: Mashinostroenie. 2000. (in Russian)
13. *Vlasov A.I.* Apparatnaya realizatsiya nejrovychislitel'nykh upravlyayushchikh system. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 1999. № 2. S. 61–65. (in Russian)

Information about the authors

Dmitriy A. Aminev – Ph.D. (Eng.), Senior Research Scientist
Valentin A. Danilevich – Undergraduate Student
Aleksey A. Demin – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Abdulkader Samman – Post-graduate Student

The article was submitted 17.11.2020.
Approved after reviewing 04.12.2020.
Accepted for publication 17.12.2020.

Научная статья
УДК 004.934.2
DOI: 10.18127/j19998554-202101-05

Использование рекуррентных нейронных сетей для вероятностной классификации архитектуры процессора исполняемых файлов

А. А. Гладких[1], **М. О. Комахин**[2], **А. В. Симаньков**[3], **Д. А. Узеньков**[4]
[1, 2, 4] кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»
МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)
[1–4] ООО«ИНФОРИОН» (Москва, Россия)
[1] a.gladkikh@inforion.ru, [2] m.komakhin@inforion.ru, [3] a.simankov@inforion.ru, [4] uzen.demid@gmail.com

Аннотация

Постановка проблемы. Основная проблема применения рекуррентных нейросетей к задаче классификации архитектур процессора заключается в том, что использование рекуррентной нейронной сети осложнено отсутствием блоков, позволяющих запоминать и учитывать результат работы на каждом следующем шаге. Для решения этой проблемы авторами предложена стратегия использования нейронной сети на базе механизма управляемых рекуррентных блоков. У каждого нейрона такой сети есть клетка памяти, в которой хранится предыдущее состояние и несколько фильтров. Фильтр обновления определяет, сколько информации останется от прошлого состояния и сколько будет взято из предыдущего слоя. Фильтр сброса определяет, какое количество информации о предыдущих состояниях будет потеряно.

Цель. Повысить эффективность классификации архитектуры процессора по коду из исполняемых файлов, запущенных на этом процессоре, за счет создания методов, алгоритмов и программ, инвариантных к постоянным данным (строки, константы, заголовочные секции, секции данных, отступы), содержащимся в исполняемых файлах.

Результаты. Исследованы особенности применения рекуррентных нейронных сетей на примере задачи классификации архитектуры процессора по исполняемому коду из скомпилированных исполняемых файлов. Кратко рассмотрены особенности машинного кода различных архитектур процессоров, используемых в современной вычислительной технике. Предложено использование рекуррентных нейронных сетей, которые имеют преимущества по скорости и точности в решении задач классификации. Сделаны выводы о результатах измерения метрик качества работы алгоритма и возможности расширения функциональности без внесения изменений в архитектуру программного комплекса.

Практическая значимость. Разработанный метод на основе нейросети с механизмом управляемых рекуррентных блоков реализован в программном комплексе, позволяющем обрабатывать цифровые данные из исполняемых файлов для различных архитектур процессоров, в частности, на начальном этапе проведения аудита безопасности встраиваемых систем с целью определения набора технических средств, которые возможно применить для анализа на последующих этапах.

Ключевые слова

Искусственный интеллект, нейронные сети, рекуррентные нейронные сети, классификация архитектур процессора, анализ исполняемых файлов.

Для цитирования

Гладких А.А., Комахин М.О., Симаньков А.В., Узеньков Д.А. **Использование рекуррентных нейронных сетей для вероятностной классификации архитектуры процессора исполняемых файлов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 43–49. DOI: 10.18127/j19998554-202101-05.**

Введение

В настоящее время в мировой практике наметилась тенденция создания полностью автоматизированных производственных линий и автоматизированных технологических процессов управления объектами критической инфраструктуры. С ростом числа автоматизированных систем растет и потребность в исследовании безопасности таких систем. Исследователи безопасности занимаются среди прочего изучением бинарных файлов, исполняемых на устройствах, использующихся в сфере автоматизации. Для решения различных задач, связанных с обеспечением информационной безопасности, а также для определения и поиска недокументированных возможностей во встроенном программном обеспечении зачастую требуется изучение внутреннего программного обеспечения без доступа к исходным кодам программного обеспечения.

© Гладких А.А., Комахин М.О., Симаньков А.В., Узеньков Д.А., 2021

Таким образом, одной из задач, которая возникает в ходе изучения внутреннего программного обеспечения устройств, является определение архитектуры процессора, который лежит в основе системы. Это трудоемкая задача, поэтому начальный этап процесса исследования становится дорогостоящим и длительным, так как не может быть полностью автоматизирован. Классическим решением подобной задачи является полный перебор всех доступных к анализу архитектур, а определение корректности результата зависит от опыта исследователя.

Методы машинного обучения получают все большее распространение во всех направлениях развития информационно-телекоммуникационных технологий. Как следствие, аналогичный вектор развития имеет и сфера информационной безопасности. Типовой этап анализа скомпилированного кода с целью определения архитектуры процессора, на котором исполняется этот код, может быть также частично или полностью автоматизирован, в том числе и при помощи использования рекуррентных нейронных сетей. Этот этап является частью «критического пути» в проектах исследования критической инфраструктуры, именно в ходе него определяется возможность использования тех или иных технических средств (дизассемблеры, отладчики и т.д.) на следующих этапах аудита безопасности.

Автоматизация типового этапа способна существенно сократить необходимое время для проведения анализа встроенного программного обеспечения устройства, что приведет к снижению себестоимости проведения исследования и повысит вероятность правильной классификации исследуемого внутреннего программного обеспечения на класс «содержащее недокументированную функциональность» и «безопасное».

В настоящее время на рынке программных продуктов не представлено программ, которые реализуют подобную функциональность. Существуют программные решения, которые способны частично решить проблемы, с которыми сталкиваются исследователи безопасности на начальных этапах анализа. К таким программным средствам можно отнести встроенные механизмы в программе IDAPro, программу BinDiff. Однако проблема автоматизированной классификации архитектуры процессора по коду программного обеспечения полностью не решена ни в одном из существующих программных средств.

Ц е л ь р а б о т ы – повысить эффективность классификации архитектуры процессора по коду из исполняемых файлов, запущенных на этом процессоре, за счет создания методов, алгоритмов и программ, инвариантных к постоянным данным (строки, константы, заголовочные секции, секции данных, отступы), содержащимся в исполняемых файлах.

Для решения поставленных задач использованы методы искусственного интеллекта, теории искусственных нейронных сетей, рекуррентные нейронные сети, теория вероятности и математическая статистика.

Структура нейронной сети на базе механизма управляемых рекуррентных блоков

Внутреннее программное обеспечение любого электронного устройства представляет собой машинный код, описанный с помощью набора байт. В то же время механизм управляемых вентилей для рекуррентных нейронных сетей показывает свою эффективность именно при решении задач в моделировании различных последовательностей: обработка текстов, обработка речевых сигналов. Таким образом, задача обработки машинных команд может быть сведена к задаче обработки последовательности байт, исполняемых процессором в момент работы устройства.

Концептуальная структура нейронной сети на базе механизма управляемых рекуррентных блоков представлена на рис. 1. В соответствии с этой схемой была разработана и обучена нейронная сеть. Сеть имеет два входа: вход обновления (Update) и вход сброса (Reset). Эти входы обучаются избирательно фильтровать любую лишнюю информацию, сохраняя при этом то, что содержит полезные признаки. Эти элементы являются векторами, содержащими значения от 0 до 1, которые будут умножены на входные данные и/или скрытое состояние. Значение 0 на входе показывает, что соответствующие данные на входном или скрытом векторе не важны и, следовательно, будут возвращать 0. Значение 1 в векторе затвора указывает на то, что соответствующие данные важны и будут использоваться.

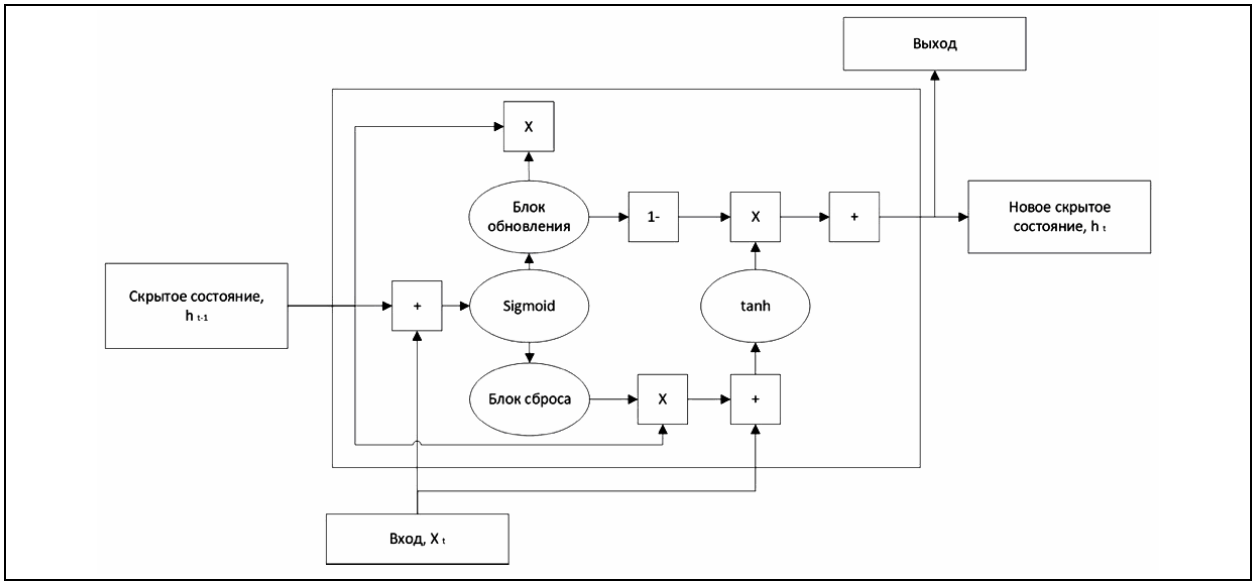


Рис. 1. Структура рекуррентной нейронной сети на базе механизма управляемых рекуррентных блоков

Fig. 1. Structure of a recurrent neural network based on the mechanism of controlled recurrent blocks

Обучение нейронной сети и анализ результатов

Для корректной классификации архитектуры исполняемых файлов необходима качественная база знаний. Во-первых, данные должны отображать большинство набор команд процессора. Во-вторых, каждый класс должен содержать не менее 100 килобайт данных. В-третьих, данные перед использованием необходимо отфильтровать, потому что в исполняемых файлах помимо кодового сегмента существуют такие сегменты, как данные, строки, заголовки, секции смещения (padding), так как они могут встретиться в любом исполняемом файле. При этом 10% данных будут использованы для верификации сети на этапе обучения, а 90% – для самого обучения.

В ходе исследований была сформирована база данных кодового сегмента исполняемых файлов со следующим набором классов: amd64, arm64, armel, armhf, i386, mips, mipsel, padding, ppc64el. Название каждого из классов соответствует существующей архитектуре процессора.

На рис. 2 приведены результаты обучения нейронной сети на базе механизма управляемых рекуррентных блоков. Метрика accuracy – общая точность определения правильного ответа нейронной сетью. Значение accuracy равно числу правильных предположений нейронной сети по отношению к общему числу тестируемых последовательностей байт.

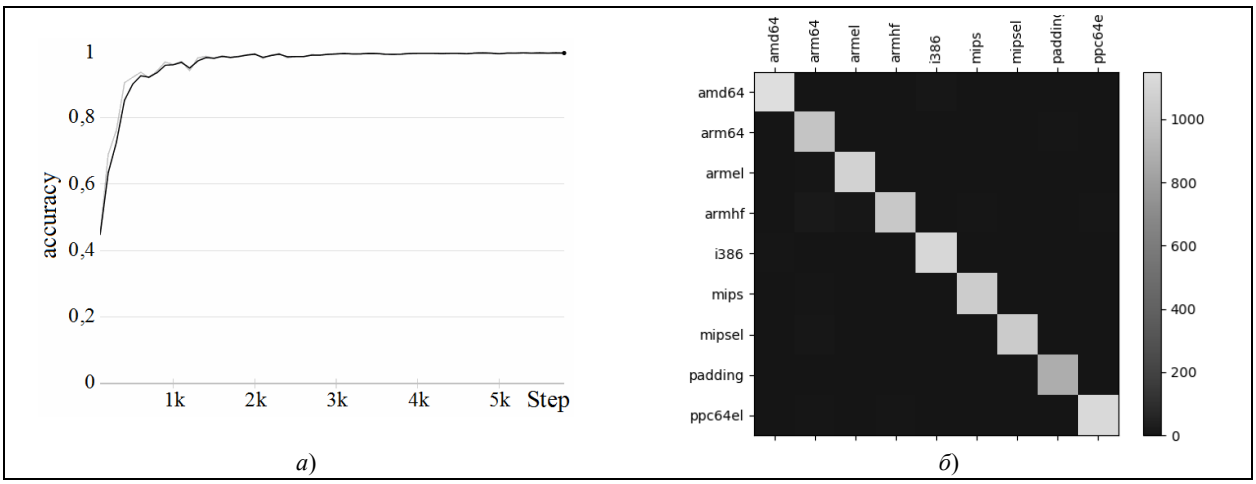


Рис. 2. Графическое представление результатов обучения нейронной сети: *а* – метрика accuracy; *б* – матрица ошибок нейронной сети

Fig. 2. Graphical representation of neural network training results: *a* – accuracy metric; *b* – matrix of neural network errors

Обучение сети было выполнено с использованием оптимизационного алгоритма стохастического градиентного спуска. На рис. 3 показано графическое представление результатов обучения нейронной сети для двух метрик loss: testloss – расхождение между полученным ответом нейронной сети и требуемым значением на верификационном множестве; trainingloss – расхождение между ответом нейронной сети и требуемым значением на тренирующем множестве.

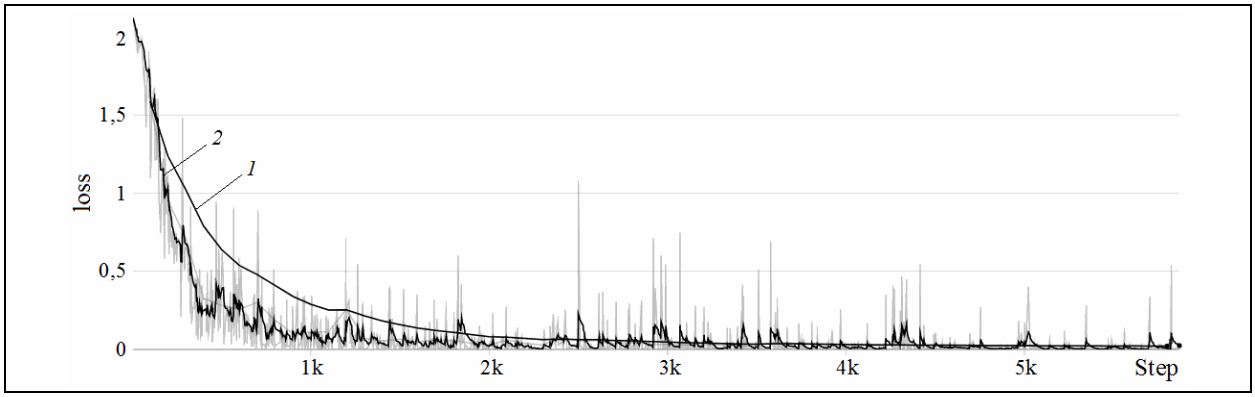


Рис. 3. Графическое представление результатов обучения нейронной сети: кривая *1* – метрика testloss; кривая *2* – trainingloss

Fig. 3. Graphical representation of neural network training results: curve *1* – testloss metric; curve *2* – trainingloss metric

В ходе обучения было выявлено, что точность нейронной сети переступила порог в 99% после 3000 итераций. При этом время обучения такой сети с использованием ускорителя Nvidia Tesla P40 составляет 41 минуту.

На рис. 4 дано графическое представление результатов обучения нейронной сети для двух метрик – recall и precision.

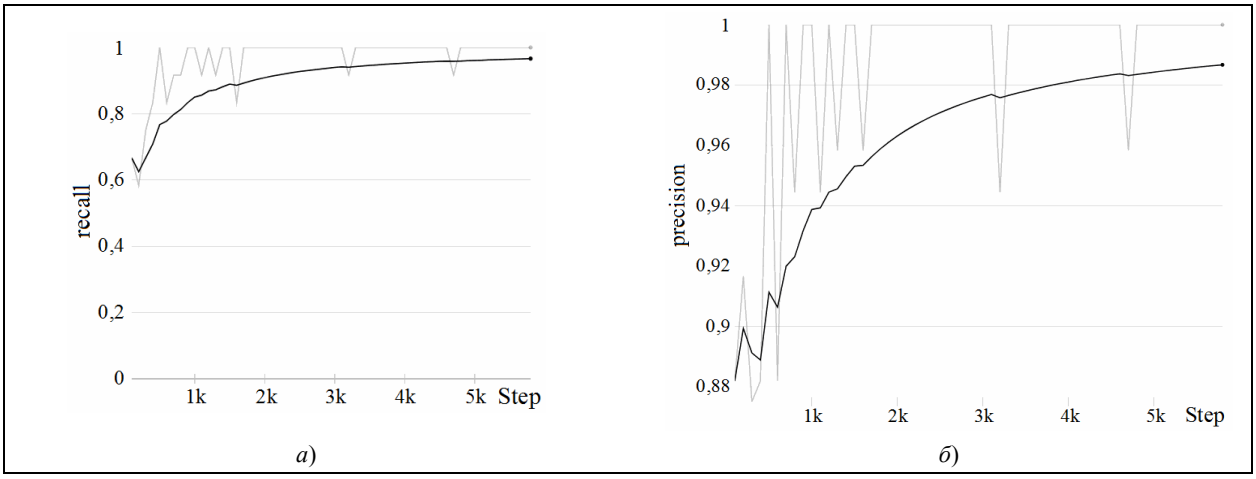


Рис. 4. Графическое представление результатов обучения нейронной сети: *а* – метрика recall; *б* – метрика precision

Fig. 4. Graphical representation of neural network training results: *a* – recall metric; *b* – precision metric

На рис. 4, *а* показана точность определения конкретного класса. Математически данный критерий определяется аналогично критерию accuracy за исключением того, что он вычисляется для каждого конкретного класса и качественно показывает, с какой вероятностью нейронная сеть выдает ответ в виде положительного результата на нужную архитектуру, означающий, что последовательность байт относится именно к этой архитектуре.

На рис. 4, *б* изображен другой критерий, определяемый как отношение числа правильных предположений нейронной сети к числу изображений заданного класса. Качественно этот критерий показывает, какая доля фактических событий этого класса была правильно предсказана.

Обучение проводилось на 504 мегабайт данных, а классификация последовательностей была проведена по девяти различным классам. В результате можно утверждать, что рекуррентная ней-

ронная сеть на базе механизма управляемых рекуррентных блоков способна производить классификацию архитектур с точностью выше 90%, даже обучаясь на небольшой выборке размером 504 мегабайт, при этом конечная точность тем выше, чем выше качество обучающей выборки и больше ее объем.

Заключение

Исходя из полученных результатов для значений критериев accuracy, precision, recall, можно считать, что разработанный подход к определению архитектуры процессора по байтам исполняемого файла с использованием нейросети на базе механизма управляемых рекуррентных блоков эффективен при решении поставленной задачи классификации и может быть использован в качестве инструмента на начальном этапе анализа безопасности внутреннего программного обеспечения электронных систем. Для улучшения результатов классификации и практического использования необходимо обеспечить больший объем обучающей выборки для каждого из классов, а также расширить число классов. Изменений разработанной архитектуры нейронной сети в случае таких доработок не потребуется.

Список источников

1. *Буянов А.И., Власов А.И., Загоскин А.В.* Применение нейросетевых методов при дефектоскопии печатных плат // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2002. № 3. С. 42–70.
2. *Власов А.И., Гриднев В.Н., Константинов П., Юдин А.В.* Нейросетевые методы дефектоскопии печатных плат // Электронные компоненты. 2004. № 8. С. 148–155.
3. *Гриднев В.Н., Сергеева М.Д., Чебова А.И.* Линейные модели распознавания тепловизионных изображений неисправностей электронных ячеек // Контроль. Диагностика. 2014. № 8. С. 57–66.
4. *Вирясова А.Ю., Власов А.И., Гладких А.А.* Нейросетевые методы дефектоскопии интегральных структур // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2019. № 2. С. 54–67.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019618937. Экспертная система по обнаружению дефектов проводящего рисунка печатных плат / *Е.В. Евдокимова, А.Е. Аверьянихин, А.И. Власов.* Опубл. 08.07.2019.
6. *Lawrence S., Giles C.L., Tsoi A.C., Back A.D.* Face recognition: A convolutional neural network approach // IEEE Transactions on Neural Networks. Special Issue on Neural Networks and Pattern Recognition. P. 1–24.
7. *Прохоров В.Г.* Использование сверточных сетей для распознавания рукописных символов // Проблеми програмування. 2008. № 2–3. С. 669–674.
8. *Рысьмятова А.А.* Использование сверточных нейронных сетей для задачи классификации текстов. М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. 2016.
9. *Шахнов В.А., Власов А.И., Поляков Ю.А., Кузнецов А.С.* Нейрокомпьютеры: архитектура и схемотехника / Приложение к журналу «Информационные технологии». № 9. М.: Машиностроение. 2000.
10. *Глушко А.А., Бусов В.Д., Передерин К.Д.* Методы алгоритмического проектирования искусственного интеллекта // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 2. С. 72–88.

Информация об авторах

Алексей Алексеевич Гладких – к.т.н., доцент, руководитель отдела исследований и разработок
SPIN-код: не представлен

Михаил Олегович Комахин – аспирант, исследователь безопасности
SPIN-код: не представлен

Артем Владиславович Симаньков – инженер-исследователь
SPIN-код: не представлен

Демид Алексеевич Узеньков – магистрант, исследователь безопасности
SPIN-код: не представлен

Поступила в редакцию 20.11.2020.
Одобрена после рецензирования 04.12.2020.
Принята к публикации 16.12.2020.

Original article

Using recurrent neural networks for probabilistic classification of the processor architecture of executable files

A. A. Gladkikh[1], **M. O. Komakhin**[2], **A. V. Simankov**[3], **D. A. Uzenkov**[4]
[1, 2, 4] Department IU4 of Designing and Technology of Electronic Equipment,
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
[1–4] JSC "INFORION" (Moscow, Russia)
[1] a.gladkikh@inforion.ru, [2] m.komakhin@inforion.ru, [3] a.simankov@inforion.ru, [4] uzen.demid@gmail.com

Abstract

The main problem of applying recurrent neural networks to the problem of classifying processor architectures is that the use of a recurrent neural network is complicated by the lack of blocks that allow memorizing and taking into account the result of work at each next step. To solve this problem, the authors proposed a strategy for using a neural network based on the mechanism of controlled recurrent blocks. Each neuron of such a network has a memory cell, which stores the previous state and several filters. The update filter determines how much information will remain from the previous state and how much will be taken from the previous layer. The reset filter determines how much information about previous states is lost.

The purpose of the work is to increase the efficiency of determining the processor architecture by code from executable files running on this processor by creating methods, algorithms and programs that are invariant to constant data (strings, constants, header sections, data sections, indents) contained in executable files.

The paper discusses the features of the use of recurrent neural networks on the example of the problem of classifying the processor architecture by executable code from compiled executable files. The features of the machine code of various processor architectures used in modern computing have been briefly considered. The use of recurrent neural networks has been proposed, which have advantages in terms of speed and accuracy in solving classification problems. It is noted that in order to improve the classification results and practical use, it is necessary to provide a larger volume of the training sample for each of the classes, as well as to expand the number of classes.

The proposed method based on a neural network with a mechanism of controlled recurrent blocks has been implemented in the software package that allows processing digital data from executable files for various processor architectures, in particular at the initial stage of security audit of embedded systems in order to determine a set of technical means that can be applied to analysis at subsequent stages. Conclusions have been drawn about the results of measuring the performance metrics of the algorithm and the possibility of expanding functionality without making changes to the architecture of the software package.

Keywords

Artificial intelligence, neural networks, recurrent neural networks, processor architecture classification, analysis of executable files.

For citation

Gladkikh A.A., Komakhin M.O., Simankov A.V., Uzenkov D.A. **Using recurrent neural networks for probabilistic classification of the processor architecture of executable files. Neurocomputers. 2021. Vol. 23. No. 1. P. 43–49. DOI: 10.18127/j19998554-202101-05. (in Russian)**

References

1. *Buyanov A.I., Vlasov A.I., Zagoskin A.V.* Primenenie nejrosetevykh metodov pri defektoskopii pechatnykh plat. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. 2002. № 3. S. 42–70. (in Russian)
2. *Vlasov A.I., Gridnev V.N., Konstantinov P., Yudin A.V.* Nejrosetevye metody defektoskopii pechatnykh plat. Elektronnye komponenty. 2004. № 8. S. 148–155. (in Russian)
3. *Gridnev V.N., Sergeeva M.D., Chebova A.I.* Linejnye modeli raspoznavaniya teplovizionnykh izobrazhenij neispravnostej elektronnykh yacheek. Kontrol'. Diagnostika. 2014. № 8. S. 57–66. (in Russian)
4. *Viryasova A.Yu., Vlasov A.I., Gladkikh A.A.* Nejrosetevye metody defektoskopii integral'nykh struktur. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. 2019. № 2. S. 54–67. (in Russian)
5. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2019618937. Ekspertnaya sistema po obnaruzheniyu defektov provodyashchego risunka pechatnykh plat. *E.V. Evdokimova, A.E. Aver'yanikhin, A.I. Vlasov*. Opubl. 08.07.2019. (in Russian)
6. *Lawrence S., Giles C.L., Tsoi A.C., Back A.D.* Face recognition: A convolutional neural network approach. IEEE Transactions on Neural Networks. Special Issue on Neural Networks and Pattern Recognition. P. 1–24.
7. *Prokhorov V.G.* Ispol'zovanie svertochnykh setej dlya raspoznavaniya rukopisnykh simvolov. Problemi programuvaniya. 2008. № 2–3. S. 669–674. (in Russian)
8. *Rys'myatova A.A.* Ispol'zovanie svertochnykh nejronnykh setej dlya zadachi klassifikatsii tekstov. M.: Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V. Lomonosova. 2016. (in Russian)
9. *Shakhnov V.A., Vlasov A.I., Polyakov Yu.A., Kuznetsov A.S.* Nejrokomp'yutery: arkhitektura i skhemotekhnika. Prilozhenie k zhurnalu «Informatsionnye tekhnologii». № 9. M.: Mashinostroenie. 2000. (in Russian)
10. *Glushko A.A., Busov V.D., Perederin K.D.* Metody algoritmicheskogo proektirovaniya iskusstvennogo intellekta. Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem. 2019. № 2. S. 72–88. (in Russian)

Information about the authors

Aleksey A. Gladkikh – Ph.D. (Eng.), Associate Professor,
Head of Research and Development Department
Mikhail O. Komakhin – Post-graduate Student, Security Researcher
Artem V. Simankov – Research Engineer
Demid A. Uzenkov – Undergraduate Student, Security Researcher

The article was submitted 20.11.2020.
Approved after reviewing 04.12.2020.
Accepted for publication 16.12.2020.

Научная статья
УДК 62, 62-529, 681.5, 004
DOI: 10.18127/j19998554-202101-06

Направления интеллектуализации управления движением мобильного робота

С. А. Лапшинов[1], **В. А. Шахнов**[2], **А. В. Юдин**[3]
[1, 3] Центр технического образования, ГБПОУ «Воробьевы горы» (Москва, Россия)
[2, 3] кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)
[1] stepan.lapshinov@yandex.ru, [3] skycluster@gmail.com

Аннотация

Постановка проблемы. Международные робототехнические соревнования «Eurobot» ставят перед участниками и их мобильными роботами актуальные технические задачи. Каждый год эти задачи обновляются, и участники стремятся найти их оптимальное решение. Для победы в соревнованиях особенно важны высокая скорость перемещения робота и его точное позиционирование на тестовом полигоне. В результате тестов установлено, что использование платформы с тремя омни-колесами сокращает общее время на перемещения робота во время матча, уменьшает необходимое число поворотов для выполнения типовых маневров (увеличивает точность перемещения), увеличивает повторяемость передвижений робота.
Цель. Рассмотреть направления интеллектуализации управления движением мобильных роботов на примере модулей омни-колес.
Результаты. Предложено проектное решение, использующее компоненты интеллектуализации перемещения в любом направлении при получении от оператора-человека или вышестоящего автоматического управляющего устройства команд, состоящих из угла направления движения и необходимого расстояния движения. Представлен вариант использования омни-колес для передвижения мобильного робота по плоской поверхности. Рассмотрены особенности устройства и применения привода с тремя омни-колесами в сравнении с дифференциальным приводом. Описаны кинематика, базовые принципы формирования управления движением, аппаратно-программный комплекс по его реализации. Выявлены два альтернативных способа организации управления приводом в условиях дефицита аппаратных ресурсов низкого уровня на основе 8-битного микроконтроллера, проанализированы их достоинства и недостатки. Отмечены особенности отработки маршрута передвижения мобильного робота на примере соревновательной практики.
Практическая значимость. Представленные технологическое обеспечение и материалы позволяют реализовать конкурентные преимущества разработки при минимизации затрат на комплектующие.

Ключевые слова

Мобильный робот, технология производства, навигация, управление движением, аппаратно-программный комплекс, применение микроконтроллера, омни-колесо, образовательная робототехника, инженерное образование.

Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 0705-2020-0041 «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем».

Для цитирования

Лапшинов С.А., Шахнов В.А., Юдин А.В. **Направления интеллектуализации управления движением мобильного робота // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 50–62. DOI: 10.18127/j19998554-202101-06.**

Введение

Международные робототехнические соревнования «Eurobot» [1] ставят перед участниками и их мобильными роботами актуальные технические задачи. Каждый год эти задачи обновляются, и участники стремятся найти их оптимальное решение [2–5]. Для победы особенно важна высокая скорость перемещения робота и его точное позиционирование на тестовом полигоне. В результате тестов, проведенных авторами, было показано, что использование платформы с тремя омни-колесами сокращает общее время на перемещения робота во время матча, уменьшает необходимое число поворотов для выполнения типовых маневров (увеличивает точность перемещения), увеличи-

© Лапшинов С.А., Шахнов В.А., Юдин А.В., 2021

вает повторяемость передвижений робота. С программной точки зрения при определенных условиях управление таким приводом усложняется незначительно по сравнению с дифференциальным [6]. Практика показала, что такое решение доступно старшеклассникам (ученикам 10 и 11 классов) при подготовке к соревнованиям и разработке робота оригинальной конструкции [7, 8] с использованием 8-битного контроллера с сильно ограниченной памятью в качестве органа автономного автоматического управления.

Цель работы – рассмотреть направления интеллектуализации управления движением мобильных роботов на примере модулей омни-колес.

Трехколесная платформа для передвижения мобильного робота

Используемое в работе омни-колесо показано на рис. 1. Оно состоит из общего корпуса (на рисунке обозначен серым цветом) и нескольких небольших резиновых роликов, способных вращаться вокруг своей оси и закрепленных на расстоянии от оси вращения колеса. Кинематические и динамические свойства такого типа колес известны и рассматриваются в [9, 10].

На рис. 2 показана конструкция привода робота с омни-колесами. Сочетание взаимного расположения омни-колес позволяет роботу двигаться во всех направлениях без поворота (который необходим в случае дифференциального привода). Движение такого типа возможно благодаря частичному проскальзыванию колес в местах контакта роликов с поверхностью, по которой осуществляется движение. В соревновательной практике такой поверхностью является плоскость. При наличии существенных неровностей на пути следования робота использование предлагаемого привода становится нецелесообразным.

Представленное на рис. 2 вариантное исполнение привода (имеется в виду взаимное расположение моторов) было выбрано из соображений компактности, упрощения разработки и изготовления конструкции. Отметим, что несмотря на возможность существенного упрощения управления приводом (движением робота) путем добавления четвертого мотора с омни-колесом, которое часто встречается в соревновательной практике в расчете на идеальную плоскостность поверхности движения, на практике такое решение уязвимо к неровностям, сопоставимым с размерами роликов и даже меньше, что приводит к непрогнозируемому пропаданию контакта одного из омниколес с поверхностью и на деле означает усложнение системы управления движением и потерю повторяемости при отсутствии дополнительной развитой встроенной системы позиционирования робота [11–18]. В данном случае авторы стремятся показать работающее решение, доступное для использования юниорами и начинающими студенческими командами и не требующее сложносопряженной системы управления с дополнительными узлами.

Механическая конструкция (рис. 2) состоит из трех шаговых моторов, которые установлены под углом 120° по отношении друг к другу. Оси валов моторов пересекаются в центре платформы робота. Колеса крепятся к валам моторов с помощью специальных крепежных элементов.

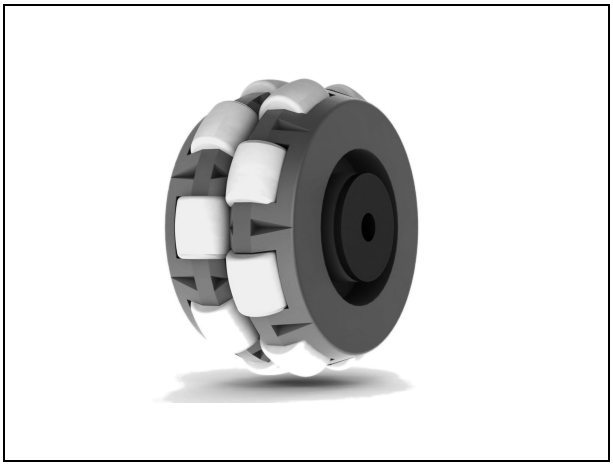


Рис. 1. Используемое омни-колесо
Fig. 1. Omni-wheel used in the work

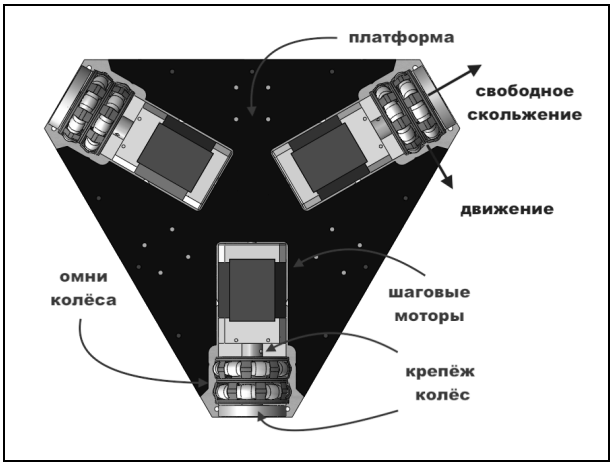


Рис. 2. Конструкция привода робота с омни-колесами
Fig. 2. Omni-wheels robot drive design

На крепеж колеса с двух сторон установлены подшипники, что необходимо для увеличения жесткости крепежа колеса. Стоит учитывать, что при использовании данного вариантного исполнения привода необходима ровная поверхность для движения (но допускаются неровности, размер которых не превышает пятна контакта ролика омни-колеса с поверхностью).

Шаговые двигатели для привода

В конструкции робота для его передвижения используются шаговые моторы. Выбор обусловлен отсутствием необходимости учета динамических (инерциальных) характеристик вращения вала двигателя под нагрузкой. Каждый полный шаг такого мотора постоянен и в данном случае равен 1,8°. Таким образом, пройденный колесом путь легко представить числом шагов двигателя.

При использовании коллекторных моторов нет возможности точно узнать пройденное расстояние без дополнительных датчиков. Скорость коллекторного мотора напрямую зависит от подаваемого на него напряжения, а оно может быть непостоянным из-за использования аккумуляторных батарей на борту мобильного робота. Коллекторный мотор более эффективный по скорости оборотов в единицу времени по сравнению с шаговым, но его можно использовать только в связке с навигационными датчиками. С учетом того, что система навигации отсутствовала на момент разработки робота, выбор типа мотора был сделан в пользу шагового. При этом драйвер для управления вращением вала двигателя следует выбирать универсальный [19], чтобы иметь возможность замены типа двигателей без дополнительных изменений конструкции робота в будущем.

Опыт использования платформы на омни-колесах

Платформа робота с омни-колесами была разработана и апробирована в робототехнических соревнованиях «Eurobot» в 2019 г. Робот выполнял повторяющуюся последовательность движений для решения игровых задач в автоматическом режиме. Не имея специальной глобальной навигационной системы, авторам удалось добиться повторяемости движений, достаточной для надежного выполнения задания по перемещению небольших объектов на тестовом полигоне, используя лишь бесконтактный датчик близости препятствия (так осуществлялась привязка начала последовательности движений к фиксированной позиции на полигоне).

Несмотря на меньшую в целом среднюю скорость центра масс робота, определяемую суммой вращений колес всех указанных моторов, по сравнению с «классическими» роботами на базе дифференциального привода, удалось за счет повышения эффективности перемещения (уменьшения вспомогательных передвижений и поворотов) получить преимущество по скорости и надежности выполнения задания (среди мобильных роботов управляемых оператором-человеком) целиком, состоящего из нескольких этапов движения, вследствие точности перемещения.

При использовании дифференциального привода для движения робота ошибки в движении наиболее заметны при поворотах. После нескольких поворотов ошибки робота накапливаются, и в результате реальный курс движения отличается от желаемого. Без встроенной системы глобальной навигации в автономном роботе исправить это практически невозможно. Единственная возможность в этом случае – периодически «находить» на полигоне фиксированные элементы и поправлять расчетные координаты робота. Такой способ «перекалибровки» не эффективен, если используются контактные датчики столкновения робота с препятствием, поскольку требует дополнительное время на выполнение и не всегда возможен из-за особенностей расположения игровых элементов на полигоне.

После проведенных тестов представленная платформа на омни-колесах с бесконтактным датчиком препятствий, фиксированных на полигоне, зарекомендовала себя с лучшей стороны. Даже сбиваясь из-за непредвиденных положений нефиксированных препятствий (например, игровые элементы, оказавшиеся на пути движения из-за действий робота-соперника), мешавших доехать до заданной в программе точки, робот мог продолжать выполнять следующие этапы задания из неверной случайной начальной точки этапа.

Для улучшения решения необходимо дополнить предлагаемую конструкцию встроенной системой глобальной навигации, а также рядом дополнительных датчиков, способных определить наличие нефиксированного препятствия (игрового элемента, робота-соперника и т.п.) на пути движения робота.

Отработка маршрута передвижения робота

Маршрут робота менялся много раз во время подготовки к соревнованиям. Средняя длина маршрута робота составляла 7 м. Это расстояние необходимо было преодолеть меньше чем за 100 с, при этом выполняя различные действия с игровыми элементами с помощью манипуляторов. Робот также совершал остановки длительностью от 1 до 5 с в разных точках полигона для корректировки курса и во избежание столкновения с другим роботом своей команды.

Ошибки в движении происходили только во время разворотов, поэтому их число было минимизировано. Робот без системы позиционирования не способен проехать несколько метров без корректировки. Регламент соревнований 2019 г. позволил выравнивать робота в середине пути с помощью борта полигона. На рис. 3 показан фрагмент игрового полигона с обозначенными этапами траектории передвижения мобильного робота на рассматриваемой платформе. Робот упирался корпусом в борт и тем самым выравнивался по одной оси системы координат полигона. Затем он, не поворачиваясь, перемещался вдоль борта до тех пор, пока не обнаруживал его конец с помощью одного бесконтактного датчика препятствий.

Благодаря такой корректировке курса робот передвигался в заданные точки с точностью ±10 мм, и этого было достаточно для захвата манипуляторами игровых элементов. Робот приезжал в конечную точку с указанной выше точностью, даже если сбивался с курса движения во время матча на несколько сантиметров.

Опытным путем было установлено, что отклонение от заданного вектора (ошибка позиционирования) во время движения составляет 5–20 мм. Это значение учитывалось при разработке манипуляторов робота и отработке их функционирования.

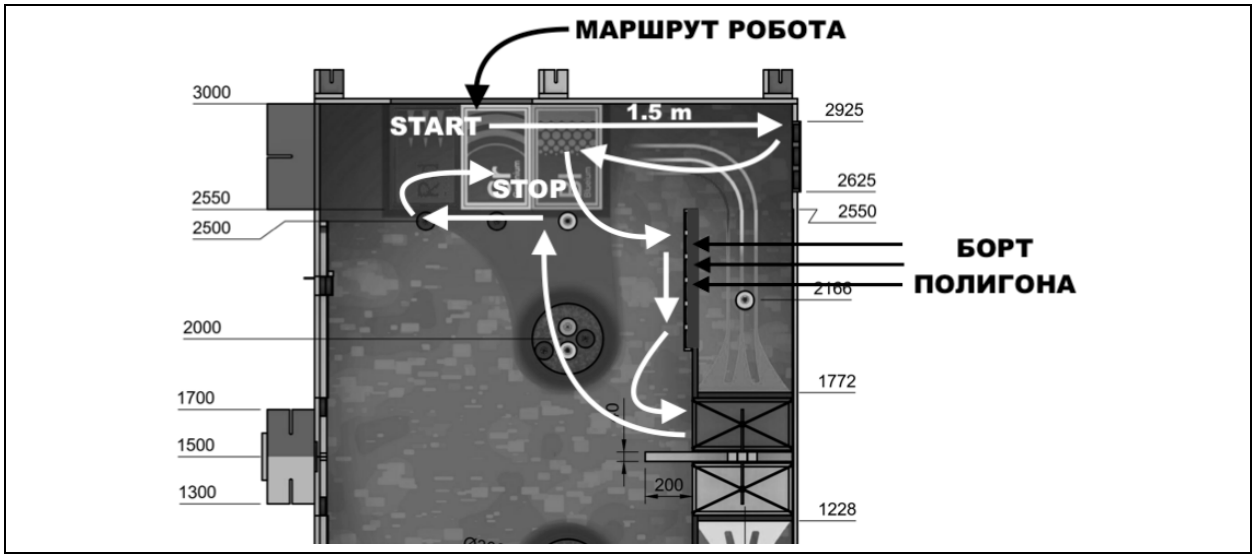


Рис. 3. Фрагмент игрового полигона с обозначенными этапами траектории передвижения мобильного робота на рассматриваемой платформе

Fig. 3. Fragment of the playground with the indicated stages of the trajectory of movement of the mobile robot on the platform under consideration

Во время соревнований возникла помеха движению в виде игрового элемента, который не давал роботу доехать до борта и к игровым элементам. Робот отклонился от маршрута на расстояние около 10 см (это довольно много), но даже при этом он смог возобновить штатное выполнение проезда траектории, пропустив фактически один из этапов движения, и в итоге доехал до заданной конечной точки. Только благодаря омни-колесам робот мог проезжать сложные траектории без разворотов – в этом и заключается достоинство подобной платформы.

Кинематика движения робота

Центр симметрии робота был принят за начало системы координат робота. Каждое колесо имеет свой вектор скорости и соответствующее ему направление вращения вала мотора (омни-колеса).

На рис. 4 показано расположение моторов, векторы скорости которых отмечены как **Va**, **Vb**, **Vc**. Ось вращения каждого из колес A, B и C имеет постоянный угол к оси *x*, который составляет 150°, 270°, 30° соответственно (рис. 4). С помощью косинуса разности этого угла и заданного угла движения робота AngleDirection находится проекция на ось направления движения. Программная функция, отвечающая за перемещение робота из одной точки в другую, получает на входе скорость, расстояние и угол направления движения AngleDirection. На рис. 5 приведена геометрия движения робота.

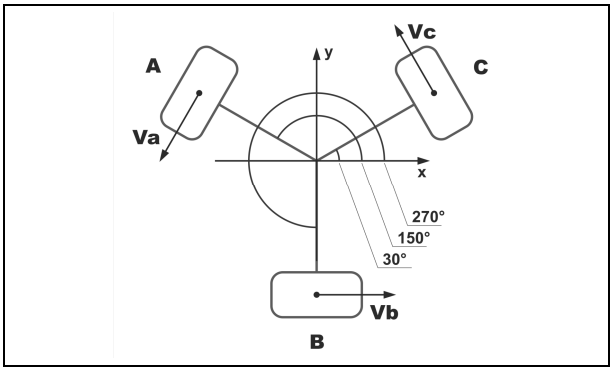


Рис. 4. Расположение моторов (геометрия)
Fig. 4. Motor arrangement (geometry)

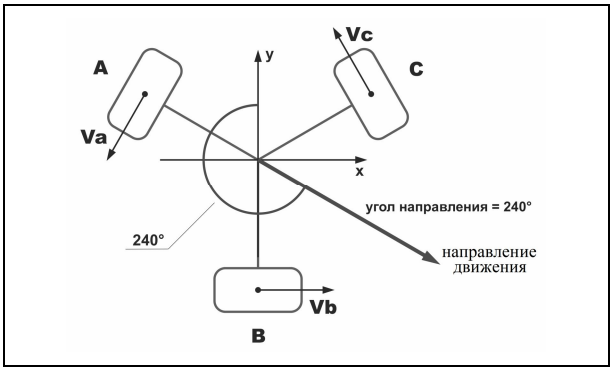


Рис. 5. Направление движения робота (геометрия)
Fig. 5. Robot moving direction (geometry)

Расчет скорости и направления вращения каждого из двигателей A, B, C производится по следующей формуле:

$$Vn = k\cos(\text{WheelAngle}(n) - \text{AngleDirection}),$$

где n – обозначение одного из трех двигателей (a, b или c); $k > 0$ – коэффициент пропорциональности расстояния, который задает расстояние для прохождения роботом за единицу времени (при $k = 1$ оно примерно равно 0,1 мм); WheelAngle $\in$ [0; 359] – значение текущего угла робота относительно стартового нулевого; AngleDirection $\in$ [0; 359] – значение угла направления робота. Изменение этого значения позволяет рассчитывать движение робота во всех направлениях с разрешением в 1°.

В результате расчета определяются три числовых значения, которые обозначают, какое расстояние необходимо пройти каждому из колес.

При подсчете получается рациональное число, округленное до сотых и принадлежащее отрезку [–1; 1]. Знак этого числа будет отвечать за направление вращения мотора. Если число принадлежит промежутку [–0,01; 0,01], мотор вращаться не будет вне зависимости от значения k. Это значение не всегда будет равно нулю из-за низкой вычислительной мощности 8-битного микроконтроллера. Полученное число отвечает за скорость. Для каждого мотора можно записать формулу для расчета его скорости и направления для движения в необходимую сторону. Отсчет градусов ведется от оси y (рис. 5) против часовой стрелки. Значения Va, Vb, Vc определяются следующим образом:

$$Va = k\cos(150 - \text{AngleDirection}),$$
$$Vb = k\cos(270 - \text{AngleDirection}),$$
$$Vc = k\cos(30 - \text{AngleDirection}),$$

где Va, Vb, Vc – это расстояния, пройденные колесами соответствующих моторов за единицу времени, т.е. фактически – это число шагов мотора, сделанных за равные промежутки времени. Для простоты в работе такой промежуток выбран равным 100 мс.

Таблица 1. ***Результаты вычисления скоростей и направлений для моторов***

AngleDirection	A	B	C
0°	–86,60	0,00	86,60
10°	–76,60	–17,36	93,97
20°	–64,28	–34,20	98,48
30°	–50,00	–50,00	100,00

Для упрощения вычислительных задач коэффициент k взят равным 100. В табл. 1 представлены результаты вычисления скоростей и направлений для моторов. В результате расчетов можно округлять значения до целой части. Это позволяет использовать для переменных тип данных с меньшим объемом памяти в отличие от типа данных, который потребуется для переменных с плавающей запятой.

Полученные значения скоростей и направлений для каждого из моторов представлены в виде графиков на рис. 6, где наглядно показана зависимость угла направления движения робота и скорости работы моторов. Если угол направления движения кратен 60, то работают только два из трех моторов. За направление движения робота отвечает переменная AngleDirection. Стрелкой с надписью «направление движения» на рис. 5 показано направление движения робота при включенных моторах B и C.

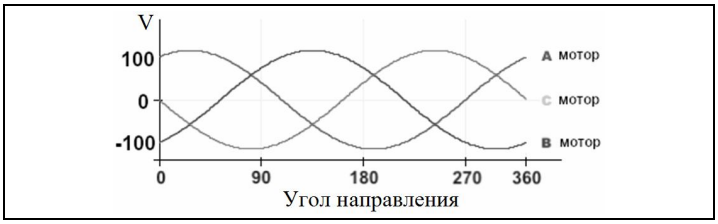


Рис. 6. Графики зависимости скоростей работы моторов от угла направления движения робота

Fig. 6. Graphs of dependence of motor speed on the robot angle direction

Помимо скорости и направления необходимо рассчитывать пройденное роботом расстояние. Для этого необходимо опустить проекции скоростей каждого из моторов на оси x и y. Сначала рассчитываются проекции расстояния, пройденного каждым мотором, затем проекции складываются:

$$ax = \cos(150 + \pi/2)Va + \cos(30 + \pi/2)Vb + \cos(270 + \pi/2)Vc,$$

$$ay = \sin(150 + \pi/2)Va + \sin(30 + \pi/2)Vb + \sin(270 + \pi/2)Vc,$$

где ax – проекция вектора перемещения системы координат робота на ось x; ay – проекция вектора перемещения системы координат робота на ось y.

Расстояние, пройденное роботом при изменении угла направления движения, но при сохранении k, всегда будет одинаковым.

Процесс проектирования мобильного робота с прикладными функциями

Процесс изготовления мобильного робота начинается с создания чертежей и моделей будущей конструкции. Применяются инструменты разработки и технологии, описанные в [7, 20–23]. На рис. 7 показано окно разработки робота в САПР SolidWorks, которая использовалась для создания 3D-модели робота. С ее помощью можно легко проверить потенциальную работоспособность механизмов, в том числе взаимную работу механических элементов и совместимых подходящих деталей для дальнейшего изготовления на станках с ЧПУ. Параметры корпуса робота были определены техническим регламентом соревнований, основными спроектированными механизмами и сборкой из моторов с колесами.

После создания 3D-модели робота идет этап разработки электроники. Он начинается с построения блок-схемы, которая включает в себя все взаимосвязанные компоненты электроники.

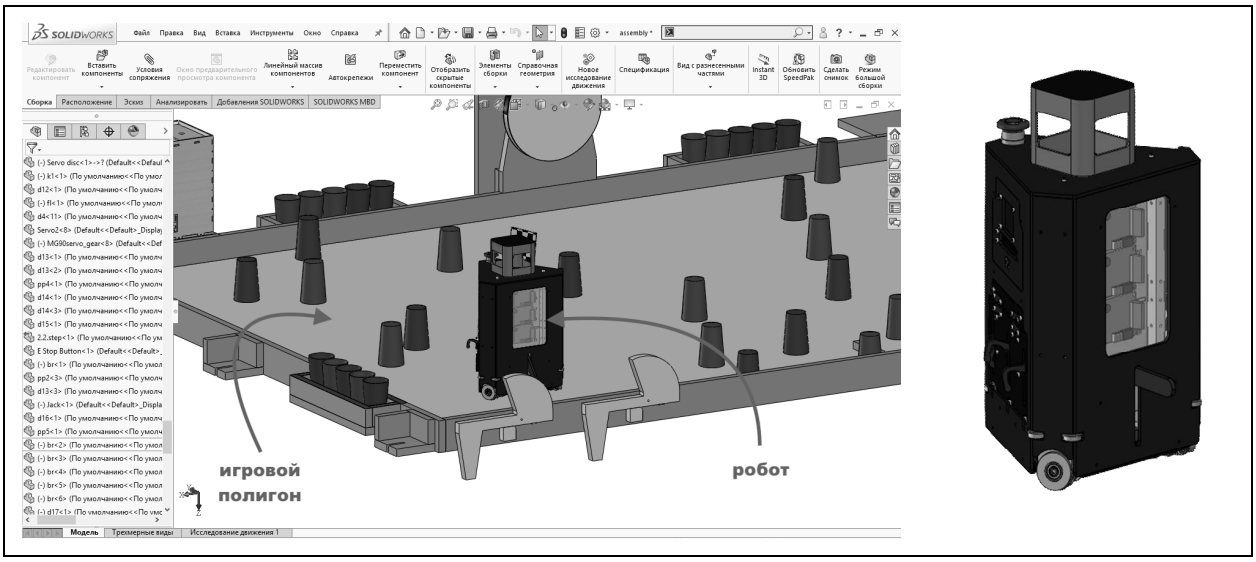


Рис. 7. Окно разработки робота в САПР SolidWorks

Fig. 7. Robot development window in CAD SolidWorks

Электроника должна выполнять заданные функции и при этом быть реализуема с использованием имеющегося технологического оборудования (например, авторы используют компактный прецизионный фрезерный станок для прототипирования печатных плат [24] и дальнейшей отладки собранных на их основе прототипов электронных модулей).

Далее происходит разработка принципиальной электрической схемы каждой из плат и самой печатной платы. Авторы пользуются средой разработки Eagle CAD.

Актуальные технологии для изготовления соревновательного мобильного робота

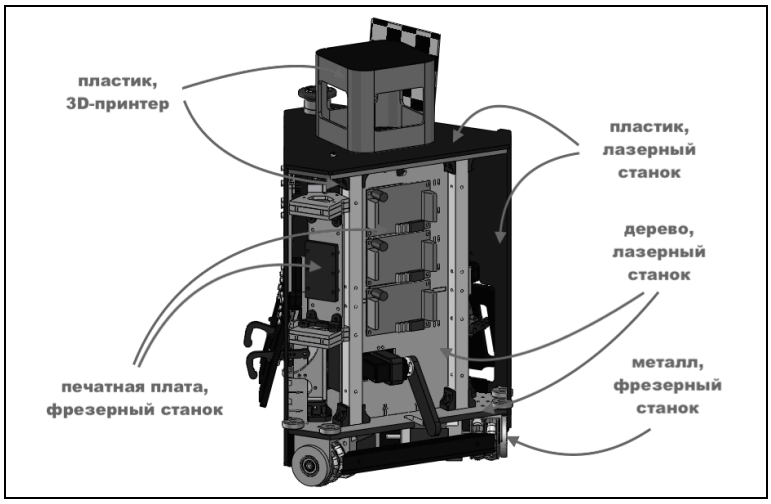


Рис. 8. Технологии и материалы, используемые в конструкции робота
Fig. 8. Technologies and materials used in the construction of the robot

Данный автономный робот изготавливался в лаборатории цифрового производства с использованием станков с ЧПУ. Грамотное сочетание деталей, изготовленных на разных станках, позволяет создать бюджетные решения, отвечающие необходимым требованиям применения и ограничениям соревнований. При этом функциональность итогового решения не страдает.

На рис. 8 указаны технологии и материалы, используемые в конструкции робота. При изготовлении деталей робота основным стал станок лазерной резки. Он позволяет достаточно быстро вырезать детали из листовых материалов. Следующим по необходимости станком стал 3D-принтер. С его помощью изготавливались детали сложной геометрии, крепежи, части механизмов. Наличие фрезерного станка позволило изготовить прототипы печатных плат. Сборка двигателя и колеса должна быть жесткой и надежной. Крепеж колеса к мотору был изготовлен из стали на токарном станке.

Организация программного управления

В управлении мехатронными узлами, которыми являются сборки рассматриваемого робота на шаговых двигателях, нет ничего необычного [25, 26], но в силу большого количества исполнительных механизмов требуется координация их управления.

Основным микроконтроллером для управления моторами является 8-битный Atmega328. На рис. 9 показана схема электроники рассматриваемого мобильного робота. Значения при расчете по формулам записываются в переменные типа float. Этот тип данных служит для хранения чисел с плавающей запятой и занимает 32 бита в памяти микроконтроллера. Расчет тригонометрических функций на 8-битном микроконтроллере занимает много времени по сравнению с 32-битными микроконтроллерами, и при выполнении определенных задач это может неблагоприятно сказаться на эффективности выполнения заданий роботом.

Связь между микроконтроллерами на борту робота осуществляется с помощью шины передачи данных I2c. Ее использование позволяет сделать робота многозадачным. За счет использования параллельной скоординированной работы двух микроконтроллеров робот может перемещаться из одной точки в другую и одновременно использовать механизмы для выполнения необходимых действий на игровом поле. Это важно для эффективного выполнения задач и использования доступного на это времени. Главный микроконтроллер (master) посылает по шине данные для перемещения одному зависимому микроконтроллеру (slave_1) для выполнения движения и другому микроконтроллеру (slave_2) для выполнения действий механизмами робота и взамен получает команду о выполнении. На шине каждый микроконтроллер имеет свой адрес, чтобы отличать «свои» команды от «чужих».

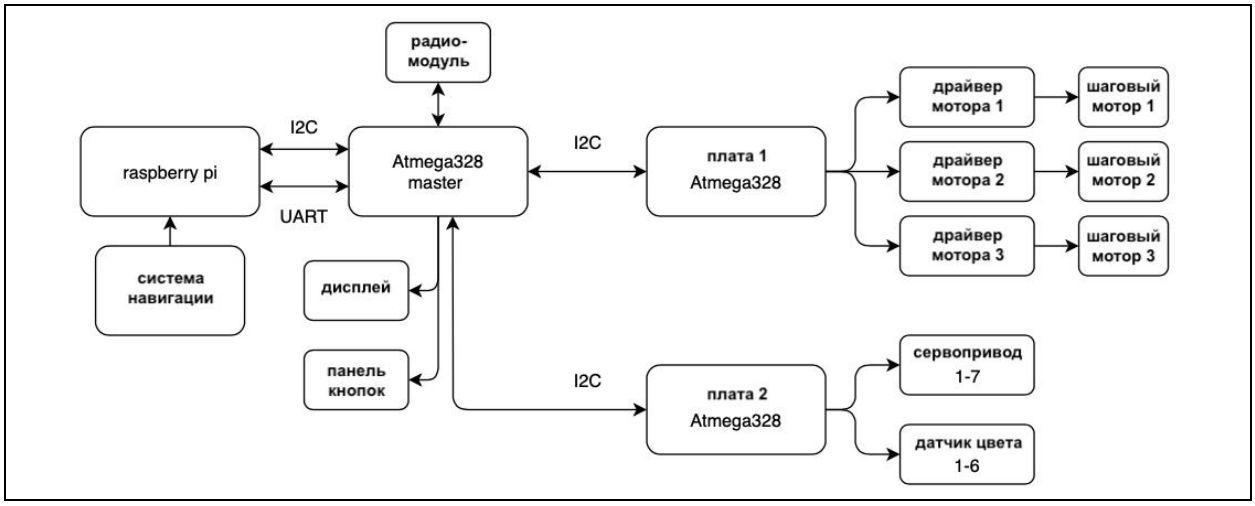


Рис. 9. Схема электроники рассматриваемого мобильного робота
Fig. 9. The electronics diagram of the mobile robot under consideration

Для написания программного кода для каждого из микроконтроллеров робота используются языки программирования C/C++.

Алгоритм перемещения робота из точки A в точку B заключается в разбиении отрезка пути на более мелкие при необходимости. Это требуется для более плавного движения. Управляющий микроконтроллер отправляет по шине данных команду с параметрами для перемещения. Следующая команда отправляется, когда получен ответный сигнал о выполнении. Параметры для перемещения загружаются в память микроконтроллера.

В данной версии мобильного автономного робота используются шаговые моторы. Они позволяют вращать колеса каждый раз на одинаковый угол (1,8° без делителя шага). Во время матча робот движется от одной заданной точки на тестовом полигоне к другой, при этом нельзя допускать сильных отклонений, в том числе от заданных положений промежуточных точек пути.

В реальной рабочей ситуации робот всегда приезжает в нужную точку с погрешностью. Это происходит из-за конструктивной особенности колес и неровностей поля. Роботу важно сохранять нужный угол относительно заданной точки.

Чтобы контролировать робота в промежуточных точках и автоматически корректировать его траекторию движения, разрабатываются системы навигации мобильных роботов. Наличие встроенной глобальной системы навигации значительно упрощает управление роботом, но усложняет координацию систем робота.

Мобильный робот способен перемещаться в любом направлении, получая от оператора-человека или вышестоящего автоматического управляющего устройства команды, состоящие из угла направления движения и необходимого расстояния движения. На рис. 10 и 11 показаны алгоритм работы робота и машина состояний робота соответственно. Микроконтроллер ATmega328, который отвечает за движение на низком уровне, обрабатывает полученные команды и управляет каждым из трех шаговых моторов с установленными на них омни-колесами. Получая направление угла движения, робот может преобразовать это значение в команды для моторов двумя способами.

Первый способ заключается в расчете «на лету» параметров вращения валов каждого из двигателей по формуле для каждого нового значения угла направления движения. Такой способ требует выполнения большого числа вычислений во время движения робота. Он эффективен с точки зрения затрат памяти микроконтроллера. Но при этом на выполнение расчетов нужно больше времени, что способствует снижению максимальной скорости перемещения робота, например, при движении по окружности.

Второй способ заключается в использовании фиксированной таблицы (массива) с значениями для каждого из моторов, заранее рассчитанными для движения при определенном угле направления движения от 0 до 359°. Микроконтроллер ATmega328 имеет 32 КБ флеш-памяти и этого достаточно только для хранения округленных целочисленных значений параметров для каждого

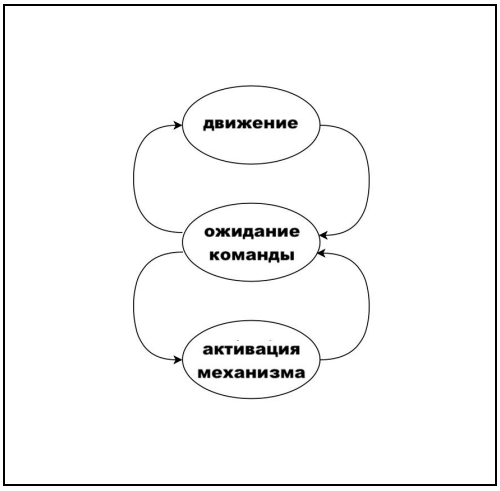


Рис. 10. Алгоритм работы робота
Fig. 10. Robot operation algorithm

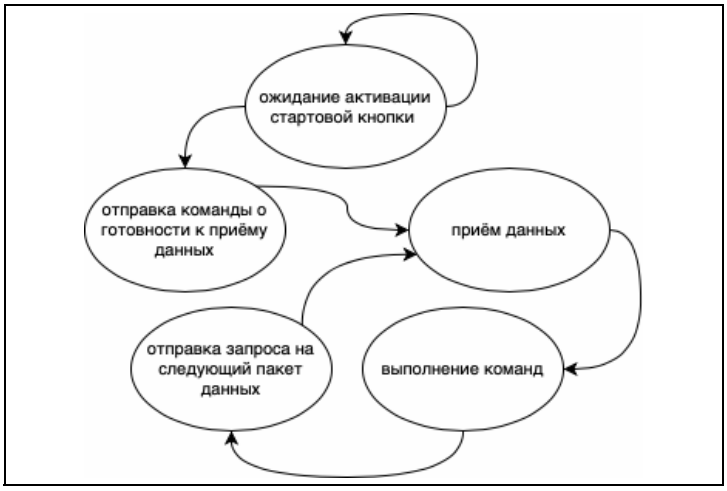


Рис. 11. Машина состояний робота
Fig. 11. Robot state machine

из моторов, т.е. при этом способе робот ограничен в свободе движений, которые определяются ограниченным набором направлений, жестко заданных в памяти, что является его безусловным недостатком.

Однако, используя такой способ, можно быстрее, по сравнению с первым способом, осуществлять управление роботом при частой смене направления движения. При этом способе скорость получения значений для моторов существенно увеличивается, следовательно, увеличивается и скорость движения робота. Более высокая скорость выполнения команд наиболее заметна при движении робота по окружности, в этом случае значение угла меняется несколько десятков раз в секунду.

Недостаток второго способа заключается в большом потреблении памяти микроконтроллера. В дополнение к этому необходимые для управления данные хранятся округленными. Тем не менее использование данного программного решения вполне оправдано. На практике мобильному роботу нет необходимости выдерживать направление точнее 1°.

У каждого из вышеописанных программных решений есть свои сильные и слабые стороны. В табл. 2 приведены особенности рассмотренных способов организации управления движением.

Таблица 2. ***Особенности рассмотренных способов организации управления движением***

Характеристика	Вычислительный способ, «на лету»	Табличный способ, «предварительный расчет»
Затрачиваемая память микроконтроллера	5%	80%
Скорость выполнения команды	50 мс	10 мс
Разрешающая способность направления движения	0,01°	1°

Какой из способов подходит лучше для технического решения – определяется индивидуально для каждого робота с учетом поставленных задач и имеющегося оборудования.

Заключение

Описанный в статье вариант конструктивного решения привода мобильного робота на омни-колесах хорошо себя зарекомендовал. Рассмотренный пример организации системы управления позволяет начать продуктивное использование платформы в прикладных целях школьникам 10–11 классов и студентам младших курсов. При этом представленное решение обладает большим потенциалом для углубленного изучения кинематики, динамики движения и процессов управления им [27].

Проектное решение использует широко распространенные сегодня компактные станки с числовым программным управлением, доступные в лабораториях цифрового производства как сту-

дентам, так и школьникам. Выбранный подход к проектированию и изготовлению единичных деталей робота позволяет дорабатывать его в части, интересной разработчику [28]. И механика, и электроника [29, 30], и программное управление могут быть усложнены и позволяют улучшить представленное решение в проектном формате [31], сохраняя при этом предлагаемый концепт.

Применение омни-колес в целом усложняет процессы управления по сравнению с дифференциальным приводом, но вместе с тем предоставляет бóльшую свободу выбора вариантов поведения мобильного робота. Платформа на приводе с омни-колесами представляется авторам более универсальной и предпочтительной в случаях работы на плоских поверхностях. Однако для реализации ее возможностей требуется развитая система глобального позиционирования в составе встроенной системы навигации робота.

Список источников

1. Международные молодежные соревнования мобильных роботов Eurobot [Электронный ресурс] / URL: http://www.eurobot.org (дата обращения: 01.09.2020).
2. *Kuturov A., Yudin A., Pashinskiy I., Chistyakov M.* Team development of an autonomous mobile robot: approaches and results // Communications in Computer and Information Science. 2011. V. 161. P. 187–201.
3. *Salmina M., Kuznetsov V., Poduraev Y., Yudin A., Vlasov A., Sukhotskiy V., Tsibulin Y.* Continuous engineering education based on mechatronics and digital fabrication // 6th International Conference on Robotics in Education. 2015. P. 56–57.
4. *Demidov A., Yudin A., Krasnobryzhiy B., Chistyakov M., Borovik R., Kuturov A.* Autonomous mobile robot development in a team, summarizing our approaches // Communications in Computer and Information Science. 2011. V. 156. P. 168–179.
5. *Yudin A., Sukhotskiy D., Salmina M.* Practical mechatronics: training for mobile robot competition // 6th International Conference on Robotics in Education. 2015. P. 94–99.
6. *Чистяков М.Г., Юдин А.В.* Расчет траектории движения мобильного робота в частной задаче перемещения объектов // Сб. науч. трудов 13-й молодежной науч.-технич. конф. «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011». 27–28 апреля 2011 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 311–314.
7. *Лапшинов С.А.* Актуальность технологических возможностей лаборатории цифрового производства при разработке мобильного робота // Сб. науч. трудов 19-й молодежной междунар. науч.-технич. конф. «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2017». 19 апреля 2017 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 255–263.
8. *Лапшинов С.А., Юдин А.В.* Практика проектирования мобильных роботов в спортивной робототехнике: моделирование и стратегия // Сб. докладов 13-й Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». 2020.
9. *Борисов А.В., Килин А.А., Мамаев И.С.* Тележка с омниколесами на плоскости и сфере // Нелинейная динамика. 2011. Т. 7. № 4 (Мобильные роботы). С. 785–801.
10. *Герасимов К.В., Зобова А.А.* Динамика экипажа на омни-колесах с массивными роликами с учетом смены ролика в контакте с опорной плоскостью // Труды МАИ. 2018. № 101.
11. *Затекин Д.В., Юдин А.В.* Образовательная робототехника: пример содержания индивидуального маршрута обучения // Сб. науч. статей «Непрерывное образование в контексте идеи Будущего: новая грамотность». М.: МГПУ. 2020. С. 11–16.
12. *Лапшинов С.А., Юдин А.В.* Инструменты моделирования в комплексных задачах разработки технических систем и устройств // Сб. науч. статей «Непрерывное образование в контексте идеи Будущего: новая грамотность». М.: МГПУ. 2020. С. 54–60.
13. *Затекин Д.В., Юдин А.В.* Проектирование технических систем: модель ультразвуковой системы позиционирования // Сб. докладов 13-й Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». 2020.
14. *Затекин Д.В.* Система позиционирования мобильных роботов, воспроизводимая в учебных лабораториях цифрового производства // Сб. науч. трудов 20-й молодежной междунар. науч.-технич. конф. «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2018». 25 апреля 2018 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 221–231.
15. *Журавлева Л.В., Зобов О.В., Клынкин К.О.* Применение лазерного дальномера VL53L0x для навигации и позиционирования мобильного робота // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 3. С. 8–17.
16. *Колесников М.А., Юдин А.В.* Аппаратно-программный комплекс по определению местоположения объекта на плоскости методом ультразвуковой триангуляции // Сб. докладов 10-й Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России». 2017. С. 591–595.
17. *Vlasov A., Yudin A.* Distributed control system in mobile robot application: general approach, realization and usage // Communications in Computer and Information Science. 2011. V. 156. P. 180–192.
18. *Yudin A., Semyonov M.* Distributed control system for a mobile robot: tasks and software architecture // Communications in Computer and Information Science. 2011. V. 161. P. 321–334.
19. *Белов А.А.* Универсальный драйвер для мощных электрических двигателей // Сб. науч. трудов 21-й молодежной междунар. науч.-технич. конф. «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2019». 17 апреля 2019 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 164–168.
20. *Yudin A., Vlasov A., Shalashova M., Salmina M.* Evolution of educational robotics in supplementary education of children // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 1023. P. 336–343.
21. *Yudin A., Vlasov A., Salmina M., Sukhotskiy V.* Challenging intensive project-based education: short-term class on mobile robotics with mechatronic elements // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 829. P. 79–84.

22. *Yudin A., Kolesnikov M., Vlasov A., Salmina M.* Project oriented approach in educational robotics: From robotic competition to practical appliance // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. V. 457. P. 83–94.
23. *Yudin A., Salmina M., Sukhotskiy V., Dessimoz J.D.* Mechatronics practice in education step by step, Workshop on mobile robotics // 47th International Symposium on Robotics. 2016. P. 590–597.
24. *Лапшинов С.А.* Компактный аппаратно-программный комплекс единичного изготовления элементов электронных устройств // Сб. науч. трудов 21-й молодежной междунар. науч.-технич. конф. «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2019». 17 апреля 2019 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 173–182.
25. *Юдин А.В., Власов А.И., Колесников М.А.* Управление мехатронными узлами в автоматизированных системах гибкого индивидуального цифрового производства // Материалы XIII Междунар. конф. «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого). 2016. С. 432–434.
26. *Колесников М.А., Юдин А.В., Кузнецов В.Е.* Организация управления автоматизированным инструментом персонального цифрового производства // Сб. докладов 8-й Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». 2015. С. 415–419.
27. *Juravleva L.V., Shakhnov V.A., Vlasov A.I.* Adaptation of professional engineering training to the challenges of modern digital production // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 1134. P. 623–633.
28. *Vlasov A.I., Juravleva L.V., Shakhnov V.A.* Visual environment of cognitive graphics for end-to-end engineering project-based education // Journal of Applied Engineering Science. 2019. V. 17. № 1. P. 99–106.
29. *Журавлева Л.В., Умбатова М.Э.* Статистический анализ перспектив профессионального развития по направлению «Конструирование и технология электронных средств» // Технологии инженерных и информационных систем. 2018. № 1. С. 21–30.
30. *Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В., Макарчук В.В., Мысловский Э.В., Парфенов О.Д., Пирогова Е.В., Шахнов В.А., Шерстнев В.В.* Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов. Сер. Информатика в техническом университете. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2005.
31. *Vlasov A.I., Yudin A.V., Shakhnov V.A., Usov K.A., Salmina M.A.* Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. V. 12. № 20. P. 9390–9396.
32. *Vlasov A.I., Grigoriev P.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A., Filin S.S., Migalin V.S.* Smart management of technologies: predictive maintenance of industrial equipment using wireless sensor networks // Entrepreneurship and Sustainability Issues. 2018. V. 6. № 2. P. 489–502.

Информация об авторах

Степан Александрович Лапшинов – студент
SPIN-код: не представлен
Вадим Анатольевич Шахнов – чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой
SPIN-код: не представлен
Антон Владимирович Юдин – инженер; педагог дополнительного образования
SPIN-код: 5881-5665

Поступила в редакцию 20.11.2020.
Одобрена после рецензирования 02.12.2020.
Принята к публикации 15.12.2020.

Original article

Approaches to motion control intellectualization of a mobile robot

Stepan A. Lapshinov[1], **Vadim A. Shakhnov**[2], **Anton V. Yudin**[3]
[1, 3] Technical Education Center, SBVEI "Vorobyovy Gory" (Moscow, Russia)
[2, 3] Department IU4 of Designing and Technology of Electronic Equipment,
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
[1] stepan.lapshinov@yandex.ru, [3] skycluster@gmail.com

Abstract

The paper considers the principles of intelligent motion control of mobile robots using the example of omni-wheel modules. The proposed design solution uses components of movement intelligence in any direction, receiving commands from a human operator or above a standing automatic control device, consisting of an angle of movement direction and the required distance of movement. This paper presents an embodiment of using omni-wheels to move a mobile robot over a flat surface. Features of device and application of drive with three omni-wheels in comparison with differential drive are considered. Kinematics, basic principles of motion control formation, hardware and software complex for its implementation are described. There were revealed two alternative methods of organization of drive control in conditions of shortage of low-level hardware resources on the basis of 8-bit microcontroller, their advantages and disadvantages have been analyzed. Process support and materials have been presented that allows realizing the competitive advantages of development while minimizing the cost of components. Features of mobile robot travel route development have been mentioned on the example of competitive practice.

Keywords

Mobile robot, production technology, navigation, motion control, hardware and software complex, microcontroller application, omni-wheel, educational robotics, engineering education.

For citation

Lapshinov S.A., Shakhnov V.A., Yudin A.V. **Approaches to motion control intellectualization of a mobile robot. Neurocomputers. 2021. Vol. 23. No. 1. P. 50–62. DOI: 10.18127/j19998554-202101-06. (in Russian)**

References

1. Mezhdunarodnye molodezhnye sorevnovaniya mobil'nykh robotov Eurobot [Elektronnyj resurs]. URL: http://www.eurobot.org (data obrashcheniya: 01.09.2020). (in Russian)
2. *Kuturov A., Yudin A., Pashinskiy I., Chistyakov M.* Team development of an autonomous mobile robot: approaches and results. Communications in Computer and Information Science. 2011. V. 161. P. 187–201.
3. *Salmina M., Kuznetsov V., Poduraev Y., Yudin A., Vlasov A., Sukhotskiy V., Tsibulin Y.* Continuous engineering education based on mechatronics and digital fabrication. 6th International Conference on Robotics in Education. 2015. P. 56–57.
4. *Demidov A., Yudin A., Krasnobryzhiy B., Chistyakov M., Borovik R., Kuturov A.* Autonomous mobile robot development in a team, summarizing our approaches. Communications in Computer and Information Science. 2011. V. 156. P. 168–179.
5. *Yudin A., Sukhotskiy D., Salmina M.* Practical mechatronics: training for mobile robot competition. 6th International Conference on Robotics in Education. 2015. P. 94–99.
6. *Chistyakov M.G., Yudin A.V.* Raschet traektorii dvizheniya mobil'nogo robota v chastnoĭ zadache peremeshcheniya ob''ektov. Sb. nauch. trudov 13-j molodezhnoj nauch.-tekhnich. konf. «Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy 2011». 27–28 aprelya 2011 g. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. S. 311–314. (in Russian)
7. *Lapshinov S.A.* Aktual'nost' tekhnologicheskikh vozmozhnostej laboratorii tsifrovogo proizvodstva pri razrabotke mobil'nogo robota. Sb. nauch. trudov 19-j molodezhnoj mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. «Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy 2017». 19 aprelya 2017 g. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. S. 255–263. (in Russian)
8. *Lapshinov S.A., Yudin A.V.* Praktika proektirovaniya mobil'nykh robotov v sportivnoj robototekhnike: modelirovanie i strategiya. Sb. dokladov 13-j Vseross. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov «Budushchee mashinostroeniya Rossii». 2020. (in Russian)
9. *Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S.* Telezhka s omnikolesami na ploskosti i sfere. Nelinejnaya dinamika. 2011. T. 7. № 4 (Mobil'nye roboty). S. 785–801. (in Russian)
10. *Gerasimov K.V., Zobova A.A.* Dinamika ekipazha na omni-kolesakh s massivnymi rolikami s uchetom smeny rolika v kontakte s opornoj ploskost'yu. Trudy MAI. 2018. № 101. (in Russian)
11. *Zatekin D.V., Yudin A.V.* Obrazovatel'naya robototekhnika: primer soderzhaniya individual'nogo marshruta obucheniya. Sb. nauch. statej «Nepreryvnoe obrazovanie v kontekste idei Budushchego: novaya gramotnost'». M.: MGPU. 2020. S. 11–16. (in Russian)
12. *Lapshinov S.A., Yudin A.V.* Instrumenty modelirovaniya v kompleksnykh zadachakh razrabotki tekhnicheskikh sistem i ustrojstv. Sb. nauch. statej «Nepreryvnoe obrazovanie v kontekste idei Budushchego: novaya gramotnost'». M.: MGPU. 2020. S. 54–60. (in Russian)
13. *Zatekin D.V., Yudin A.V.* Proektirovanie tekhnicheskikh sistem: model' ul'trazvukovoj sistemy pozitsionirovaniya. Sb. dokladov 13-j Vseross. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov «Budushchee mashinostroeniya Rossii». 2020. (in Russian)
14. *Zatekin D.V.* Sistema pozitsionirovaniya mobil'nykh robotov, vosproizvodimaya v uchebnykh laboratoriyakh tsifrovogo proizvodstva. Sb. nauch. trudov 20-j molodezhnoj mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. «Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy 2018». 25 aprelya 2018 g. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. S. 221–231. (in Russian)

15. *Zhuravleva L.V., Zobov O.V., Klynkin K.O.* Primenenie lazernogo dal'nomera VL53L0x dlya navigatsii i pozitsionirovaniya mobil'nogo robota. Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem. 2019. № 3. S. 8–17. (in Russian)
16. *Kolesnikov M.A., Yudin A.V.* Apparatno-programmnyj kompleks po opredeleniyu mestopolozheniya ob"ekta na ploskosti metodom ul'trazvukovoj triangulyatsii. Sb. dokladov 10-j Vseross. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov (s mezhdunarodnym uchastiem) «Budushchee mashinostroeniya Rossii». 2017. S. 591–595. (in Russian)
17. *Vlasov A., Yudin A.* Distributed control system in mobile robot application: general approach, realization and usage. Communications in Computer and Information Science. 2011. V. 156. P. 180–192.
18. *Yudin A., Semyonov M.* Distributed control system for a mobile robot: tasks and software architecture. Communications in Computer and Information Science. 2011. V. 161. P. 321–334.
19. *Belov A.A.* Universal'nyj drajver dlya moshchnykh elektricheskikh dvigatelej. Sb. nauch. trudov 21-j molodezhnoj mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. «Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy 2019». 17 aprelya 2019 g. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. S. 164–168. (in Russian)
20. *Yudin A., Vlasov A., Shalashova M., Salmina M.* Evolution of educational robotics in supplementary education of children. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 1023. P. 336–343.
21. *Yudin A., Vlasov A., Salmina M., Sukhotskiy V.* Challenging intensive project-based education: short-term class on mobile robotics with mechatronic elements. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 829. P. 79–84.
22. *Yudin A., Kolesnikov M., Vlasov A., Salmina M.* Project oriented approach in educational robotics: From robotic competition to practical appliance. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. V. 457. P. 83–94.
23. *Yudin A., Salmina M., Sukhotskiy V., Dessimoz J.D.* Mechatronics practice in education step by step, Workshop on mobile robotics. 47th International Symposium on Robotics. 2016. P. 590–597.
24. *Lapshinov S.A.* Kompaktnyj apparatno-programmnyj kompleks edinichnogo izgotovleniya elementov elektronnykh ustrojstv. Sb. nauch. trudov 21-j molodezhnoj mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. «Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy 2019». 17 aprelya 2019 g. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. S. 173–182. (in Russian)
25. *Yudin A.V., Vlasov A.I., Kolesnikov M.A.* Upravlenie mekhatronnymi uzlami v avtomatizirovannykh sistemakh gibkogo individual'nogo tsifrovogo proizvodstva. Materialy XIII Mezhdunar. konf. «Ustojchivost' i kolebaniya nelinejnykh sistem upravleniya» (konferentsiya Pyatnitskogo). 2016. S. 432–434. (in Russian)
26. *Kolesnikov M.A., Yudin A.V., Kuznetsov V.E.* Organizatsiya upravleniya avtomatizirovannym instrumentom personal'nogo tsifrovogo proizvodstva. Sb. dokladov 8-j Vseross. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov «Budushchee mashinostroeniya Rossii». 2015. S. 415–419. (in Russian)
27. *Juravleva L.V., Shakhnov V.A., Vlasov A.I.* Adaptation of professional engineering training to the challenges of modern digital production. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 1134. P. 623–633.
28. *Vlasov A.I., Juravleva L.V., Shakhnov V.A.* Visual environment of cognitive graphics for end-to-end engineering project-based education. Journal of Applied Engineering Science. 2019. V. 17. № 1. P. 99–106.
29. *Zhuravleva L.V., Umbatova M.E.* Statisticheskij analiz perspektiv professional'nogo razvitiya po napravleniyu «Konstruirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv». Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem. 2018. № 1. S. 21–30. (in Russian)
30. *Bilibin K.I., Vlasov A.I., Zhuravleva L.V., Makarchuk V.V., Myslovskij E.V., Parfenov O.D., Pirogova E.V., Shakhnov V.A., Sherstnev V.V.* Konstruktorsko-tekhnologicheskoe proektirovanie elektronnoj apparatury: Uchebnik dlya vuzov. Ser. Informatika v tekhnicheskom universitete. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. 2005. (in Russian)
31. *Vlasov A.I., Yudin A.V., Shakhnov V.A., Usov K.A., Salmina M.A.* Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices. International Journal of Applied Engineering Research. 2017. V. 12. № 20. P. 9390–9396.
32. *Vlasov A.I., Grigoriev P.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A., Filin S.S., Migalin V.S.* Smart management of technologies: predictive maintenance of industrial equipment using wireless sensor networks. Entrepreneurship and Sustainability Issues. 2018. V. 6. № 2. P. 489–502.

Information about the authors

Stepan A. Lapshinov – Student
Vadim A. Shakhnov – Corresponding Member of RAS, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Head of Department
Anton V. Yudin – Engineer; Teacher of Supplementary Education

The article was submitted 20.11.2020.
Approved after reviewing 02.12.2020.
Accepted for publication 15.12.2020.

Научная статья
УДК 004.934
DOI: 10.18127/j19998554-202101-07

Нейросетевая система обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей

А. И. Власов[1], **Е. Р. Захаров**[2], **В. О. Захарова**[3]
[1–3] кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)
[1] vlasovai@bmstu.ru, [3] Valeriyashe@yandex.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В условиях цифровой трансформации промышленности все более широкое распространение получают элементы Интернета вещей (IoT). Функционирование современных информационных систем связано напрямую с защитой обрабатываемой в них информации. Процесс обработки информации неотъемлем от решения проблем обеспечения ее безопасности. Сложность и распределенный характер современных IoT-систем обуславливает наличие в программном коде не выявленных на этапах разработки уязвимостей, из-за чего может возникать несанкционированное вмешательство для получения доступа к ресурсам информационной системы. Анализ современных систем защиты информации показывает, что они, как правило, не могут обеспечить безопасность информационной системы на достаточном уровне. Причиной является то, что модули нейтрализации сетевых атак сопряжены с использованием простейших алгоритмов обработки поступающей информации. Анализ материалов, которые посвящены проблемам создания систем обнаружения атак, показывает, что для создания эффективной системы обнаружения несанкционированного вмешательства требуются новые подходы к обработке информации. Самым перспективным направлением для создания такой системы является применение математического аппарата нейронных сетей.

Цель. Создать самообучающийся модуль обнаружения и нейтрализации несанкционированного вмешательства в работу сервера на основе нейросетевых алгоритмов с помощью теоретических основ и практических подходов к созданию нейросетевой системы, а также предложить исследовательский прототип.

Результаты. Основное внимание уделено рассмотрению нейросетевого подхода к обнаружению вторжений в сеть Интернета вещей, его мониторингу и противодействию подозрительной активности на хосте. Рассмотрены особенности разработки моделей искусственных нейронных сетей для обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей. Это позволяет отразить успешную идентификацию различных типов атак с точки зрения истинных и ложноположительных результатов. Однако нерешенными остаются проблемы получения данных о перегрузке и критических режимах системы. Применение нейросетевой системы обнаружения и нейтрализации удаленного и несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей позволяет реализовать модуль обнаружения аномалий в сети на основе ряда Вольтерра, в котором отражены теоретические предпосылки метода динамического построения искусственной нейронной сети. Проанализированы основные типы атак, типы систем обнаружения вторжений, интерпретации полученных данных, проведен анализ работ в области нейросетевых решений для обнаружения сетевых атак. Предложено эффективное решение для защиты рабочих агентов в сети Интернета вещей от несанкционированного доступа, настройки безопасности для всех модулей.

Практическая значимость. Даны рекомендации к реализации построения нейросетевого модуля, обнаруживающего отклонения в работе Интернета вещей от нормальных режимов эксплуатации.

Ключевые слова

Интернет вещей, нейронные сети, умный дом, криптография, сетевые атаки, нейросетевая система, аномалии сети.

Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту №0705-2020-0041 «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем».

Для цитирования

Власов А.И., Захаров Е.Р., Захарова В.О. **Нейросетевая система обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 63–80. DOI: 10.18127/j19998554-202101-07.**

Введение

В условиях цифровой трансформации промышленности все более широкое распространение получают элементы Интернета вещей (IoT) [1]. Функционирование современных информационных

© Власов А.И., Захаров Е.Р., Захарова В.О., 2021

систем связано напрямую с защитой обрабатываемой в них информации. Процесс обработки информации неотъемлем от решения проблем обеспечения ее безопасности. Сложность и распределенный характер современных IoT-систем обуславливает наличие в программном коде не выявленных на этапах разработки уязвимостей, из-за чего может возникать несанкционированное вмешательство для получения доступа к ресурсам информационной системы [2].

Анализ современных систем защиты информации показывает, что они, как правило, не могут обеспечить безопасность информационной системы на достаточном уровне. Причиной является то, что модули нейтрализации сетевых атак сопряжены с использованием простейших алгоритмов обработки поступающей информации. Под понятием «атака» понимается изменение содержимого важных данных или кража конфиденциальных данных [3]. Эти угрозы могут быть спланированы путем взлома компьютерной системы или удаленного доступа к сети. В IoT-системе существует *четыре типа угроз*:

1) *отказ в обслуживании* (DoS) – данный тип угрозы блокирует ресурсы пользователя в сети, представляя ему нежелательный трафик;

2) *вредоносные программы* – злоумышленники используют исполняемый код для разрушения устройств в IoT-сети, тем самым получая конфиденциальную информацию пользователя. При несанкционированном доступе возрастает возможность воспользоваться недостатками встроенного программного обеспечения в IoT-сети и запустить свое программное обеспечение для нарушения архитектуры IoT-сети;

3) *утечка данных* – злоумышленники подделывают пакеты ARP для прослушивания связи между одноранговыми узлами в сети;

4) *ослабление периметра* – система обнаружения вторжений (IDS) создана для мониторинга сетей и компьютерных систем. Сетевые устройства IoT в настоящее время не разработаны с учетом повсеместной безопасности.

Анализ материалов, которые посвящены проблемам создания систем обнаружения атак, показывает, что для создания эффективной системы обнаружения несанкционированного вмешательства требуются новые подходы к обработке информации. Самым перспективным направлением для создания такой системы является применение математического аппарата нейронных сетей [2].

Настоящая работа посвящена решению актуальной задачи – разработке самообучающегося модуля обнаружения и нейтрализации несанкционированного вмешательства в работу сервера на основе нейросетевых алгоритмов с целью ее использования в IoT-системах. Большой вклад в разработку и исследование атак на нейронную криптографию внесли американские ученые В. Кинзел (W. Kinzel) [3], А. Руттор (A. Ruttor) [4], И. Кантер (I. Kanter) [5]. В России вопросы применения нейронных сетей при обнаружении атак исследовали К.А. Пупков [6], А.Ф. Хафизов [7].

Однако решения, которые предлагаются на данный момент, не обеспечивают в полной мере решения проблем выявления и устранения уязвимостей, тем самым не позволяя реализовать эффективную защиту. Поэтому исследования в области обнаружения и нейтрализации несанкционированного вмешательства в IoT-компоненты актуальны, так как предлагаемый к разработке модуль нейтрализации является самообучающимся на нейросетевых алгоритмах.

Ц е л ь р а б о т ы – создать самообучающийся модуль обнаружения и нейтрализации несанкционированного вмешательства в работу сервера на основе нейросетевых алгоритмов с помощью теоретических основ и практических подходов к созданию нейросетевой системы, а также предложить исследовательский прототип.

Для исследования использовались теории математической статистики, методы обнаружения вторжения, методы системного анализа, распознавание образов, нейронные сети, нечеткая логика [8]. Кроме того, применялся анализ на основе самостоятельно разработанного программного обеспечения [9].

В работе предлагается концепция реализации самообучающегося модуля обнаружения и нейтрализации несанкционированного вмешательства в работу сервера на основе нейросетевых алгоритмов. По сравнению с известными аналогами предлагаемое решение более эффективно для защиты рабочих станций в сети Интернета вещей от несанкционированного доступа, настройки безопасности для всех модулей компонентов на основе ряда Вольтерра и позволяет проанализиро-

вать основные типы атак, типы систем обнаружения вторжений с целью их деактивации. Основной практической ценностью работы является возможность создания самообучающегося модуля, который позволяет эффективнее обеспечивать функционирование IoT-компонентов в условиях воздействия на систему внешних атак.

Анализ методов и средств обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей

Ориентированные на смартфоны сети начала XXI века постепенно трансформируются в экосистему Интернета вещей, которая объединяет гетерогенную смесь беспроводных устройств, начиная от смартфонов и заканчивая беспилотными летательными аппаратами, носимыми устройствами, датчиками и устройствами виртуальной реальности [10]. Эта беспрецедентная трансформация приведет не только к экспоненциальному росту беспроводного трафика в обозримом будущем, но и к появлению новых и непроверенных вариантов использования беспроводных услуг, которые существенно отличаются от обычных мультимедийных или голосовых сервисов. Например, помимо потребности в высоких скоростях передачи данных, которая была основным драйвером эволюции беспроводной сети в последнее десятилетие, беспроводные сети следующего поколения также должны будут обеспечивать сверхнадежную связь с низкой задержкой, т.е. адаптивную и в режиме реального времени к динамике Интернета вещей [11].

Например, беспилотные летательные аппараты и подключенные транспортные средства поставят автономию в центр Интернета вещей [12]. Это, в свою очередь, потребует развертывания сверхнадежных беспроводных линий связи, которые могут обеспечить управление такими автономными системами в режиме реального времени с низкой задержкой. Между тем в завтрашних беспроводных сетях большие объемы данных будут собираться периодически и в режиме реального времени через огромное количество сенсорных и носимых устройств, контролирующих физическую среду. Такие массивные передачи коротких пакетов приведут к существенному трафику по беспроводной восходящей линии связи, которая традиционно была гораздо менее перегружена, чем нисходящая линия связи. Эта же беспроводная сеть должна также поддерживать облачные игры, иммерсивные сервисы виртуальной реальности, потоковую передачу HD в реальном времени и обычные мультимедийные сервисы. Это в конечном счете создает радикально иную сетевую среду, новые приложения которой и их разнообразные требования к качеству обслуживания (QoS) и надежности требуют фундаментального изменения способа моделирования, анализа, проектирования и оптимизации беспроводных сетей [13].

Необходимость справиться с этой постоянной и быстрой эволюцией беспроводных услуг привела к значительному объему исследований, которые анализируют, какой будет оптимальная архитектура сотовой сети в контексте формирующихся беспроводных сетей пятого поколения (5G). В то время как основные компоненты для 5G (такие как плотное развертывание малых ячеек, связь миллиметровой волны (mmWave) и связь от устройства к устройству (D2D)) были определены, интеграция их в действительно гармоничную беспроводную систему, способную решать задачи Интернета вещей, требует привития интеллектуальных функций как на периферии, так и в ядре сети [14]. Эти интеллектуальные функции должны быть способны адаптивно использовать ресурсы беспроводной системы и генерируемые данные, чтобы оптимизировать сетевые операции и гарантировать в режиме реального времени потребности в QoS новых беспроводных и IoT-сервисов. Такой мобильный пограничный и основной интеллект потенциально может быть реализован путем интеграции фундаментальных понятий машинного обучения, в частности, подходов на основе искусственных нейронных сетей, через беспроводную инфраструктуру и устройства конечных пользователей. *Искусственные нейронные сети* – это вычислительная нелинейная структура машинного обучения, которая может использоваться для контролируемого и неконтролируемого обучения [15].

Интернет вещей открывает устройства для враждебных сторон, готовых использовать все мыслимые уязвимости. Таким образом, IoT сталкивается с некоторыми из самых больших препятствий на пути его широкого внедрения. Для его глобального внедрения необходимо обеспечить защиту устройств и сетей Интернета вещей. В настоящей работе излагаются основы внедрения

искусственного интеллекта и способы его использования для обеспечения безопасности устройств при помощи модуля обнаружения и нейтрализации несанкционированного доступа [16]. Одной из существенных проблем безопасности на основе искусственного интеллекта является нехватка ресурсов для реализации методов искусственного интеллекта на истощенных ресурсах устройств Интернета вещей, поскольку современные подходы полагаются на вычислительную мощность облака для развертывания алгоритмов искусственного интеллекта. Этот подход неосуществим на практике, поскольку целью злоумышленников являются устройства, и поэтому защита этих устройств с помощью методов искусственного интеллекта требует совершенно другого подхода [17].

Далее рассмотрена общая характеристика возможных атак на IoT-систему, а также подчеркнуто, что в настоящее время существует большое число атак, которые различными способами используют возможность получения несанкционированного доступа. В контексте беспроводных сетей модуль нейтрализации несанкционированного доступа позволит любому беспроводному устройству активно и интеллектуально контролировать свою окружающую среду, изучая и прогнозируя эволюцию различных характеристик окружающей среды (например, динамику беспроводного канала, структуру трафика, состав сети, запросы к контенту, контекст пользователя) [18]. Использование семейства строгих языков функционального программирования с развитой полиморфной системой типов и параметризуемыми модулями позволяет сетевой инфраструктуре извлекать уроки из беспроводной сетевой среды и выполнять адаптивные действия по оптимизации сети.

Наиболее естественным применением в беспроводной системе является использование интеллектуального и прогнозирующего анализа данных для повышения ситуационной осведомленности и общей работы сети. В этом контексте модуль предоставит беспроводной сети возможность анализировать огромные объемы данных, генерируемых из нескольких источников, которые варьируются от измерений беспроводных каналов и показаний датчиков и изображений наблюдения, чтобы создать всеобъемлющую оперативную карту огромного числа устройств в сети. Эта карта, в свою очередь, может использоваться для оптимизации различных функций, таких как мониторинг неисправностей и отслеживание пользователей в беспроводной сети [19].

Помимо своих мощных интеллектуальных и прогнозных функций анализа данных, модуль будет основным драйвером интеллектуальной и управляемой данными оптимизации беспроводной сети. Модуль позволит внедрить интеллектуальные инструменты управления ресурсами, которые могут быть использованы для решения различных проблем, начиная от выбора технологии объединения ячеек и радиодоступа до распределения частот, управления спектром и мощностью и интеллектуального формирования луча. В отличие от обычных технологий распределенной оптимизации, которые часто выполняются итеративно в автономном или полуавтономном режиме, управляемые механизмы управления ресурсами смогут работать полностью в режиме онлайн, изучая в режиме реального времени состояния беспроводной среды и пользователей сети [20].

Таким образом, рассматриваемые механизмы смогут постоянно повышать свою собственную производительность с течением времени, что позволит принимать более интеллектуальные и динамичные сетевые решения. Такое управляемое принятие решений имеет большое значение для множества предполагаемых сервисов IoT и 5G, особенно тех, которые требуют работы в режиме реального времени с низкой задержкой.

Существуют *различные типы искусственных нейронных сетей*, классификация которых представлена на рис. 1:

- *модульные нейронные сети*, состоящие из нескольких независимых нейронных сетей и посредника. В них каждая нейронная сеть используется для выполнения одной подзадачи из всей задачи, которую надо выполнить. Посредник используется для обработки выходных данных каждой независимой нейронной сети и генерирования выходных данных [21];
- *рекуррентные нейронные сети* – это архитектуры нейронных сетей, позволяющие соединять нейроны от нейрона в одном слое к нейронам в предыдущих слоях. По данным разных активационных функций и методов соединения для нейронов рекуррентные нейронные сети могут использоваться для определения нескольких различных архитектур: а) стохастические нейронные сети; б) двунаправленные нейронные сети; в) полностью рекуррентные нейронные сети; г) нейронные машины Тьюринга;

• *генеративные состязательные сети*, состоящие из двух нейронных сетей. Одна нейронная сеть используется для изучения карты из латентного пространства к определенному распределению данных, в то время как другая нейронная сеть используется для различения между истинным распределением данных и распределением, отображенным нейронной сетью;

• *глубокие нейронные сети* – это все нейронные сети, которые имеют несколько скрытых слоев;

• *импульсные нейронные сети*, в которых нейроны обмениваются короткими импульсами одинаковой амплитуды;

• *прямые нейронные сети*, в которых каждый нейрон имеет входящие соединения только с предыдущим слоем и исходящие соединения только со следующим слоем. Их можно использовать для определения более продвинутых архитектур: а) экстремальные обучения машин; б) сверточные нейронные сети; в) время задержки нейронных сетей; г) вероятностные нейронные сети; д) радиальные базисные функции;

• *физические нейронные сети*, в которых для эмуляции функции нейронной активации используется электрически регулируемый материал сопротивления.

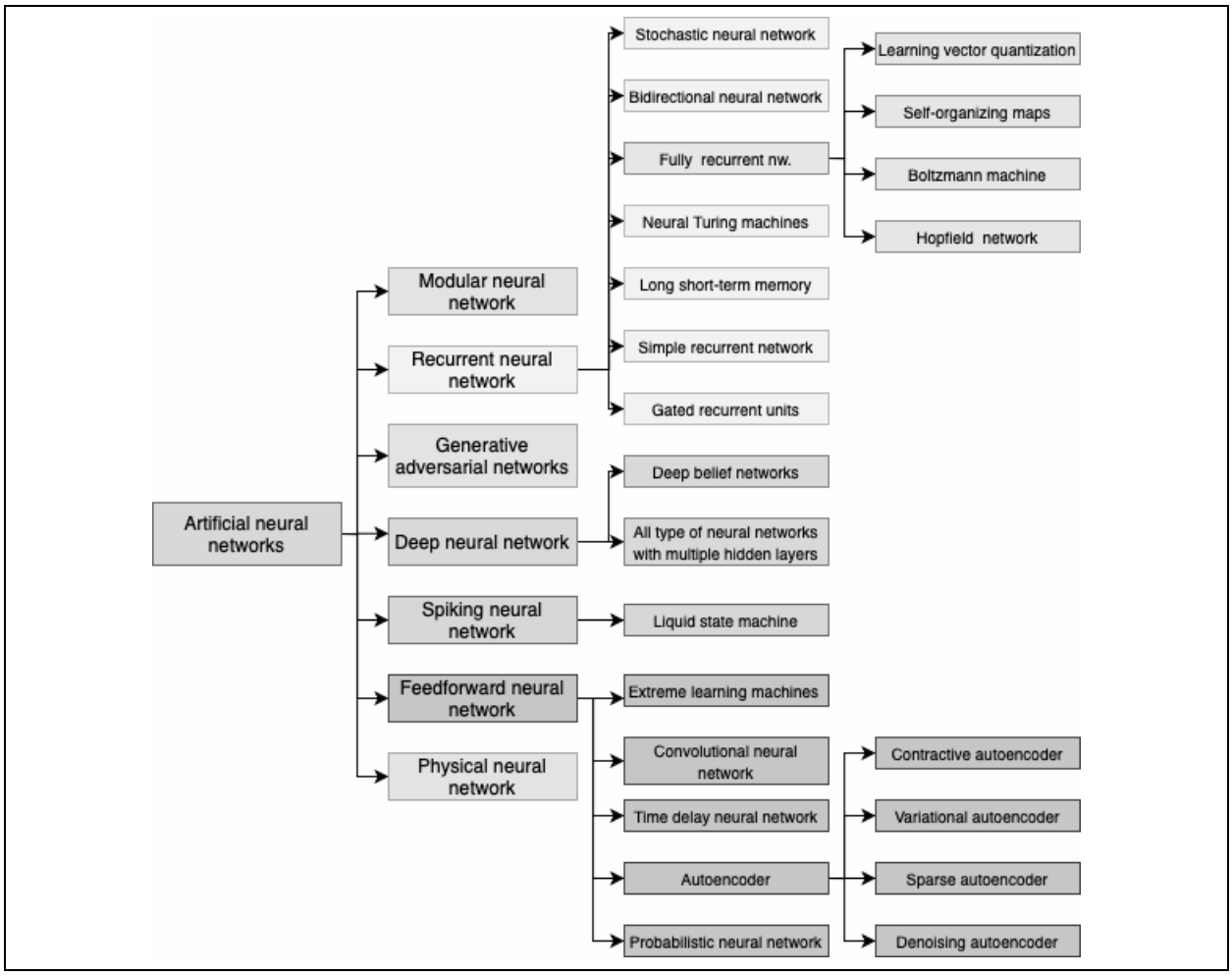


Рис. 1. Классификация искусственных нейронных сетей

Fig. 1. Classification of artificial neural networks

Каждый тип подходит для конкретной учебной задачи [22]. Например, прямые нейронные сети эффективны при работе с данными, зависящими от времени, в то время как импульсные нейронные сети – при работе с непрерывными данными. Следует отметить, что большая часть данных, собираемых беспроводными сетями, зависит от времени и непрерывна. В частности, в беспроводных сетях контекст и поведение пользователя, беспроводные сигналы и условия беспроводного канала зависят от времени и являются непрерывными. Прямые нейронные сети и им-

пульсные нейронные сети эффективны в работе с собранными данными. Они могут использовать эти данные для различных целей, таких как управление сетью и прогнозирование поведения пользователей [23]. Однако, поскольку они могут записывать только ограниченный объем данных, они не всегда решают все проблемы беспроводной связи. Для решения сложных беспроводных задач, которые не могут быть решены мелкими нейронными сетями, можно использовать глубокие нейронные сети, которые имеют высокую емкость памяти для анализа данных и могут разделить сложную проблему, которая должна быть изучена в составе нескольких более простых задач, что делает процесс обучения эффективным.

Системы обнаружения вторжений можно разделить на две основные категории:

1) *системы обнаружения вторжений на основе хоста (HIDS)* – это программные продукты, которые установлены на главном компьютере для анализа и мониторинга всех операций трафика в файлах системных приложений и операционной системы;

2) *сетевые системы обнаружения вторжений (NIDS)* – они расползаются во всей сети с целью захвата и анализа потока передаваемых пакетов через сеть.

Системы обнаружения ошибок размещаются в сети для обнаружения угроз и мониторинга пакетов [24]. В основные функции системы обнаружения вторжений входит предоставление информации об угрозах, принятие корректирующих мер при обнаружении угроз и регистрации всех перечисленных событий в сети.

Системы обнаружения вторжений разработаны таким образом, чтобы они могли эффективно обнаруживать и идентифицировать угрозы [25]. Путем анализа можно сделать вывод, что вторжения сводятся к *двум схемам обнаружения*:

1) *аномальное вторжение* (Anomaly intrusion) – система обнаружения на основе поведения. Наблюдается изменение в обычном поведении IoT-системы;

2) *обнаружение злоупотреблений* (Misuse intrusion) – соответствует шаблонам сетевого трафика злоумышленника. Основное преимущество – обнаружение всех известных угроз.

Сравнение производительности идентификатора хоста и идентификатора сети показано в табл. 1.

Таблица 1. ***Сравнение производительности идентификатора хоста и идентификатора сети***

Характеристика	Производительность с точки зрения	
	HIDS	NIDS
Сдерживание вторжения	Сильное сдерживание для внутренних злоумышленников	Сильное сдерживание сторонних злоумышленников
Время реакции на угрозу	Слабый отклик в реальном времени, но работает лучше для долгосрочной атаки	Быстрый отклик на сторонних злоумышленников
Оценка ущерба	Сильно	Слабо
Предотвращение ущерба	Хорошее внутреннее предотвращение	Хорошее внешнее предотвращение
Предвидение угроз	Хорошее обнаружение подозрительных моделей поведения	Хорошее обнаружение подозрительных моделей поведения

Осуществляется формализация задачи создания системы обнаружения атак на самообучающемся модуле с анализом защищаемой информационной системы. В системе используется сложный многоуровневый протокол информационного обмена с пользователем [26].

Системы Интернета вещей, включая объекты, сети, службы и данные, уязвимы для всех видов атак. Безопасность Интернета вещей можно определить как совокупность технологий и процессов, предназначенных для защиты устройств, данных и служб от атак, несанкционированного доступа, изменения или уничтожения [27]. В традиционной вычислительной платформе кибербезопасность минимально состоит из антивирусного программного обеспечения, брандмауэра и систем обнаружения вторжений [28].

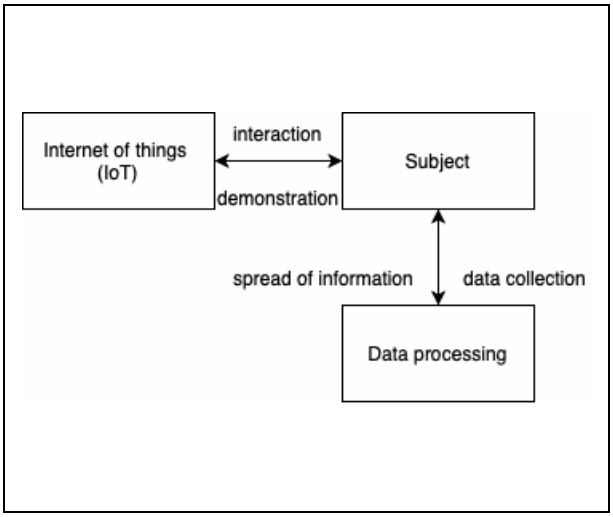


Рис. 2. Эталонная модель Интернета вещей с соответствующими сущностями и потоками данных в типичном приложении Интернета вещей

Fig. 2. IoT reference model with associated entities and data flows in the typical IoT application

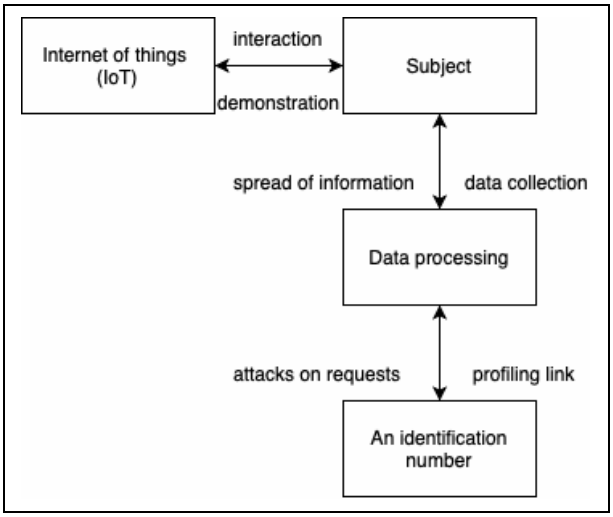


Рис. 3. Угрозы в эталонной модели

Fig. 3. Threats in the reference model

Эталонная модель конфиденциальности рассматривается на основе эталонной модели Интернета вещей, предложенной МСЭ и Европейским исследовательским советом Интернета вещей (IERC). Здесь в модели конфиденциальности есть четыре основных типа сущностей, а именно: интеллектуальные вещи, субъект, инфраструктура и услуги с пятью различными потоками данных, включая взаимодействие, сбор, обработку, распространение и представление. Эталонная модель Интернета вещей с соответствующими сущностями и потоками данных в типичном приложении Интернета вещей представлена на рис. 2.

Эволюционирующий характер Интернета вещей в отношении технологий и функций, а также появляющиеся новые способы взаимодействия с ним приводят к возникновению специфических угроз и проблем конфиденциальности [29].

Рис. 3 иллюстрирует семь категорий угроз (фаз) из эталонной модели конфиденциальности в IoT на рис. 2, а именно: 1) идентификация; 2) локализация; 3) отслеживание; 4) профилирование; 5) взаимодействие; 6) представление; 7) нарушающие конфиденциальность, переход жизненного цикла, атаки.

Идентификация означает угрозу связывания (постоянного) идентификатора, например, имени и адреса или псевдонима любого рода, с физическим лицом и данными о нем [30]. Таким образом, угроза заключается в привязке личности к конкретному контексту нарушения конфиденциальности, а также в создании и усилении других угроз, например, профилирования и отслеживания отдельных лиц или комбинации различных источников данных.

Угроза идентификации в настоящее время является наиболее доминирующей на этапе обработки информации в бэкенд-сервисах предложенной эталонной модели, где огромные объемы информации сосредоточены в центральном месте вне контроля субъекта [31]. В области Интернета вещей также будет актуален этап взаимодействия и сбора данных, поскольку воздействие развивающихся технологий и особенностей взаимосвязи и взаимодействия усугубляет угрозу идентификации. Защита личных данных и в дополнение к этому защита от идентификации является преобладающей темой в области конфиденциальности, но также получила большое внимание в областях анонимизации данных и повышения конфиденциальности управления идентификационными данными.

Безопасность и *конфиденциальность* являются важнейшими мерами, которые необходимо учитывать при сборе и распространении информации. Эта информация и данные должны быть защищены от незаконного и несанкционированного доступа. Конфиденциальность местоположения – это защита информации о местоположении конфиденциальной информации пользователя,

такой как место жительства, поведение, состояние здоровья и др. Устройства IoT имеют встроенную систему GPS для позиционирования информации о местоположении. Пользователь может отправить запрос в службу location based services (LBS) для получения информации о местоположении. Запрос может быть адресован представляющему интерес месту, например, ближайшему ресторану, больнице, парку или другим местам. Запрос содержит идентификатор и местоположение пользователя. Удобство использования услуг LBS создает вопросы риска конфиденциальности. Основываясь на предоставленной информации, злоумышленник может легко связать личность и местоположение пользователя, чтобы получить более конфиденциальную информацию [32].

Профилирование означает угрозу составления информационных досье о лицах для определения их интересов путем корреляции с другими профилями и данными. Методы профилирования в основном используются для персонализации в электронной коммерции (например, в рекомендательных системах, информационных бюллетенях и рекламе), а также для внутренней оптимизации на основе демографических данных и интересов клиентов. Существующие подходы к сохранению конфиденциальности информации обращения. Необходимо соблюдать баланс между идентификацией и контролем доступа, необходимыми для функционирования Интернета вещей, и правами пользователей на конфиденциальность и идентификацию. Достижение этого баланса является непростой задачей из-за слабых сторон в области кибербезопасности и методов анонимизации.

Инвентаризационные атаки относятся к несанкционированному сбору информации о существовании и характеристиках личных вещей. С реализацией концепции all-IP и сквозного видения «умный дом» становится доступными для запросов через Интернет. В то время как данные могут быть запрошены из любого места с помощью законных субъектов (например, владелец и авторизованные пользователи системы), незаконные стороны могут запрашивать и использовать это для составления инвентарного списка в определенном месте. При прогнозируемом распространении технологии беспроводной связи атаки на отпечатки пальцев могут также осуществляться пассивно, например, с помощью подслушивающего устройства в непосредственной близости от дома жертвы. Поскольку атаки на инвентаризацию в основном осуществляются за счет увеличения коммуникационных возможностей вещей, угроза возникает на этапе сбора информации в эталонной модели конфиденциальности, представленной на рис. 2.

Существуют различные методы обнаружения вторжений, которые базируются на основных алгоритмах. Далее описаны основные алгоритмы, причем большой упор делается на искусственные нейронные сети (ИНС) [33].

• *Статистический анализ* – метод, использующий сравнение текущих тенденций развития с заранее установленным набором базовых критериев. Сравнивает нормальное поведение данных с отклонением во времени. Как правило, используется для обнаружения аномалий.

• *Эволюционный алгоритм* – метод, создающий путь приложения, который обеспечивает нормальные поведенческие модели. Эти приложения моделируются для выявления условий нормального поведения, состояний ошибок и попыток вторжения путем классификации моделей на основе различных условий.

• *Проверка протокола* – метод, который основан на тщательной проверке протокола и его поведения по сравнению с установленными стандартами. Данные, которые считаются нарушившими установленный стандарт, классифицируются как подозрительные. Большой успех алгоритм приобрел в рекламе. Основным недостатком являются ложные срабатывания для неуказанных протоколов.

• *Алгоритм, сравнивающий данные с сигнатурами* – это один из методов, заключающийся в выявлении характерных идентифицирующих свойств воздействия при сравнении файлов с выявленными свойствами.

• *Искусственные нейронные сети* – метод, использующий нейроны для формирования сложных гипотез. Чем больше нейронов, тем сложнее гипотезы. Оценка гипотез выполняется путем установки входных узлов в процессе обратной связи, потоки событий распространяются через сеть на выход. На этом этапе градиентные спуски используются для того, чтобы подтолкнуть ошибку в выходном узле через сеть с помощью процесса обратного распространения для оценки ошибки в скрытых узлах. Нейросетевая система проходит обучение, чтобы изучить шаблон, созданный в системе.

Для решения проблем конфиденциальности конечных пользователей и поставщиков услуг исследовательское сообщество предложило несколько подходов.

1. *Криптографические методы и манипулирование информацией*. Хотя исследователи потратили много лет, предлагая новые схемы сохранения конфиденциальности, криптография по-прежнему является наиболее доминирующим решением, однако из-за ограниченных ресурсов хранения и вычислений криптография часто не может предложить адекватные протоколы безопасности для защиты данных конечных пользователей.

2. *Осведомленность о конфиденциальности или контекстная осведомленность*. Решения для устранения отсутствия осведомленности о конфиденциальности были прежде всего сосредоточены на использовании отдельных приложений для предоставления основных условий конфиденциальности конечным пользователям, эта практика распространена среди таких устройств, как смарт-телевизоры, носимые фитнес-устройства и системы мониторинга здоровья.

3. *Контроль доступа*. Он является одним из жизнеспособных решений, которые будут использоваться в дополнение к шифрованию и повышению осведомленности о конфиденциальности, это дает пользователям возможность управлять своими собственными данными, что, по сути, является распределенным подходом, в котором устройства в сети «умный дом» сами способны принимать незначительные решения по авторизации.

4. *Минимизация данных*. Принцип минимизации данных означает, что поставщики услуг Интернета вещей должны ограничивать сбор личной информации тем, что имеет непосредственное отношение к делу, они также должны сохранять данные только до тех пор, пока это необходимо для выполнения услуг, другими словами, они должны собирать только те личные данные, которые им действительно нужны, и хранить их только до тех пор, пока они в них нуждаются [34].

Однако влияние атрибута доверия на доверие в вышеприведенных методах определяется весовыми коэффициентами. Оценка надлежащего веса является сложной задачей, поскольку доверие – это изменяющаяся величина, которая зависит от многих факторов, например, от ожиданий доверителя, времени, контекста и т.д. Таким образом, для нахождения этих весовых коэффициентов и порога, определяющего достоверную границу, требуются более интеллектуальные схемы. Кроме того, существующие технологии исследовали ограниченное число функций доверия, таких как коэффициент пересылки пакетов, QoS, конфиденциальность, репутация, обратные связи и некоторые социальные атрибуты [35]. Также имеющиеся технологии в значительной степени опираются на легкодоступные знания для оценки доверия, и динамический характер доверия практически игнорируется в большинстве систем.

Архитектура системы обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей

Для реализации системы обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей проанализируем *три типа нейронных сетей*: рекуррентные нейронные сети, импульсные нейронные сети и глубокие нейронные сети, которые имеют значительный потенциал для проектирования беспроводной сети с целью обучения модуля нейтрализации атак [36]. Для каждого вида нейронных сетей представим его архитектуру, преимущества и свойства. Выполним процедуру обучения ИНС для самообучающегося модуля обнаружения вторжения.

Рекуррентные нейронные сети. В традиционной модели предполагается, что все входы или все выходы независимы друг от друга. Однако для многих задач входы (выходы) связаны между собой. Например, для прогнозирования моделей мобильности беспроводных устройств входные данные, т.е. местоположение пользователей, безусловно, связаны [37]. Для этого используются рекуррентные нейронные сети, которые представляют собой архитектуры нейронных сетей, позволяющие осуществлять нейронные связи от нейрона в одном слое к нейронам в предыдущих слоях, как показано на рис. 4.

Выходы скрытого слоя $\{c_1, c_2, \ldots, c_k\}$ подаются на входные нейроны с весовыми коэффициентами $\{w_{ij}\}^{-t}$, где i – индекс нейрона, на который подается сигнал ($i = 1, 2, \ldots, n$); j – индекс выходного сигнала нейрона скрытого слоя ($j = 1, 2, \ldots, k$), t – индекс временной задержки ($t = 1, 2, \ldots, m$).

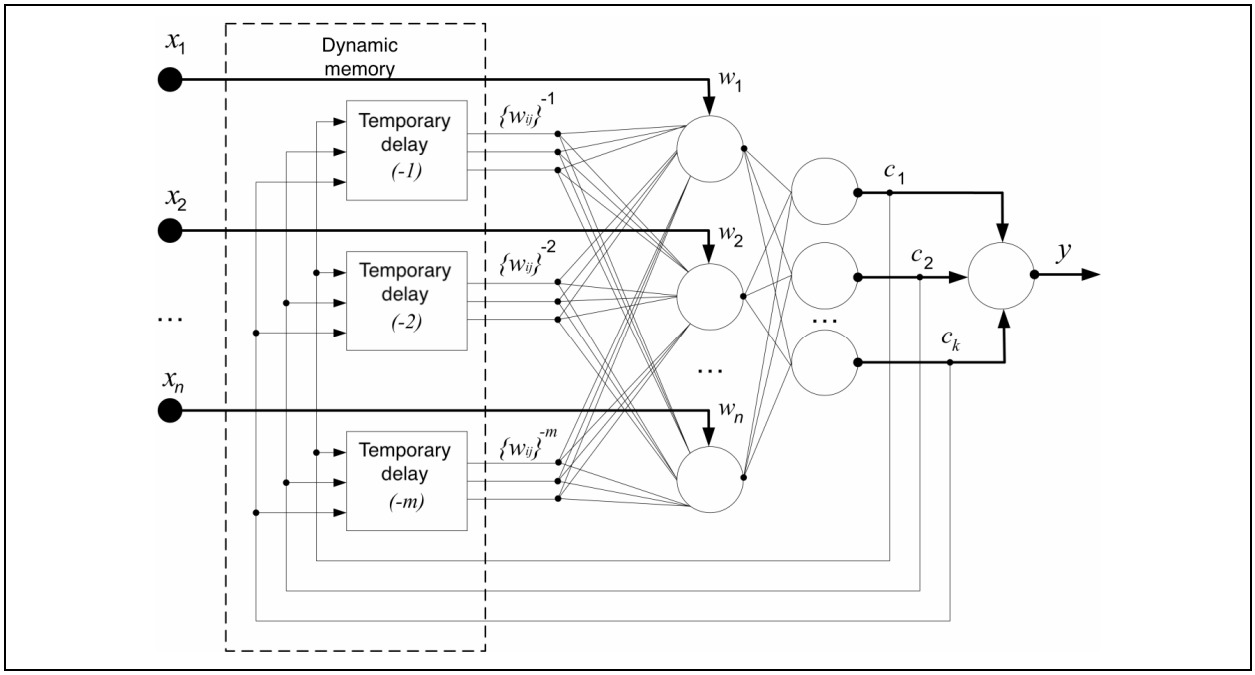


Рис. 4. Рекуррентная архитектура нейронной сети

Fig. 4. Recurrent neural network architecture

Количество временных задержек будем изменять от 1 до m. Таким образом, при $m = 1$ получается сеть Элмана, а при $m = 0$ – многослойный персептрон.

При детальном рассмотрении архитектуры рекуррентной сети видно, что обратные связи от скрытого слоя или от выхода сети можно исключить путем добавления в обучающую выборку сигналов обратной связи. Это кажущееся простым изменение позволяет выходу нейронной сети зависеть не только от текущего входного сигнала, но и от входного сигнала, как показано на рис. 4. Это позволяет рекуррентной архитектуре нейронной сети использовать последовательную информацию и динамические временные модели поведения, такие как предсказание мобильности или распознавание речи [38]. Например, рекуррентные нейронные сети можно использовать для прогнозирования моделей мобильности мобильных устройств и беспроводных пользователей. Эта задача не может быть выполнена за один шаг без изучения локаций из предыдущих шагов. Поэтому нейронная сеть, выход которой зависит только от текущего входного сигнала, не может выполнять такие сильно зависящие от времени задачи. Основные преимущества и недостатки рекуррентных нейронных сетей для беспроводных приложений представлены в табл. 2.

Импульсные нейронные сети. В отличие от рекуррентных и глубоких нейронных сетей, которые просто используют одно значение для обозначения активации нейронов, импульсные используют более точную модель биологических нейронных сетей для обозначения активации нейронов.

Архитектура шипящей нейронной сети аналогична архитектуре нейронов в биологических нейронных сетях. Поэтому сначала покажем, как нейроны работают в реальной биологической нейронной сети, а затем рассмотрим модель нейронов в импульсной нейронной сети.

В биологических нейронных сетях нейроны используют спайки для связи друг с другом. Поступающие сигналы изменяют напряжение нейрона, и когда напряжение превышает пороговое значение, нейрон посылает потенциал действия, который является коротким (1 мс) и внезапным увеличением напряжения, которое создается в теле клетки. Из-за формы и характера этого процесса его называют спайком или импульсом. Для импульсных нейронных сетей использование таких всплесков может значительно улучшить динамику сети. Таким образом, импульсная нейронная сеть может моделировать центральную нервную систему и изучать работу биологических нейронных цепей [39]. Поскольку нейроны в импульсной нейронной сети моделируются на основе спайка, она имеет два основных преимущества по сравнению с традиционными нейронными сетями: быстрое декодирование сигналов в реальном времени и высокая пропускная способность передачи

Таблица 2. ***Преимущества и недостатки нейронных сетей***

Вид нейронной сети	Входные данные	Преимущества	Недостатки
Рекуррентная нейронная сеть	Зависящие от времени данные	Эффективность обработки связанных со временем данных, таких как беспроводной трафик; возможность захвата динамических временных моделей поведения, таких как запросы контента или мобильность устройств; возможность использовать последовательную информацию, такую как последовательные символы, полученные пользователем	Сложность обучения обусловлена петлевыми связями между нейронами; ограниченная память для записи данных
Импульсная нейронная сеть	Непрерывные данные	Эффективность обработки непрерывных данных, таких как амплитуды беспроводных сигналов; большая память, доступная для сбора данных; способность справляться с быстро меняющимися, динамичными поведениями сети (например, динамический трафик); возможность выполнения нескольких задач обучения	Сложность обучения из-за динамических нейронов; необходим конкретный метод обучения для каждого типа; необходимо провести выборку состояний нейронов
Глубокая нейронная сеть	Многомерные данные	Врожденная способность находить низкоразмерные объекты представления (особенности) высокомерных данных, например, изображения и схема беспроводного трафика; лучшая способность к обучению	Трудно настроить для практического применения; требуется большой набор данных для обучения; вычислительно интенсивное обучение

информации за счет добавления временного измерения. Таким образом, импульсная нейронная сеть может использовать меньшее число нейронов для выполнения одной и той же задачи по сравнению с традиционными нейронными сетями, а также может применяться для вычислений в реальном времени на непрерывных потоках данных. Это означает, что как входы, так и выходы сети являются потоками данных в непрерывном времени. Однако обучение импульсных нейронных сетей является более сложным (и потенциально более трудоемким), чем обучение традиционных нейронных сетей из-за их сложных спайкинговых нейронных моделей. Основные преимущества и недостатки импульсных нейронных сетей указаны в табл. 2.

Глубокие нейронные сети. До сих пор все обсуждаемые нейронные сети предполагали единый скрытый слой. Такую архитектуру обычно называют неглубокой нейронной сетью. В отличие от этого глубинная нейронная сеть представляет собой нейронную сеть с несколькими скрытыми слоями между входным и выходным слоями. На рис. 5 показана архитектура глубоких нейрон-

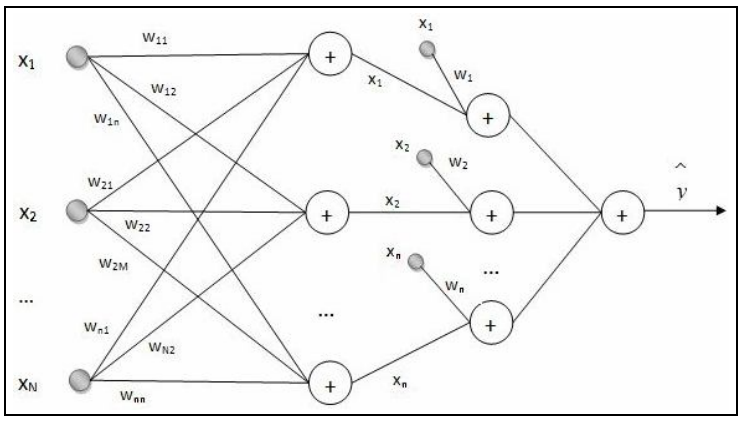


Рис. 5. Архитектура глубоких нейронных сетей на основе ряда Вольтерра

Fig. 5. Voltaire series-based deep neural network architecture

ных сетей на основе ряда Вольтерра. Таким образом, глубокие нейронные сети моделирует высокоуровневые абстракции в данных с помощью множественных нелинейных преобразований для изучения нескольких уровней представления и абстракции.

Разложение Вольтерра для реализации ИНС можно представить в следующей форме:

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^{L} x_{t-1}\left[w_i + \sum_{j=0}^{L} x_{t-j}\left[w_i j + \sum_{k=0}^{L} x_{t-k}\left(w_i jk + \ldots\right)\right]\right].$$

Каждое слагаемое в квадратных скобках представляет собой линейный фильтр первого порядка (КИХ-фильтр), где соответствующие веса представляют импульсную реакцию другого линейного фильтра следующего уровня. Приняты следующие обозначения: $\mathbf{X} = \left[x_t, x_{t-1}, \ldots, x_{t-L}\right]^{\mathrm{T}}$ – входной вектор; L – количество единичных задержек; w_i, $w_i j$, $w_i jk$, … – веса ИНС, называемые ядрами Вольтерра, соответствующие реакциям высших порядков; K – число уровней.

Следует отметить, что, хотя данный тип нейронных сетей обладает большой способностью моделировать высокую степень нелинейности входных данных, главная проблема заключается в перенастройке. В глубоких нейронных сетях перенасыщение становится особенно острым из-за наличия очень большого числа параметров. Для преодоления этой проблемы было предложено несколько передовых подходов к регуляризации, таких как увеличение набора данных и снижение веса. Эти методы модифицируют алгоритм обучения таким образом, что ошибка теста уменьшается за счет увеличения ошибок обучения. Краткое описание основных преимуществ и недостатков представлено в табл. 2.

ИНС имеет *две процедуры обучения*.

1. *Процедура обучения с учителем.* В контролируемом обучении нейронная сеть снабжена помеченным обучающим набором, который изучает отображение от входов x к выходам y, учитывая помеченный набор пар вход–выход $d = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{N}$, где d – обучающий набор; N – число обучающих примеров. Предполагается, что y_i является дискретной переменной из некоторого бесконечного множества. Многослойный персептрон – это частный случай персептрона Розенблатта, в котором один алгоритм обратного распространения ошибки изучает все слои. Был использован для обнаружения вторжений на основе подхода автономного анализа. В другом подходе использовался для обнаружения вторжения в сетевые данные, сравнивая его производительность с самоорганизующейся картой Кохонена [40].

2. *Процедура обучения без учителя.* Нейронная сеть имеет вход $d = \{(x_i)\}_{i=1}^{N}$, который представляет собой набор данных, которые необходимо найти. Самоорганизующаяся карта Кохонена – нейронная сеть без учителя, которая выполняет задачу визуализации и кластеризации. Она является методом проецирования многомерного пространства в пространство с более низкой размерностью, применяется для решения задач моделирования, прогнозирования, выявления независимых признаков, поиска закономерностей в больших массивах данных.

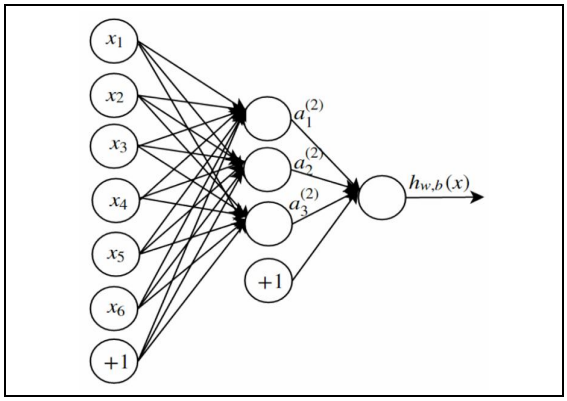


Рис. 6. Архитектура многослойного персептрона с трехуровневой нейронной сетью прямой связи

Fig. 6. Architecture of a multilayer perceptron with a three-layer neural network of direct coupling

В данной работе использовалась архитектура многослойного персептрона с трехуровневой нейронной сетью прямой связи, изображенного на рис. 6.

Модель имеет шесть входных блоков (L1), три скрытых единицы измерения (L2) и один выходной блок (L3), где L обозначает слои. Сеть была обучена с помощью алгоритма прямого обучения и алгоритма обратного обучения. Сеть имеет однополярную сигмоидальную передаточную функцию (сигмоида) в каждом из нейронов скрытого и выходного слоев. Был использован алгоритм стохастического обучения с функцией среднеквадратичной ошибки. Узлы

помечены как $x_1 \ldots x_6$ для представления единиц ввода нейронной сети. Обозначение +1 известно как единица смещения [41].

Проанализирован алгоритм обучения с обратной связью. Математическая модель представлена в виде

$$a_1 = f\left(w_{11}x_1 + w_{12}x_2 + \ldots + w_{16}x_6 + b_1\right),$$
$$a_2 = f\left(w_{21}x_1 + w_{22}x_2 + \ldots + w_{26}x_6 + b_2\right),$$
$$a_3 = f\left(w_{31}x_1 + w_{32}x_2 + \ldots + w_{36}x_6 + b_3\right),$$
$$h_{w,b}(x) = f\left(w_{11}a_1 + w_{12}a_2 + w_{13}a_3 + b_1\right). \quad (1)$$

Выражение (1) является взвешенной суммой входных данных для единицы измерения i в слое L, т.е. алгоритмом прямого обучения.

Процесс обучения модуля проходит следующим образом:

1) алгоритм прямого обучения вычисляет активацию для всех слоев сети;
2) выход из слоя L3 устанавливается для вычисления члена ошибки в выходных данных;
3) вычисляются ошибки для L = 2, L = 3 для каждого из узлов i в слое L;
4) вычисляются искомые частные производные.

Анализ особенностей применения системы обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей

Применение искусственного интеллекта идеально подходит для обучения модуля нейтрализации атак, методов машинного обучения и анализа больших данных. Цель такого применения состоит в том, чтобы исследовать очень большие объемы данных, производимых различными компонентами экосистемы Интернета вещей, и преобразовать эти данные в значимые результаты, такие как принятие решений на основе доверия, обнаружение неисправностей, состав задач и генерирование конечных данных.

IoT-сеть состоит из пяти узловых датчиков. Четыре узла действуют как клиент, а один узел – как узел ретрансляции сервера для целей анализа данных. Трафик захватывается с помощью сетевого крана, избегая модификации живого трафика.

Серверный узел подтверждает данные, отправленные сенсорными узлами, и отвечает данными, основанными на полученной информации. Это позволяет сенсорным узлам адаптировать свое поведение и реагировать на происходящие события, как показано на рис. 7, *а*.

В контексте данного исследования атака исходит от внешнего злоумышленника. Атака показана на рис. 7, *б*. Злоумышленники нацеливаются только на серверный узел, так как именно он анализирует, регистрирует и воздействует на клиентские узлы. DoS-атака была проведена с использованием одного хоста при отправке более 10 миллионов пакетов. При DDoS-атаке запросы исходили от трех хостов, отправляющих более 10 миллионов пакетов каждый. При такой атаке переполняется принимающий буфер серверного узла, в результате чего система не может получить доступ к системным ресурсам и сам узел перестает работать. Пакеты, отправленные во время атак DoS/DDoS, являются UDP-пакетами, созданными пользовательским сценарием.

Экспериментальное исследование показывает, что серверный узел перестает отвечать на запросы, сенсорные узлы не могут адаптировать свое поведение, что в конечном итоге приводит к сбою в контролируемой системе.

Поэтому обнаружение атаки имеет решающее значение, позволяя группе реагирования избежать нарушения работы сенсорной сети и гарантировать стабильность работы сети.

Каждому из N свободных параметров модели (весов и порогов) соответствует одно измерение в многомерном пространстве. Пусть $(N+1)$-е измерение соответствует ошибке сети E. Для всевозможных сочетаний значений весов соответствующие им значения ошибок представляют собой множество точек, образующих поверхность ошибок. Тогда цель обучения нейронной сети состоит в том, чтобы найти на этой многомерной поверхности самую низкую точку. В случае нейронной сети поверхность ошибок имеет гораздо более сложное строение и включает локальные минимумы, плоские участки, седловые точки и длинные узкие овраги, представленные на рис. 8, на котором показаны результаты, полученные на экспериментальной модели.

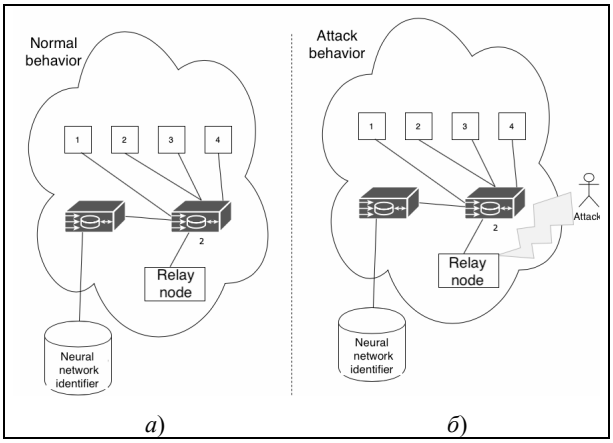


Рис. 7. Экспериментальная модель

Fig. 7. Experimental model

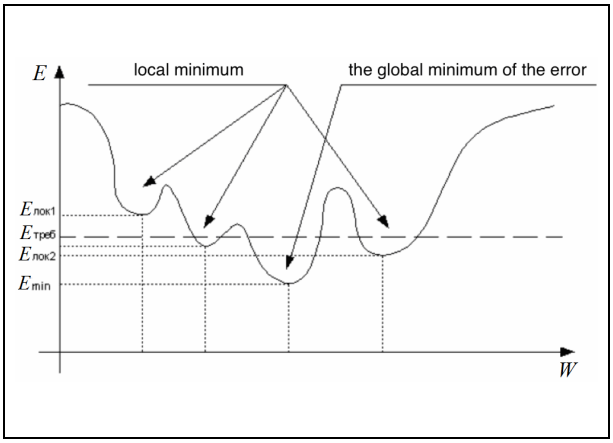


Рис. 8. Графическое представление результатов, полученных на экспериментальной модели

Fig. 8. Graphical presentation of the results obtained on the experimental model

В случае линейной модели с суммой квадратов в качестве функции ошибок поверхность ошибок представляет собой параболоид – гладкую поверхность, похожую на часть поверхности сферы, с единственным минимумом, который достаточно легко локализовать.

Заключение

Разработан нейросетевой подход к обнаружению вторжений в IoT-сети для идентификации DDoS/DOS-атак, отличающийся от аналогов тем, что обнаружение основано на классификации нормальных и опасных паттернов. Перспективным развитием нейросетевой системы обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей является расширение функциональности помощи и содействие пользователя путем выделения паттернов его поведения или распознавания случаев необходимости неотложной помощи. Модель ИНС была проверена на соответствие моделируемой сети.

Проанализированы основные типы систем обнаружения вторжений и выполнено краткое исследование работ в области нейросетевых решений. Предложено эффективное решение для защиты рабочей станции от несанкционированного доступа.

Осуществлена программная реализация ИНС на основе ряда Вольтера. Кроме того, рассмотрены теоретические предпосылки метода динамического построения ИНС на основе ряда Вольтерра. Даны рекомендации к реализации построения нейросетевого модуля.

Список источников

1. *Шахнов В.А., Власов А.И., Поляков Ю.А., Кузнецов А.С.* Нейрокомпьютеры: архитектура и схемотехника. Сер. 9. Приложение к журналу «Информационные технологии». М.: Машиностроение. 2000.
2. *Норткат С., Новак Д.* Обнаружение нарушений безопасности в сетях. Изд. 3-е. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003.
3. *Kanter I., Kinzel W., Kanter E.* Secure exchange of information by synchronization of neural networks // EPL (Europhysics Letters). 2002. V. 57. DOI: 10.1209/epl/i2002-00552-9.
4. *Kinzel W., Rujan P.* Improving a network generalization ability by selecting examples // EPL (Europhysics Letters). 1990. V. 13. P. 473–477.
5. *Kinzel W., Kante I.* Interacting neural networks and cryptography / In *Kramer B.* (Ed.) Advances in solid state physics. V. 42. P. 383–391. Berlin: Springer. 2002.
6. *Пупков К.А.* Многоуровневая модель интеллектуальной системы для динамических объектов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998. № 1.
7. *Сабитов А.Ф., Хафизов И.И.* Методы и средства измерений, испытаний и контроля: Методические указания к курсовому проектированию. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2004.
8. *Власов А.И.* Аппаратная реализация нейровычислительных управляющих систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 1999. № 2. С. 61–65.
9. *Vlasov A.I., Yudin A.V., Shakhnov V.A., Usov K.A., Salmina M.A.* Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. V. 12. № 20. P. 9390–9396.

10. *Demin A.A., Vlasov A.I.* Visual methods of formalization of knowledge in the conditions of the synchronous technologies of system engineering // ACM International Conference Proceeding Series. 2017. № 3166098. URL: https://doi.org/10.1145/3166094.3166098.
11. *Vlasov A.I., Grigoriev P.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A., Filin S.S., Migalin V.S.* SMART management of technologies: predictive maintenance of industrial equipment using wireless sensor networks // Entrepreneurship and Sustainability Issues. 2018. V. 6. № 2. P. 489–502.
12. *Yudin A., Kolesnikov M., Vlasov A., Salmina M.* Project oriented approach in educational robotics: from robotic competition to practical appliance // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. V. 457. P. 83–94.
13. *Vlasov A.I., Shakhnov V.A., Filin S.S., Krivoshein A.I.* Sustainable energy systems in the digital economy: concept of smart machines // Entrepreneurship and Sustainability Issues. 2019. V. 6. № 4. P. 1975–1986.
14. *Власов А.И., Юлдашев М.Н.* Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера // Датчики и системы. 2018. № 1 (221). С. 24–30.
15. *Khalzev S.E., Vlasov A.I., Shakhnov V.A.* Visual methods of high-level system design for digital hardware components // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 42024.
16. *Vlasov A.I., Krivoshein A.I., Filin S.S.* Concept of a universal smart circuit breaker with protection against spark discharge // Advances in Systems Science and Applications. 2020. V. 20. № 1. P. 1–12.
17. *Vlasov A.I., Filin S.S., Krivoshein A.I.* Universal smart circuit breaker concept // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM 2019. 2019. P. 8743080.
18. *Vlasov A., Yuldashev M.* Performance analysis of algorithms for energy-efficient data transfer in wireless sensor networks // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM 2019. 2019. P. 8743087.
19. *Prudius A.A., Karpunin A.A., Vlasov A.I.* Analysis of machine learning methods to improve efficiency of big data processing in industry 4.0 // Journal of Physics: Conference Series. 2019. P. 032065.
20. *Yuldashev M.N., Vlasov A.I.* Mathematical model of the general problem of state classification in wireless sensor networks // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012002.
21. *Zhalnin V.P., Zakharova A.S., Uzenkov D.A., Vlasov A.I., Krivoshein A.I., Filin S.S.* Configuration-making algorithm for the smart machine controller based on the internet of things concept // International Review of Electrical Engineering. 2019. V. 14. № 5. P. 375–384.
22. *Vlasov A.I., Muraviev K.A., Prudius A.A., Uzenkov D.A.* Load balancing in big data processing systems // International Review of Automatic Control. 2019. V. 12. № 1. P. 42–47.
23. *Vlasov A.I., Berdyugina O.N., Krivoshein A.I.* Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things // Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). 2018. P. 8570062.
24. *Yuldashev M.N., Vlasov A.I., Novikov A.N.* Energy-efficient algorithm for classification of states of wireless sensor network using machine learning methods // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1015. P. 032153.
25. *Власов А.И., Папулин С.Ю.* Анализ данных с использованием гистограммной модели комбинации признаков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2019. Т. 21. № 5. С. 18–27.
26. *Вирясова А.Ю., Власов А.И., Гладких А.А.* Нейросетевые методы дефектоскопии интегральных структур // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2019. № 2. С. 54–67.
27. *Evan D.* The internet of things – How the next evolution of the internet is changing everything // CISCO White Paper. April. 2011. P. 1–11.
28. *Bellekens X., Seeam A., Nieradzinska K., Tachtatzis C., Cleary A., Atkinson R., Andonovic I.* Cyber-physical-security model for safety-critical IoT infrastructures // Wireless World Research Forum Meeting 35 (WWRF35). Copenhagen, Denmark. 2015.
29. *Murphy K.* Machine learning: a probabilistic perspective. Adaptive computation and machine learning series. The MIT Press. 2012.
30. *Alsheikh M.A., Lin S., Niyato D., Tan H.-P.* Machine learning in wireless sensor networks: algorithms, strategies, and applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. V. 16. № 4. P. 1996–2018.
31. *Kozushko H.* Intrusion detection: Host-based and network-based intrusion detection system. Sept. 2003. V. 11.
32. *Nanduri A., Sherry L.* Anomaly detection in aircraft data using recurrent neural networks (RNN) / In: Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS). 2016. P. 5C2–1.
33. *Smith V., Chiang C.-K., Sanjabi M., Talwalkar A.S.* Federated multi-task learning / In: *Guyon I., Luxburg U.V., Bengio S., Wallach H., Fergus R., Vishwanathan S., Garnett R.* (Eds.) Advances in neural information processing systems. 2017. P. 4427–4437.
34. *Lear E., Droms R., Romascanu D.* Manufacturer usage description specification // IETF Network Working Group. URL: https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-opsawg-mud-25 (accessed: 08.04.2019).
35. *Rajasegarar S., Leckie C., Palaniswami M.* Hyperspherical cluster based distributed anomaly detection in wireless sensor networks // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2014. V. 74. № 1. P. 1833–1847.
36. *Miettinen M., Marchal S., Hafeez I., Asokan N., Sadeghi A., Tarkoma S.* IoT sentinel: Automated device-type identification for security enforcement in IoT // Proceedings of 37th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2017). Jun. 2017.
37. *Antonakakis M., April T., Bailey M., Bernhard M., Bursztein E., Cochran J., Durumeric Z., Halderman J.A., Invernizzi L., Kallitsis M., Kumar D., Lever C., Ma Z., Mason J., Menscher D., Seaman C., Sullivan N., Thomas K., Zhou Y.* Understanding the mirai botnet // 26th USENIX Security Symposium (USENIX Security 17). Vancouver, BC: USENIX Association. 2017. P. 1093–1110.

38. *Edwards S., Profetis I.* Hajime: Analysis of a decentralized internet worm for IoT devices // Rapidity Networks. Tech. Rep. 2016.
39. *Costan V., Devadas S.* Intel SGX explained // IACR Cryptology ePrint Archive. 2016. V. 2016. P. 86.
40. *Pa Y.M.P., Suzuki S., Yoshioka K., Matsumoto T., Kasama T., Rossow C.* IoTPOT: A novel honeypot for revealing current IoT threats // Journal of Information Processing. 2016. V. 24. № 3. P. 522–533.
41. *Малыхина М.П., Бегман Ю.В.* Нейросетевые экспертные системы: обучение нейронной сети // Труды Кубанского государственного университета. 2005. Т. 25. № 3. С. 93–94.

Информация об авторах

Андрей Игоревич Власов – к.т.н., доцент
SPIN-код: не представлен
Евгений Романович Захаров – аспирант
SPIN-код: не представлен
Валерия Олеговна Захарова – аспирант
SPIN-код: не представлен

Поступила в редакцию 19.11.2020.
Одобрена после рецензирования 04.12.2020.
Принята к публикации 14.12.2020.

Уважаемые читатели!

В Издательстве «Радиотехника» вышли книги

Лавров А.А., Антонов И.К.

МНОГОЛУЧЕВЫЕ РАДИОЛОКАТОРЫ. БОРЬБА С ДРОНАМИ

Монография
Научное издание
DOI 10.18127/B9785931082097
ISBN 978-5-93108-209-7

Рассмотрены основы построения, режимы работы, потенциальные характеристики и алгоритмы обработки сигналов многолучевых радиолокаторов, предназначенных для обнаружения малоскоростных малоразмерных целей. Описаны режимы метеообеспечения и обзора морской поверхности. Представлена структура программ расчета характеристик и имитационного моделирования. Использованы результаты исследований многолучевого экспериментального радиолокатора.

Для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов вузов, специализирующихся в области создания и эксплуатации систем радиолокации.

Дементьев А.Н., Арсеньев К.В., Насибулин М.Ш., Аралкин М.В., Лобков А.В.

ОРГАНИЗАЦИЯ СОЗДАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Монография
Научное издание
DOI 10.18127/B9785931082066
ISBN 978-5-93108-206-6

Приведены нормативы и нормы труда для расчёта трудоёмкости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и определения штата специалистов, необходимого для создания радиоэлектронных комплексов спутниковых систем. Особое внимание уделено расчёту трудоёмкости разработки отчётной научно-технической и рабочей конструкторской документации, а также программных средств вычислительной техники на основе действующих нормативных документов. Показаны примеры расчёта трудоёмкости типовых работ, проводимых в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Для широкого круга специалистов, связанных с созданием радиоэлектронных комплексов спутниковых систем в рамках выполнения и сопровождения НИОКР.

Original article

Neural network system for detecting and neutralizing remote unauthorized interference into the components of the Internet of Things

A. I. Vlasov[1], **E. R. Zakharov**[2], **V. O. Zakharova**[3]
[1–3] Department IU4 of Designing and Technology of Electronic Equipment,
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
[1] vlasovai@bmstu.ru, [3] Valeriyashe@yandex.ru

Abstract

In this work the authors have analyzed the neural network system for detecting and neutralizing remote and unauthorized interference with components of the Internet of Things. The main focus is on considering the neural network approach to detecting intrusions into the Internet of Things network, its monitoring and countering suspicious activity on the host. Features of development of model of artificial neural networks for application of apparatus of neural network in this direction have been considered. This allows you to reflect the successful identification of various types of attacks in terms of true and false positive results. However, the problems of obtaining data on overload and critical modes of the system remain unresolved. The use of a neural network system for detecting and neutralizing remote and unauthorized interference with components of the Internet of Things allows you to implement a module for detecting anomalies in the network, based on the Voltaire series, which considers the theoretical prerequisites of the method of dynamically building an artificial neural network. The main types of attacks, types of intrusion detection systems, interpretations of the obtained data, a brief study of works in the field of neural network solutions have been analyzed. An effective solution has been offered to protect workstations in the Internet of Things network from unauthorized access, and to configure security for all component modules. In conclusion, recommendations have been given for implementing the construction of a neural network module that detects deviations in the operation of the Internet of Things from normal modes.

Keywords

Internet of Things, neural networks, smart home, cryptography, network attacks, neural network system, network anomalies.

For citation

Vlasov A.I., Zakharov E.R., Zakharova V.O. **Neural network system for detecting and neutralizing remote unauthorized interference into the components of the Internet of Things. Neurocomputers. 2021. Vol. 23. No. 1. P. 63–80. DOI: 10.18127/j19998554-202101-07. (in Russian)**

References

1. *Shakhnov V.A., Vlasov A.I., Polyakov Yu.A., Kuznetsov A.S.* Nejrokomp'yutery: arkhitektura i skhemotekhnika. Ser. 9. Prilozhenie k zhurnalu «Informatsionnye tekhnologii». M.: Mashinostroenie. 2000. (in Russian)
2. *Nortkat S., Novak D.* Obnaruzhenie narusheniĭ bezopasnosti v setyakh. Izd. 3-e. M.: Izdatel'skiĭ dom «Vil'yams». 2003. (in Russian)
3. *Kanter I., Kinzel W., Kanter E.* Secure exchange of information by synchronization of neural networks. EPL (Europhysics Letters). 2002. V. 57. DOI: 10.1209/epl/i2002-00552-9.
4. *Kinzel W., Rujan P.* Improving a network generalization ability by selecting examples. EPL (Europhysics Letters). 1990. V. 13. P. 473–477.
5. *Kinzel W., Kante I.* Interacting neural networks and cryptography. In *Kramer B.* (Ed.) Advances in solid state physics. V. 42. P. 383–391. Berlin: Springer. 2002.
6. *Pupkov K.A.* Mnogourovnevaya model' intellektual'noj sistemy dlya dinamicheskikh ob''ektov. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. 1998. № 1. (in Russian)
7. *Sabitov A.F., Khafizov I.I.* Metody i sredstva izmerenij, ispytanij i kontrolya: Metodicheskie ukazaniya k kursovomu proektirovaniyu. Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. 2004. (in Russian)
8. *Vlasov A.I.* Apparatnaya realizatsiya nejrovychislitel'nykh upravlyayushchikh system. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 1999. № 2. S. 61–65. (in Russian)
9. *Vlasov A.I., Yudin A.V., Shakhnov V.A., Usov K.A., Salmina M.A.* Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices. International Journal of Applied Engineering Research. 2017. V. 12. № 20. P. 9390–9396.
10. *Demin A.A., Vlasov A.I.* Visual methods of formalization of knowledge in the conditions of the synchronous technologies of system engineering. ACM International Conference Proceeding Series. 2017. № 3166098. URL: https://doi.org/10.1145/3166094.3166098.
11. *Vlasov A.I., Grigoriev P.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A., Filin S.S., Migalin V.S.* SMART management of technologies: predictive maintenance of industrial equipment using wireless sensor networks. Entrepreneurship and Sustainability Issues. 2018. V. 6. № 2. P. 489–502.
12. *Yudin A., Kolesnikov M., Vlasov A., Salmina M.* Project oriented approach in educational robotics: from robotic competition to practical appliance. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. V. 457. P. 83–94.
13. *Vlasov A.I., Shakhnov V.A., Filin S.S., Krivoshein A.I.* Sustainable energy systems in the digital economy: concept of smart machines. Entrepreneurship and Sustainability Issues. 2019. V. 6. № 4. P. 1975–1986.

14. *Vlasov A.I., Yuldashev M.N.* Analiz metodov i sredstv obrabotki informatsii sensornogo klastera. Datchiki i sistemy. 2018. № 1 (221). S. 24–30. (in Russian)
15. *Khalzev S.E., Vlasov A.I., Shakhnov V.A.* Visual methods of high-level system design for digital hardware components. Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 42024.
16. *Vlasov A.I., Krivoshein A.I., Filin S.S.* Concept of a universal smart circuit breaker with protection against spark discharge. Advances in Systems Science and Applications. 2020. V. 20. № 1. P. 1–12.
17. *Vlasov A.I., Filin S.S., Krivoshein A.I.* Universal smart circuit breaker concept. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM 2019. 2019. P. 8743080.
18. *Vlasov A., Yuldashev M.* Performance analysis of algorithms for energy-efficient data transfer in wireless sensor networks. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM 2019. 2019. P. 8743087.
19. *Prudius A.A., Karpunin A.A., Vlasov A.I.* Analysis of machine learning methods to improve efficiency of big data processing in industry 4.0. Journal of Physics: Conference Series. 2019. P. 032065.
20. *Yuldashev M.N., Vlasov A.I.* Mathematical model of the general problem of state classification in wireless sensor networks. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012002.
21. *Zhalnin V.P., Zakharova A.S., Uzenkov D.A., Vlasov A.I., Krivoshein A.I., Filin S.S.* Configuration-making algorithm for the smart machine controller based on the internet of things concept. International Review of Electrical Engineering. 2019. V. 14. № 5. P. 375–384.
22. *Vlasov A.I., Muraviev K.A., Prudius A.A., Uzenkov D.A.* Load balancing in big data processing systems. International Review of Automatic Control. 2019. V. 12. № 1. P. 42–47.
23. *Vlasov A.I., Berdyugina O.N., Krivoshein A.I.* Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things. Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). 2018. P. 8570062.
24. *Yuldashev M.N., Vlasov A.I., Novikov A.N.* Energy-efficient algorithm for classification of states of wireless sensor network using machine learning methods. Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1015. P. 032153.
25. *Vlasov A.I., Papulin S.Yu.* Analiz dannykh s ispol'zovaniem gistogrammnoj modeli kombinatsii priznakov. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. 2019. T. 21. № 5. S. 18–27. (in Russian)
26. *Viryasova A.Yu., Vlasov A.I., Gladkikh A.A.* Nejrosetevye metody defektoskopii integral'nykh struktur. Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie. 2019. № 2. S. 54–67. (in Russian)
27. *Evan D.* The internet of things – How the next evolution of the internet is changing everything. CISCO White Paper. April. 2011. P. 1–11.
28. *Bellekens X., Seeam A., Nieradzinska K., Tachtatzis C., Cleary A., Atkinson R., Andonovic I.* Cyber-physical-security model for safety-critical IoT infrastructures. Wireless World Research Forum Meeting 35 (WWRF35). Copenhagen, Denmark. 2015.
29. *Murphy K.* Machine learning: a probabilistic perspective. Adaptive computation and machine learning series. The MIT Press. 2012.
30. *Alsheikh M.A., Lin S., Niyato D., Tan H.-P.* Machine learning in wireless sensor networks: algorithms, strategies, and applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. V. 16. № 4. P. 1996–2018.
31. *Kozushko H.* Intrusion detection: Host-based and network-based intrusion detection system. Sept. 2003. V. 11.
32. *Nanduri A., Sherry L.* Anomaly detection in aircraft data using recurrent neural networks (RNN). In: Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS). 2016. P. 5C2–1.
33. *Smith V., Chiang C.-K., Sanjabi M., Talwalkar A.S.* Federated multi-task learning / In: *Guyon I., Luxburg U.V., Bengio S., Wallach H., Fergus R., Vishwanathan S., Garnett R.* (Eds.) Advances in neural information processing systems. 2017. P. 4427–4437.
34. *Lear E., Droms R., Romascanu D.* Manufacturer usage description specification // IETF Network Working Group. URL: https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-opsawg-mud-25 (accessed: 08.04.2019).
35. *Rajasegarar S., Leckie C., Palaniswami M.* Hyperspherical cluster based distributed anomaly detection in wireless sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing. 2014. V. 74. № 1. P. 1833–1847.
36. *Miettinen M., Marchal S., Hafeez I., Asokan N., Sadeghi A., Tarkoma S.* IoT sentinel: Automated device-type identification for security enforcement in IoT. Proceedings of 37th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2017). Jun. 2017.
37. *Antonakakis M., April T., Bailey M., Bernhard M., Bursztein E., Cochran J., Durumeric Z., Halderman J.A., Invernizzi L., Kallitsis M., Kumar D., Lever C., Ma Z., Mason J., Menscher D., Seaman C., Sullivan N., Thomas K., Zhou Y.* Understanding the mirai botnet. 26th USENIX Security Symposium (USENIX Security 17). Vancouver, BC: USENIX Association. 2017. P. 1093–1110.
38. *Edwards S., Profetis I.* Hajime: Analysis of a decentralized internet worm for IoT devices. Rapidity Networks. Tech. Rep. 2016.
39. *Costan V., Devadas S.* Intel SGX explained. IACR Cryptology ePrint Archive. 2016. V. 2016. P. 86.
40. *Pa Y.M.P., Suzuki S., Yoshioka K., Matsumoto T., Kasama T., Rossow C.* IoTPOT: A novel honeypot for revealing current IoT threats. Journal of Information Processing. 2016. V. 24. № 3. P. 522–533.
41. *Malykhina M.P., Begman Yu.V.* Nejrosetevye ekspertnye sistemy: obuchenie nejronnoj seti. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2005. T. 25. № 3. S. 93–94. (in Russian)

Information about the authors

Andrey I. Vlasov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Evgeny R. Zakharov – Post-graduate Student
Valeria O. Zakharova – Post-graduate Student

The article was submitted 19.11.2020.
Approved after reviewing 04.12.2020.
Accepted for publication 14.12.2020.

Научная статья
УДК 004.9.612.17, 616.7, 616.1
DOI: 10.18127/j19998554-202101-08

Нейроаналитическая модель сопоставительных исследований клинической и кафистной активных ортостатических проб

Г. И. Микита[1]
[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)

Аннотация

Постановка проблемы. Работа посвящена исследованию клинической и кафистной (дословно от греческого καθιστα – сидя) активных ортостатических проб. Вегетативное состояние человека-оператора в системе человек – машина может определяться через анализ кардиоинтервалов с применением активной ортостатической пробы. При клиническом методе активной ортостатической пробы обследуемый осуществляет самостоятельно активный подъем из положения лежа, в котором регистрируются показания кардиоинтервалов, в положение стоя, в котором вновь регистрируются показания кардиоинтервалов, и затем вновь в положение лежа, также с регистрацией кардиоинтервалов. В связи с тем, что на базе клинической ортостатической пробы оперируют такими показателями вариабельности кардиоинтервалов, как мода, амплитуда моды, разность между максимальным и минимальным значениями периодов кардиоинтервалов, необходимо провести статистический и корреляционный анализ для основных показателей вариабельности при обоих методах и определить коэффициент их корреляции.

Цель. Создать нейроаналитическую модель уровней функционального напряжения нервной системы и вегетативного тонуса человека-оператора в системе человек – машина для сопоставительных исследований клинической и кафистной активных ортостатических проб.

Результаты. Отмечено, что процедура проведения активной ортостатической пробы кафистным методом заключается в том, что кардиоинтервалы фиксируются из положения сидя, а затем из положения стоя. Доказано, что измерения в положении лежа при клиническом методе и в положении сидя при кафистном методе имеют коэффициент корреляции выше критического, что позволяет считать результаты проб идентичными вне зависимости от метода.

Практическая значимость. Разработанная нейроаналитическая модель позволила минимизировать требования к оснащению кабинетов лабораторий для проведения ортостатической пробы и показала следующее: время проведения исследований по кафистному методу в несколько раз меньше, чем при клиническом; кафистный метод более комфортный для обследуемых, чем клинический; кафистный метод позволяет получать данные на рабочих местах.

Ключевые слова

Ортостатическая проба, кафистный метод, вегетативная нейросистема.

Для цитирования

Микита Г.И. **Нейроаналитическая модель сопоставительных исследований клинической и кафистной активных ортостатических проб // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 81–93. DOI: 10.18127/j19998554-202101-08.**

Введение

Вегетативное состояние человека-оператора в системе человек – машина может определяться через анализ кардиоинтервалов с применением активной ортостатической пробы [1–4]. При клиническом методе активной ортостатической пробы обследуемый осуществляет самостоятельно активный подъем из положения лежа, в котором регистрируются показания кардиоинтервалов, в положение стоя, в котором вновь регистрируются показания кардиоинтервалов, и затем вновь в положение лежа, также с регистрацией кардиоинтервалов [3]. В связи с тем, что в [3] на базе клинической ортостатической пробы оперируют такими показателями вариабельности кардиоинтервалов, как мода M_0, с, амплитуда моды AM_0, %, разность между максимальным и минимальным значениями периодов кардиоинтервалов DX, с, необходимо провести статистический и корреляционный анализ для основных показателей вариабельности при обоих методах и определить коэффициент их корреляции.

Ц е л ь р а б о т ы – создать нейроаналитическую модель уровней функционального напряжения нервной системы и вегетативного тонуса человека-оператора в системе человек – машина для сопоставительных исследований клинической и кафистной активных ортостатических проб.

© Микита Г.И., 2021

Обзор предшествующих работ

Комплекс для обработки кардиоинтервалограмм «ВариКард» и программное обеспечение для регистрации и анализа ЭКГ «ИКИМ 7» ООО «Института внедрения новых медицинских технологий «РАМЕНА» (г. Рязань, Россия) позволяют вести анализ кардиоинтервалов.

Условия проведения клинической ортостатической пробы описаны в работах [2, 3]. Проба берется в утренние часы, через два и более часа после еды. Испытуемому предоставляется 10 минут отдыха в положении сидя. Затем выполняется первая часть исследования лежа на спине при спокойном дыхании, при этом осуществляется запись кардиоинтервалов (не менее 200 периодов). Далее опять 10 минут отдыха, но уже в положении сидя. Потом следует вторая часть исследования: обследуемый встает, осуществляется запись кардиоинтервалов. Проходит 10 минут отдыха в положении сидя, и выполняется третья часть: обследуемый ложится на спину, и при спокойном дыхании осуществляется третья запись кардиоинтервалов [2, 3].

При кафистном методе замер кардиоинтервалов проводится в положении сидя и стоя. Метод подробно изложен в [4]. Относительно клинического этот метод более комфортный и занимает меньше времени на его проведение.

Исследования ученых из Амстердамского университета (Нидерланды) показали, что при клинической пробе 3–10% обследуемых теряют сознание [5]. Исследования специалистов из клиники Майо (США) подтверждают, что средний прирост ортостатической частоты сердечных сокращений при клиническом методе может составлять до 44 уд/мин [6, 12, 13–15].

Работы ученых Университета Вандербильта (Нэшвилл, Теннесси, США) показали, что по ортостатической пробе можно исследовать осанку [7, 8]. Исследования, выполненные в этом университете, также установили связь между биорефлексом и ортостатической пробой [9, 10].

Исследования немецких ученых из клиники им. Франца Волхарда (Берлин, Германия) и Гарвардской медицинской школы (США) выявили, что клинический метод может вызывать ортостатическую непереносимость [11, 16, 17].

Связь ортостатической пробы с диабетом и частотой сердечных сокращений обнаружена в работах [18, 19]. В работах [20–23] медико-диагностические экспертные системы коррелируются с адаптивными реакциями организма на экстремальные факторы.

Все эти исследования доказывают большую информативность ортостатических проб и могут использоваться для оценки состояния человека-оператора.

Рассмотрим подробнее *показатели вариабельности кардиоинтервалов (КИ)* и их физиологические и нейронные взаимосвязи.

Мода M_0, с – самый частый период КИ, характеризующий уровень функционирования сердечно-сосудистой системы (ССС).

Амплитуда моды AM_0, % – число, показывающее в процентах содержание периодов M_0 в выборке КИ.

AM_0 характеризует степень активации симпатического отдела (СО) вегетативной нервной системы (ВНС), оценивает стабилизирующий эффект централизации управления ритмом сердца и условный показатель активности СО регуляции.

Вариационный размах DX, с – разность между максимальным и минимальным значениями периодов кардиоинтервалов.

DX показывает активность парасимпатического отдела (ПО) ВНС, состояние подкорковых нейронов, максимальную амплитуду регуляторных влияний.

Важным интегральным показателем функциональности ВНС является ПАРС – *показатель активности регуляторных систем*, который измеряется в баллах от 1 до 10. В табл. 1 представлены значения ПАРС в виде уровней функционального напряжения (УФН) ВНС и соответствующих им баллов.

ПАРС включает в себя *следующие физиологические показатели*: регуляцию сердечного ритма (РСР); функции автоматизма (ФА); вегетативный гомеостаз (ВГ); устойчивость регуляции ритма сердца (УРРС); активность подкорковых нейронных центров (АПНЦ) – вазомоторного центра (ВЦ) и симпатического сердечно-сосудистого центра (СССЦ).

Таблица 1. *Значения ПАРС*

Уровни функционального напряжения ВНС	Значения, баллы
Оптимальный	1
Нормальный	2
Умеренный	3
Выраженный	4
Резко выраженный	5
Перенапряжение регуляторных механизмов	6
Резко выраженное перенапряжение	7
Истощение регуляторных систем	8
Резко выраженное истощение регуляторных систем	9
Срыв механизмов регуляции	10

Нейроаналитическая модель УФН нервной системы и вегетативного тонуса человека-оператора

Представленная на рис. 1 первая часть нейроаналитической модели показывает механизм выявления уровней функционального напряжения, систему управления ВНС работой внутренних органов человека-оператора в системе человек – машина. Симпатический отдел (СО) и парасимпатический (ПО) являются нейроподсистемами ВНС.

Особенность СО в референтном нейронном пути заключается в том, что от СО к сердечно-сосудистой системе (ССС) нейронный путь проходит через вставной нейрон типа В (скорость прохождения нейронного импульса 25–30 м/с), а не напрямую, как от ПО к ССС. СО и ПО ВНС являются дендритами для нейронной подсистемы ССС.

Аксоном ССС являются КИ, представляющие собой аналитическую основу вариабельности. Поэтому модель названа нейроаналитической.

Эта модель построена по нейронному принципу. КИ имеют несколько коллатералей, заканчивающихся в аналитических нейронах: мода (M_0); амплитуда моды (AM_0); вариационный размах (DX); РСР; ФА; ВГ; УРРС; АПНЦ – ВЦ и СССЦ.

РСР, ФА, ВГ, УРРС, ВЦ, СССЦ являются дендритами для ПАРС.

Нейроаналитическая модель УФН ВНС может применяться для обследуемых, находящихся в положении лежа, сидя и стоя.

На рис. 1 сплошными линиями обозначены нейронные связи, а пунктирными линиями – аналитические обратные связи.

Для клинической и кафистной активных ортостатических проб (АОП) оценим на примере наиболее информативного и комплексного интегрального показателя функциональности ВНС ПАРС корреляцию, коэффициент регрессии r, критиче-

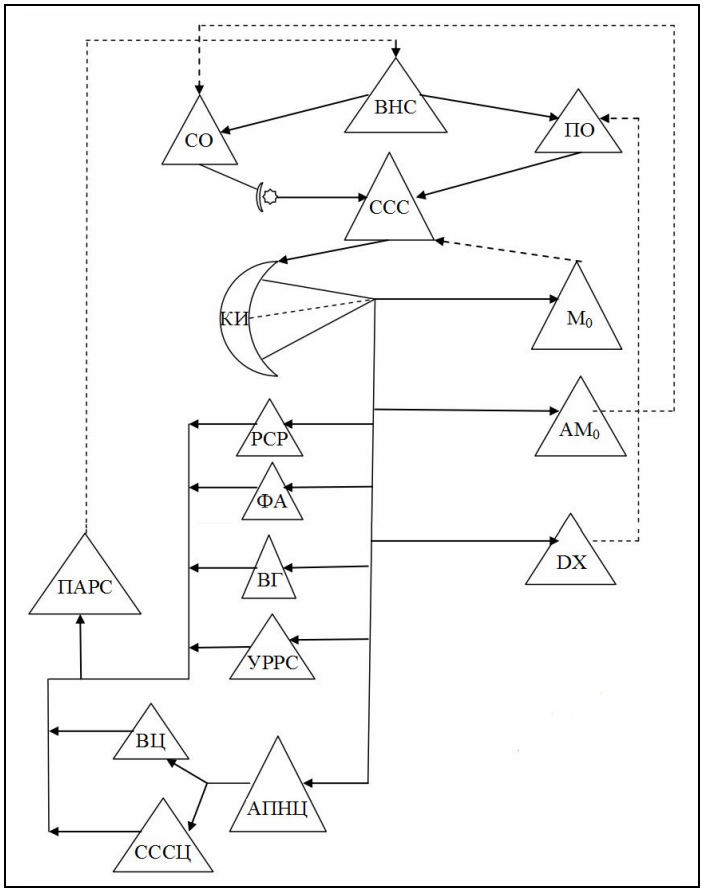


Рис. 1. Первая часть нейроаналитической модели – УФН ВНС
Fig. 1. First part of the neuroanalytical model – LFS ANS

ский коэффициент корреляции r_k, а также выведем уравнение линейной регрессии с использованием метода Гаусса. Исследования проводились при комфортном типе климата с соблюдением субъективных условий: утром, натощак.

Статистический анализ данных показал, что плотность вероятности распределения ПАРС для клинической АОП может иметь вид, представленный на рис. 2, *а*, а для кафистной АОП – на рис. 2, *б*.

Гистограмма относительных попаданий в интервал (полигон) показана на рис. 3, *а* для клинической АОП и на рис. 3, *б* для кафистной АОП.

Эмпирическая функция распределения $w_{\Sigma} = f(h_i)$ приведена на рис. 4, *а* для клинической АОП и на рис. 4, *б* для кафистной АОП. Эмпирическая функция является накопительной по вертикальной оси, т.е. каждое предшествующее значение накапливается, а последующее прибавляется к уже накопленному. На основе $w_{\Sigma} = f(h_i)$ получена табл. 2, где представлены показатели эмпирической функции распределения ПАРС.

Коэффициенты ассиметрии в обоих методах меньше 3 и это позволяет утверждать, что в обоих методах распределение ПАРС умеренно симметричное, *приближенное к нормальному закону распределения*, с правосторонней ассиметрией.

Отрицательный коэффициент эксцесса E_k указывает на плосковершинность распределения ПАРС при клинической АОП и кафистной АОП.

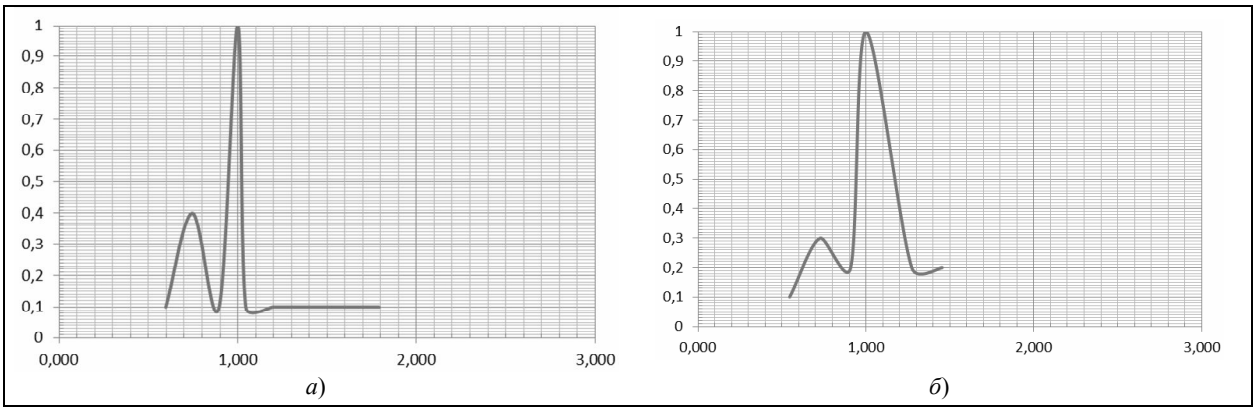


Рис. 2. Графическое представление плотности распределения ПАРС при клинической АОП (*а*) и кафистной АОП (*б*): по горизонтальной оси – ПАРС в относительных единицах (о.е.), т.е. математическое ожидание приходится на 1; по вертикальной оси – вероятность *P* появления значений ПАРС в опытах

Fig. 2. Graphical representation of the distribution density of IARS in clinical AOT (*a*) and kathistic AOT (*b*): along the horizontal axis – IARS in relative units (p.u.), i.e. the mathematical expectation is 1; along the vertical axis – probability *P* of the appearance of the IARS values in the experiments

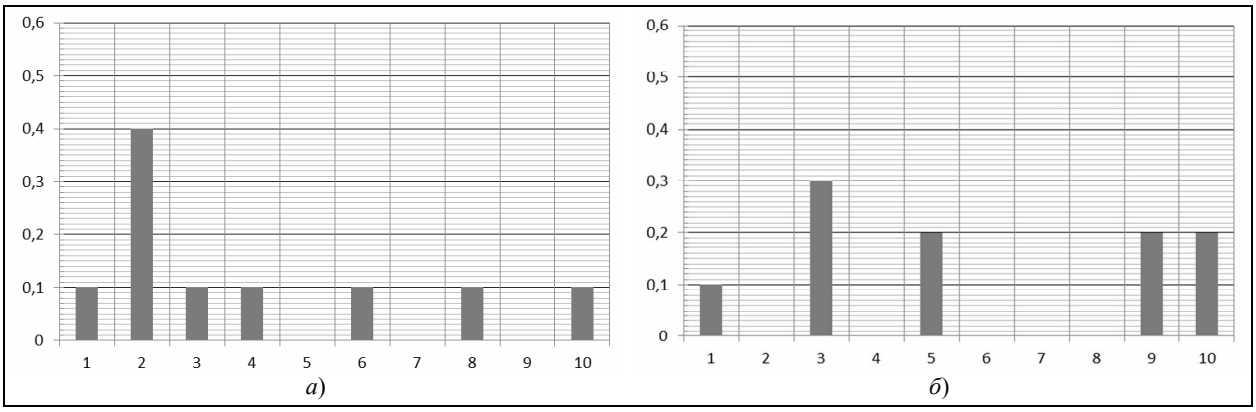


Рис. 3. Гистограммы относительных попаданий в интервал (полигон) при клинической АОП (*а*) и кафистной АОП (*б*): по горизонтальной оси – относительные интервалы опытных значений ПАРС; по вертикальной оси – вероятность попаданий опытных значений ПАРС

Fig. 3. Histograms of relative hits in the interval (polygon) with clinical AOT (*a*) and kathistic AOT (*b*): on the horizontal axis – relative intervals of the experimental IARS values; along the vertical axis – probability of hitting the experimental IARS values

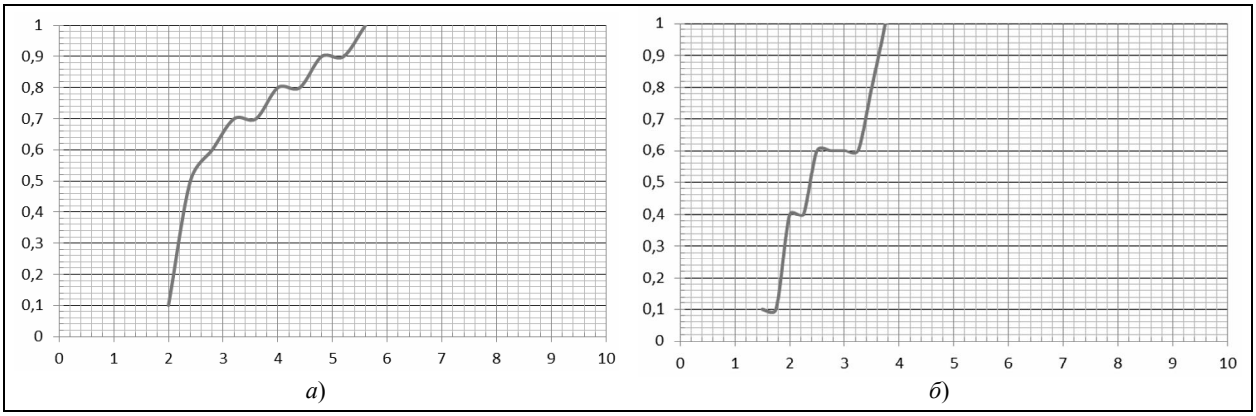


Рис. 4. Графики эмпирической функции распределения ПАРС при клинической АОП (*а*) и кафистной АОП (*б*): по горизонтальной оси – опытные значение ПАРС в баллах; по вертикальной оси – вероятность попаданий опытных значений ПАРС

Fig. 4. Graphs of the empirical distribution function of IARS in clinical AOT (*a*) and kathistic AOT (*b*): along the horizontal axis – experimental value of IARS in points; on the vertical axis – probability of hitting the experimental values of IARS

Таблица 2. ***Показатели эмпирической функции распределения ПАРС***

№	Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Клиническая АОП	Кафистная АОП
1	Мода	M_0	ед.	2,600	2,125
2	Медиана	m_ε	ед.	2,890	2,408
3	Выборочное среднее	x_{sr_v}	ед.	3,400	2,825
4	Выборочная дисперсия	D_v	–	1,312	0,648
5	Выборочное среднеквадратическое отклонение	σ_v	–	1,145	0,805
6	Коэффициент вариации	V	–	0,337	0,285
7	Центральный эмпирический момент третьего порядка	m_3	–	1,459	0,057
8	Центральный эмпирический момент четвертого порядка	m_4	–	4,388	0,605
9	Коэффициент ассиметрии	A_3	–	0,971	0,109
10	Коэффициент эксцесса	E_k	–	–0,451	–1,558
11	Критерии распределения: среднее среднеквадратическое отклонение	 $a = x_{sr\text{-}v}$ $\sigma = \sigma_v$	 – –	 3,400 1,145	 2,825 0,805
12	Выборочный коэффициент ассиметрии	γ_{an}	–	0,854	0,192
13	Выборочный коэффициент эксцесса	$\gamma_{эn}$	–	–0,764	–1,758
14	Среднеквадратическое отклонение $\gamma_{эn}$	σ_{ke}	–	0,922	0,922
15	Выборочный коэффициент отношения	k_v	–	0,828	1,906
16	Стандартное отклонение	СТО	балл	0,409	0,291
17	Коэффициент Стъюдента	k_s	–	2,262	2,262
18	Доверительный интервал	Δx	балл	0,924	0,658
19	Коэффициент отношения доверительного интервала к систематической погрешности	k_d	–	924,227	658,402

Для выявления приближения распределения ПАРС к нормальному был применен метод на основе выборочных коэффициентов ассиметрии и эксцесса.

Значения выборочных коэффициентов ассиметрии γ_{an} меньше 3 в обоих методах АОП, и это позволяет утверждать, что распределение ПАРС умеренно симметричное, приближенное к нормальному закону распределения, с правосторонней ассиметрией.

Отрицательный выборочный коэффициент эксцесса $\gamma_{эп}$ указывает на плосковершинность распределения ПАРС в обоих методах АОП.

Среднеквадратическое отклонение выборочного коэффициента эксцесса равно $\sigma_{ke} = 0{,}922$ в обоих методах.

Отношение выборочного коэффициента эксцесса к выборочному среднеквадратическому отклонению коэффициента эксцесса $k_v = |\gamma_{эп}/\sigma_{ke}|$ меньше 3, что позволило заключить, что для обоих методов распределение ПАРС *приближено к нормальному*. В этом случае уравнение нормальной кривой для ординаты имеет вид

$$y_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2t^2}},$$

где *t* – нормированное оклонение:

$$t = \frac{x - X_{sr}}{\sigma}.$$

Вероятность близости к среднему значению опыта определяется как

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{1}{2t^2}}.$$

Для клинического метода СТО составляет 0,409 балла, для кафистного – 0,291 балла (табл. 2).

Проведенное исследование доказало, что распределение ПАРС приближено к нормальному, что позволяет аргументированно уменьшить число опытов в одном исследовании до n = 10. Исходя из P = 0,95 и n = 10, коэффициент Стъюдента составит 2,262, а доверительный интервал Δx для обоих методов меньше 1 балла.

Коэффициент отношения доверительного интервала к систематической погрешности находится как $k_d = \Delta x/\delta > 3$, где системная погрешность δ = 0,001 балла, поэтому систематическую погрешность можно не учитывать.

Регрессионный анализ распределений ПАРС при положении лежа (при клиническом методе) и положении сидя (при кафистном методе) позволил вывести выборочное уравнение линейной регрессии:

$$y(x) = 0{,}632x + 0{,}895,$$

где y – значение ПАРС в положении лежа; x – значение ПАРС в положении сидя.

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0{,}842$, что близко к 1, следовательно, регрессионная модель близка к экспериментальным данным.

Графики регрессии по выборочному уравнению линейной регрессии представлены на рис. 5. В этом случае коэффициент корреляции получается равным r = 0,918.

Из вывода уравнения линейной регрессии методом Гаусса следует, что y(x) = 0,868x + 0,032. Графики регрессии, полученные из уравнения линейной регрессии по методу Гаусса, приведены на рис. 6.

Из приведенных рисунков следует, что оба уравнения дают близкие графики регрессии.

Коэффициенты в уравнениях регрессии могут различаться в зависимости от уравнения регрессии (выборочное, по методу Гаусса), однако на результат это не оказывает существенного влияния.

Для определения числа измерений с требуемой точностью был применен метод точечной оценки, который показал, что минимальное число опытов равно трем.

Проведенная статистическая проверка гипотезы о минимальном числе опытов при уровне значимости a = 0,05 и числе степеней свободы $f_s = 3$ показала, что критический коэффициент корреляции составляет $r_k = 0{,}878$. Коэффициент корреляции исследуемых распределений равен r = 0,918.

Если $r > r_k$, то гипотеза о минимальном числе опытов подтверждается:

$(r = 0{,}918) > (r_k = 0{,}878)$, G = 1.

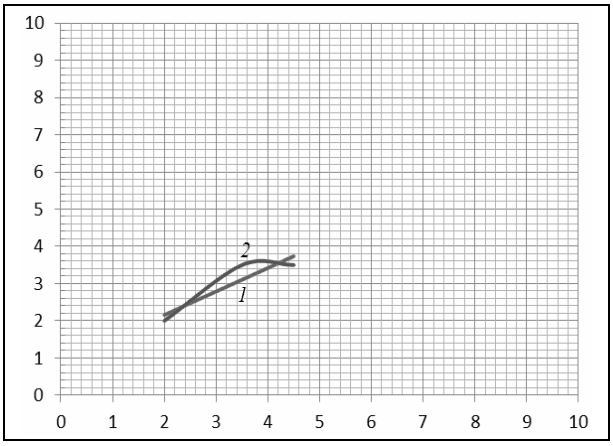


Рис. 5. Графики регрессии по выборочному уравнению линейной регрессии (по оси *x* – данные ПАРС в положении сидя (кафистный метод); по оси *y* – данные ПАРС в положении лежа (клинический метод)): *1* – регрессионная модель; *2* – экспериментальные данные

Fig. 5. Graphs of regression according to the selective linear regression equation (along the *x*-axis – data of the IARS in the sitting position (kathist method); along the *y*-axis – data of the IARS in the supine position (clinical method)): *1* – regression model; *2* – experimental data

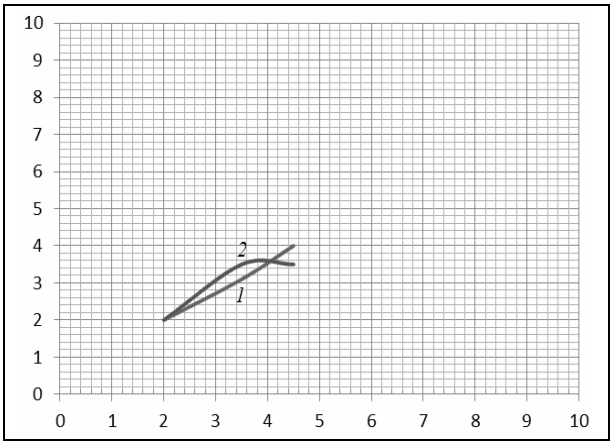


Рис. 6. Графики регрессии по уравнению линейной регрессии, полученные методом Гаусса (по оси *x* – данные ПАРС в положении сидя (кафистный метод); по оси *y* – данные ПАРС в положении лежа (клинический метод)): *1* – регрессионная модель; *2* – экспериментальные данные

Fig. 6. Graphs of regression according to the linear regression equation, obtained by the Gauss method (along the *x*-axis – data from IARS in a sitting position (kathist method); along the *y*-axis – data from IARS in a prone position (clinical method)): *1* – regression model; *2* – experimental data

Исходя из зависимости $f_s(r_k)$ для $r = 0{,}918$, установлено, что достаточно одного опыта.

Аналогичные исследования были проведены для M_0, AM_0, DX в положении лежа (клинический метод) и сидя (кафистный метод).

Основные показатели эмпирических функций распределения для M_0, AM_0, DX приведены в табл. 3.

Таблица 3. ***Основные показатели эмпирических функций распределения для M_0, AM_0, DX***

№	Показатель	Обозначение	Клиническая АОП			Кафистная АОП		
			M_0	AM_0	DX	M_0	AM_0	DX
1	Коэффициент ассиметрии	A_3	1,487	1,417	1,628	1,826	2,737	3,162
2	Коэффициент эксцесса	E_k	–0,705	–0,415	–0,304	0,333	4,989	7,000
3	Выборочный коэф. ассиметрии	γ_{an}	1,112	0,173	–0,301	0,538	0,770	1,252
4	Выборочный коэф. эксцесса	$\gamma_{эп}$	0,260	–1,561	–1,797	–1,468	–0,046	0,920
5	Выборочный коэф.отношения	k_v	0,282	1,693	1,948	1,592	0,050	0,997
6	Стандартное отклонение	СТО	0,026 с	6,433%	0,025 с	0,024 с	4,242%	0,027 с
7	Коэффициент Стъюдента	k_s	2,262	2,262	2,262	2,262	2,262	2,262
8	Доверительный интервал	Δx	0,060 с	14,552%	0,057 с	0,055 с	9,596%	0,062 с
9	Коэффициент корреляции	r	0,999	0,915	0,925	0,999	0,915	0,925
10	Уравнение линейной регрессии по методу Гаусса	–	1* y	2* y	3* y	1* x	2* x	3* x

П р и м е ч а н и е : 1* – для M_0 $y(x)_{M0} = 1{,}119x + 0{,}001$; 2* – для AM_0 $y(x)_{AM0} = 1{,}489x - 0{,}002$; 3* – для DX $y(x)_{DX} = 1{,}603x - 0{,}029$

На основе данных табл. 3 можно сделать вывод о том, что функции распределений M_0, AM_0, DX приближены к нормальному, а r больше r_k.

Проведенное исследование позволяет перейти к разработке второй части нейроаналитической модели, анализирующей вегетативный тонус человека-оператора (ЧО) в системе человек – машина (СЧМ). Рассмотрим показатели этой части.

Индекс напряжения (ИН) определяется в соответствии с выражением

$ИН = AM_0/(2M_0DX)$, [у.е].

Различают два вида ИН: ИН1 и ИН2. При этом ИН1 рассчитывается по данным, снятым в положении сидя, а ИН2 определяется по данным, снятым в положении стоя.

ИН1 показывает вегетативный тонус (ВТ). Индекс вегетативного тонуса численно равен ИН1:

ИН1 = ИВТ.

При ИН1 < 30 у.е. – ваготонический вегетативный тонус (ВВТ);

при ИН1 = 30–60 у.е. – эутонический вегетативный тонус (ЭВТ);

при ИН1 = 61–90 у.е. – сбалансированный вегетативный тонус (СВТ), т.е. сбалансированное состояние регуляторных систем ВНС;

при ИН1 = 91–160 у.е. – умеренное преобладание тонуса (УПТ) СО ВНС;

при ИН1 > 160 у.е. – перенапряжение регуляторных систем (ПРС).

Вегетативный тонус может определяться также по эмпирическому выражению вегетативного индекса Кердо (ВИК):

ВИК = (1 – DD/ЧСС)·100%,

где DD – диастолическое давление, мм рт. ст.; ЧСС – число сердечных сокращений в минуту.

Индекс вегетативной реактивности (ИВР) при активной ортостатической пробе находится как отношение ИН2 к ИН1:

ИВР = ИН2/ИН1,

где ИН1 – индекс напряжения при положении сидя, у.е.; ИН2 – индекс напряжения при положении стоя, у.е.

Вегетативная реактивность (ВР) определяется по табл. 4, где обозначено: Н – нормальная ВР; Г – гиперсимпатокотоническая ВР (термин из физиологии), т.е. усиленная; А – асимпатикотоническая ВР (термин из физиологии), т.е. ослабленная.

Таблица 4. ***Вегетативная реактивность***

ИВТ	Значение, у.е.	Н	Г	А
		ИВР	ИВР	ИВР
1	< 30	1…3	> 3	< 1
2	30–60	0,7…2,5	> 2,5	< 0,7
3	61–90	0,7…2	> 2	< 0,7
4	91–160	0,7…1,5	> 1,5	< 0,7
5	> 160	0,7…1,5	> 1,5	< 0,7

Ослабленный симпатический отдел (ОСО) ВНС определяется по индексу вегетативного тонуса (меньше 30 у.е.) и вегетативной реактивности 1, …, 3:

ОСО = (ИВТБ < 30) ^ (ВР = 1, …, 3) = 1.

Доминирование симпатического отдела (ДСО) ВНС находится как

ДСО = (ИВТ = {30, …, 90}) ^ (ВР > 3) = 1.

По моде M_0, амплитуде моды AM_0, вариационному размаху DX, индексам напряжений ИН1, ИН2 и вегетативной реактивности (ВР) анализируется кардиопатия (КП). По этим показателям определяются несколько критериев функциональности организма. Рассмотрим их подробнее.

Замедление атриовентригулярной проводимости сердца (АВП) – это предсердно-желудочковая проводимость. АВП – это время прохождения электрического импульса от синоатриального нейронного узла до миокарда желудочков (на электрокардиограмме (ЭКГ) – это PQ интервал, который в норме составляет 0,12 с).

Так же определяется нарушение процессов реполяризации (НПР) в сердце. По ИВТ и ВР определяется синдром Вольфа – Паркинсона – Уайта (СВПУ) – врожденная аритмия и тахикардия. По ИВТ и ВР определяется атриовентрикулярная блокада первой степени, экстрасистолия. Атриовентрикулярная блокада (АБ) – это нарушение сократимости сердечной мышцы, ослабление или прекращение проводимости электрического импульса по атривентрикулярному нейронному узлу. При первой степени на ЭКГ уширяется интервал PQ на 0,02 с.

По ИН1, ИН2, ВР определяются гастрит, гастродуоденит, язвенная болезнь желудка, двенадцатиперстной кишки, гипермоторная дискенезия желчного пузыря, состояние печени (ЖКТ), сопутствующая цереброастения.

Цереброастения (Ц) – это состояние, сопровождающееся повышенной утомляемостью (астения), головокружениями, приступами головной боли, ослаблением.

По сочетанию показателей вариабельности (СПВ) СС, приведенных для определения кардиопатии, определяется синдром вегетососудистой дистонии (СВСД); по M_0, AM_0, DX, ИН1 – заболевания органов дыхания – бронхит, пневмония (П); по M_0, AM_0, DX, ИН1, ИН2 определяется острая респираторная вирусная инфекция (ОРВИ), что особенно актуально при пандемии типа коронавируса, так как это позволяет определить наличие вируса в экспресс-режиме; по M_0, AM_0, DX, ИН1, ИН2 определяются аллергические дерматозы, отек Квинке, крапивница, экзема, нейродермит, псориаз, диффузный нейродермит (Д).

Вторая часть нейроаналитической модели, анализирующая ВТ ЧО в СЧМ, представлена на рис. 7. Здесь приняты следующие обозначения: ВТ – вегетативный тонус; ЧО – человек-оператор; ЧМ – человек – машина; КИ – кардиоинтервалы; M_0 – мода; AM_0 – амплитуда моды; DX – вариационный размах; ИН1 – индекс напряжения при положении сидя; ИН2 – индекс напряжения при положении стоя; Ц – цереброастения; УПТ СО – умеренное преобладание тонуса симпатического отдела; СО – симпатический отдел ВНС; ПО – парасимпатический отдел ВНС; ИВТ – индекс вегетативного тонуса; ИВР – индекс вегетативной реактивности; ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; ПРС – перенапряжение регуляторных систем; ОРВИ – острая респираторная вирусная инфекция; П – заболевания органов дыхания; КП – кардиопатия; Д – дерматологические заболевания; ВВТ – ваготонический вегетативный тонус; ЭВТ – эутонический вегетативный тонус; СВТ – сбалансированный вегетативный тонус; Н – нормальная ВР (вегетативная реактивность); Г – гиперсимпатокотоническая ВР; А – асимпатикотоническая ВР; АВП – атриовентригулярная проводимость сердца; СВСД – синдром вегетососудистой дистонии; НПР – нарушение процессов реполяризации; ОСО – ослабленный симпатический отдел; ДСО – доминирование симпатического отдела ВНС; СВПУ – синдром Вольфа – Паркинсона – Уайта; АБ – атриовентрикулярная блокада.

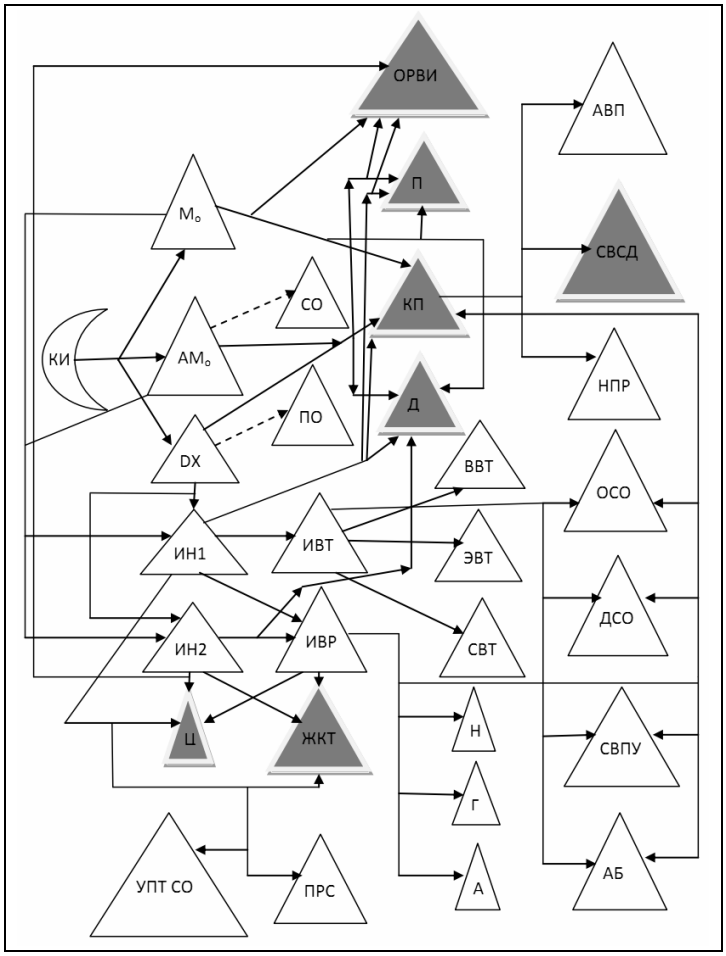


Рис. 7. Вторая часть нейроаналитической модели – ВТ ЧО в СЧМ

Fig. 7. Second part of the neuroanalytical model – VT HO in HMS

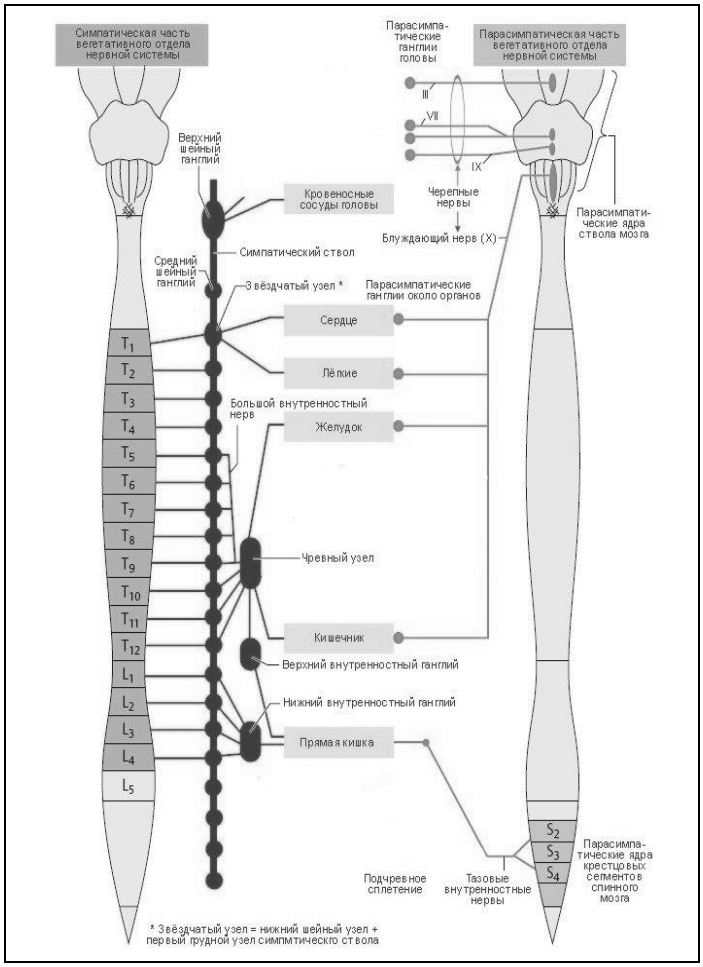


Рис. 8. Модель нейронной системы ВНС

Fig. 8. Model of the neuron system ANS

Результаты исследований и их обсуждение

Представленная на рис. 8 модель нейронной системы ВНС, являющейся отделом нервной системы, характеризует нейронные связи функционирования внутренних органов и гомеостаза. Она показывает взаимосвязь ССС с вегетативным тонусом ВНС по нейронным цепям: симпатический отдел ВНС – нейрон – трехзвездчатый узел – нейрон – сердце; парасимпатический отдел ВНС – ядра ствола мозга – блуждающий нерв – нейрон – ССС.

Сенсорные сигналы от органов поступают в IV слой коры головного мозга и через нейроны, локализованные в V слое, поступают к мозговому стволу через нервные волокна, спинному мозгу и СО ВНС. Нейроны, локализованные в VI слое идут к таламусу и ПО ВНС. Таким образом, осуществляется обратная связь от органов с отделами ВНС.

За счет такой организации нейронной системы функциональность внутренних органов, кожи, кровеносных сосудов оказывается корреляционно связанной с ЧСС и КИ, по данным которых осуществляется функционирование нейроаналитической модели.

Заключение

В работе представлены результаты разработки нейроаналитической модели уровней функционального напряжения нервной системы и вегетативного тонуса человека-оператора в системе человек – машина. Предложенная нейроаналитическая модель:

1) позволила провести сравнительные сопоставительные исследования клинической и кафистной активных ортостатических проб;

2) доказала, что функции распределения ПАРС, M_0, AM_0, DX приближаются к нормальному закону, а коэффициент корреляции этих показателей по обоим методам выше критического, что позволило сделать вывод об их идентичности;

3) показала, что время проведения исследований по кафистному методу в несколько раз меньше, чем при клиническом;

4) показала, что кафистный метод более комфортный для исследуемых, чем клинический;

5) показала, что кафистный метод позволяет получать данные на рабочих местах;

6) показала, что кафистный метод позволяет осуществлять дистанционный сбор данных с рабочих мест от ЧО;

7) позволила минимизировать требования к оснащению кабинетов лабораторий для проведения ортостатической пробы;

8) позволила получать данные от летчиков и подводников в рабочей обстановке;

9) позволила получать данные от космонавтов.

Список источников

1. *Барташевич В.В., Микита Г.И., Гунба Д.Д., Щиголь Б.И., Дорофеев А.Д.* Модификация активной ортостатической пробы в оценке вегетативного статуса организма // Мануальная терапия. 2019. № 2 (74). С. 53–57.
2. *Микита Г.И., Барташевич В.В., Гунба Д.Д.* Математический метод изучения факторной модели влияния при шейном миофасциальном болевом синдроме // Мануальная терапия. 2019. № 2 (74). С. 38–44.
3. *Кубергер М.Б., Белоконь Н.А., Соболева Е.А.* и др. Кардиоинтервалография в оценке реактивности и тяжести состояния больных детей: Методические рекомендации. М. 1985.
4. *Микита Г.И.* Кафистная активная ортостатическая проба в оценке вегетативного статуса оператора в эргономике [Электронный ресурс] // Эргономика. 2019. Вып. 1. С. 3–12. URL: https://cloud.mail.ru/home/01_%D0%AD%D0%A0%D0%93%D0%9E%D0%9D%D0%9E%D0%9C%D0%98%D0%9A%D0%90.docx?weblink=3jbn/2rvBmgTUa
5. *Wieling W., Krediet C., Dijk N.*, et al. Initial orthostatic hypotension: review of a forgotten condition // Clinical Science. 2007. № 112 (3). P. 157–165.
6. *Thieben M., Sandroni P., Sletten D.,* et al. Postural orthostatic tachycardia syndrome // Mayo Clinic experience. 2007. № 82. P. 308–313.
7. *Garland E., Raj S., Black B.,* et al. The hemodynamic and neurohumoral phenotype of postural tachycardia syndrome // Neurology. 2007. № 69. P. 790–798.
8. *Jacob G., Ertl A., Shannon J.,* et al. Effect of standing on neurohumoral responses and plasma volume in healthy subjects // Journal of Applied Physiology. 1998. № 84. P. 914–921.
9. *Ketch T., Biaggioni I., Robertsonet R.,* et al. Four faces of baroreflex failure: hypertensive crisis, volatile hypertension, orthostatic tachycardia, and malignant vagotonia // Circulation. 2002. № 105. P. 2518–2523.
10. *Manger W.M.* Baroreflex failure – a diagnostic challenge [Электронный ресурс] // The New England Journal of Medicine. 1993. № 329. P. 1494–1495. URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8413455.
11. *Jordan J., Shannon J., Black B.,* et al. Raised cerebrovascular resistance in idiopathic orthostatic intolerance: evidence for sympathetic vasoconstriction [Электронный ресурс] // Hypertension. 1998. № 32. P. 699–704. URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9774366?dopt =Abstract&holding=npg.
12. *Huang C., Sandroni P., Sletten D.,* et al. Effect of age on adrenergic and vagal baroreflex sensitivity in normal subjects // Muscle Nerve. 2007. № 36. P. 637–642.
13. *Schrezenmaier C., Singer W., Muenter N.,* et al. Adrenergic and vagal baroreflex sensitivity in autonomic failure // Archives of Neurology. 2007. № 64. P. 381–386.
14. *Vogel E., Sandroni P., Low P.* Blood pressure recovery from Valsalva maneuver in patients with autonomic failure // Neurology. 2005. № 65. P. 1533–1537.
15. *Low P., Sandroni P., Joyner M.,* et al. Postural tachycardia syndrome (POTS) // Journal of Cardiovascular Electrophysiology. 2009. № 20 (3). P. 352–358.
16. *Soliman K., Sturman S., Sarkar P.,* et al. Postural orthostatic tachycardia syndrome (POTS): A diagnostic dilemma // British Journal of Cardiology. 2010. № 17 (1). P. 36–39.
17. *Gibbons C., Freeman R.* Delayed orthostatic hypotension: A frequent cause of orthostatic intolerance // Neurology. 2006. № 67. P. 28–32.
18. *Colombo J., Jacot J., Aysin E.,* et al. Symptoms of orthostasis may be due to sympathetic/parasympathetic autonomic imbalance and can be evaluated by HRV-respiratory analysis with appropriate pathogenesis oriented therapeutic choices [Электронный ресурс] // International Symposium on Diabetes Neuropathy: 7th Annual Congress, 29 Nov. – 2 Dec. 2006. URL: http://www.ans-hrv.com/IDN06Present.ppt.
19. *Robertson D., Shannon J., Biggioni I.,* et al. Orthostatic intolerance and postural tachycardia syndrome: genetic and environmental pathophysiologies // Pflugers Archiv: European Journal of Physiology. 2000. № 441. P. 48–51.
20. *Власов А.И., Конькова А.Ф.* Медико-диагностические экспертные системы для оценки адекватности адаптивной реакции организма на воздействие экстремальных факторов // Конверсия. 1995. № 9–10. С. 18–21.
21. *Podorin A.A., Shakhnov V.A.* MEMS sensors to assess pain sensitivity of human // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012001.
22. *Аверьянихин А.Е., Подорин А.А.* Сенсорные системы анализа болевого воздействия // Датчики и системы. 2017. № 7 (216). С. 15–22.
23. *Mannion A.F., Balagué F., Pellisé F., Cedrasch C.* Pain measurement in patients with low back pain // Nature Clinical Practice. Rheumatology. 2007. V. 3. № 11. P. 610–618.

Информация об авторе

Гурий Иштванович Микита – к.т.н., доцент

SPIN-код: не представлен

Поступила в редакцию 16.11.2020.
Одобрена после рецензирования 04.12.2020.
Принята к публикации 17.12.2020.

Original article

Neuroanalytical model for comparative studies of clinical and kaphist active orthostatic samples

G. I. Mikita[1]
[1] Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Abstract

The work is devoted to the study of the clinical and kaphist (literally from the Greek καθιστα – sitting) active orthostatic tests, the result of which is the development of neuroanalytical model of the levels of functional tension of the nervous system and the autonomic tone of the human operator in the human – machine system.

The procedure for conducting an active orthostatic test using the kafist method consists in the fact that the cardio intervals are fixed from a sitting position, and then from a standing position.

The authors proved that measurements in the supine position with the clinical method and in the seated position with the kaphist method have a correlation coefficient higher than critical, which allows the results of the samples to be considered identical regardless of the method.

Keywords

Orthostatic sample, kaphist method, autonomic neurosystem.

For citation

Mikita G.I. **Neuroanalytical model for comparative studies of clinical and kaphist active orthostatic samples. Neurocomputers. 2021. Vol. 23. No. 1. P. 81–93. DOI: 10.18127/j19998554-202101-08. (in Russian)**

References

1. *Bartashevich V.V., Mikita G.I., Gunba D.D., Shchigol' B.I., Dorofeev A.D.* Modifikatsiya aktivnoj ortostaticheskoj proby v otsenke vegetativnogo statusa organizma. Manual'naya terapiya. 2019. № 2 (74). S. 53–57. (in Russian)
2. *Mikita G.I., Bartashevich V.V., Gunba D.D.* Matematicheskij metod izucheniya faktornoj modeli vliyaniya pri shejnom miofastsial'nom bolevom syndrome. Manual'naya terapiya. 2019. № 2 (74). S. 38–44. (in Russian)
3. *Kuberger M.B., Belokon' N.A., Soboleva E.A.* i dr. Kardiointervalografiya v otsenke reaktivnosti i tyazhesti sostoyaniya bol'nykh detej: Metodicheskie rekomendatsii. M. 1985. (in Russian)
4. *Mikita G.I.* Kafistnaya aktivnaya ortostaticheskaya proba v otsenke vegetativnogo statusa operatora v ergonomike [Elektronnyj resurs]. Ergonomika. 2019. Vyp. 1. S. 3–12. URL: https://cloud.mail.ru/home/01_%D0%AD%D0%A0%D0%93%D0%9E%D0%9D%D0%9E%D0%9C%D0%98%D0%9A%D0%90.docx?weblink=3jbn/2rvBmgTUa (in Russian)
5. *Wieling W., Krediet C., Dijk N.*, et al. Initial orthostatic hypotension: review of a forgotten condition. Clinical Science. 2007. № 112 (3). P. 157–165.
6. *Thieben M., Sandroni P., Sletten D.*, et al. Postural orthostatic tachycardia syndrome. Mayo Clinic experience. 2007. № 82. P. 308–313.
7. *Garland E., Raj S., Black B.*, et al. The hemodynamic and neurohumoral phenotype of postural tachycardia syndrome. Neurology. 2007. № 69. P. 790–798.
8. *Jacob G., Ertl A., Shannon J.*, et al. Effect of standing on neurohumoral responses and plasma volume in healthy subjects. Journal of Applied Physiology. 1998. № 84. P. 914–921.
9. *Ketch T., Biaggioni I., Robertsonet R.*, et al. Four faces of baroreflex failure: hypertensive crisis, volatile hypertension, orthostatic tachycardia, and malignant vagotonia. Circulation. 2002. № 105. P. 2518–2523.
10. *Manger W.M.* Baroreflex failure – a diagnostic challenge [Elektronnyj resurs]. The New England Journal of Medicine. 1993. № 329. P. 1494–1495. URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8413455.
11. *Jordan J., Shannon J., Black B.*, et al. Raised cerebrovascular resistance in idiopathic orthostatic intolerance: evidence for sympathetic vasoconstriction [Elektronnyj resurs]. Hypertension. 1998. № 32. P. 699–704. URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9774366?dopt =Abstract&holding=npg.
12. *Huang C., Sandroni P., Sletten D.*, et al. Effect of age on adrenergic and vagal baroreflex sensitivity in normal subjects. Muscle Nerve. 2007. № 36. P. 637–642.
13. *Schrezenmaier C., Singer W., Muenter N.*, et al. Adrenergic and vagal baroreflex sensitivity in autonomic failure. Archives of Neurology. 2007. № 64. P. 381–386.
14. *Vogel E., Sandroni P., Low P.* Blood pressure recovery from Valsalva maneuver in patients with autonomic failure. Neurology. 2005. № 65. P. 1533–1537.
15. *Low P., Sandroni P., Joyner M.*, et al. Postural tachycardia syndrome (POTS). Journal of Cardiovascular Electrophysiology. 2009. № 20 (3). P. 352–358.
16. *Soliman K., Sturman S., Sarkar P.*, et al. Postural orthostatic tachycardia syndrome (POTS): A diagnostic dilemma. British Journal of Cardiology. 2010. № 17 (1). P. 36–39.
17. *Gibbons C., Freeman R.* Delayed orthostatic hypotension: A frequent cause of orthostatic intolerance. Neurology. 2006. № 67. P. 28–32.
18. *Colombo J., Jacot J., Aysin E.*, et al. Symptoms of orthostasis may be due to sympathetic/parasympathetic autonomic imbalance and can be evaluated by HRV-respiratory analysis with appropriate pathogenesis oriented therapeutic choices [Elektronnyj resurs]. International Symposium on Diabetes Neuropathy: 7th Annual Congress, 29 Nov. – 2 Dec. 2006. URL: http://www.anshrv.com/IDN06Present.ppt.

19. *Robertson D., Shannon J., Biggioni I.*, et al. Orthostatic intolerance and postural tachycardia syndrome: genetic and environmental pathophysiologies. Pflugers Archiv: European Journal of Physiology. 2000. № 441. P. 48–51.
20. *Vlasov A.I., Kon'kova A.F.* Mediko-diagnosticheskie ekspertnye sistemy dlya otsenki adekvatnosti adaptivnoj reaktsii organizma na vozdejstvie ekstremal'nykh faktorov. Konversiya. 1995. № 9–10. S. 18–21. (in Russian)
21. *Podorin A.A., Shakhnov V.A.* MEMS sensors to assess pain sensitivity of human. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012001.
22. *Aver'yanikhin A.E., Podorin A.A.* Sensornye sistemy analiza bolevogo vozdejstviya. Datchiki i sistemy. 2017. № 7 (216). S. 15–22. (in Russian)
23. *Mannion A.F., Balagué F., Pellisé F., Cedrasch C.* Pain measurement in patients with low back pain. Nature Clinical Practice. Rheumatology. 2007. V. 3. № 11. P. 610–618.

Information about the author

Guriy I. Mikita – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

The article was submitted 16.11.2020.
Approved after reviewing 04.12.2020.
Accepted for publication 17.12.2020.

Внимание!

В издательстве «Радиотехника» можно приобрести книгу

Автоматическое сопровождение целей
в РЛС интегрированных авиационных комплексов

в 3-х томах

под редакцией В.С. Вербы

Том 1

Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов

Теоретические основы

Авторы: В.И. Меркулов, В.С. Верба, А.Р. Ильчук

Рассмотрены теоретические основы синтеза и анализа радиоэлектронных систем на основе классических и новых методов оптимизации управления и оценивания. Показана роль и определено место бортовой РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса. Исследованы проблемы их разработки и режимы функционирования. Представленный материал основан на последних достижениях науки и техники.

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Том 2

Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов

Сопровождение одиночных целей

Авторы: В.И. Меркулов, В.С. Верба, А.Р. Ильчук, Е.Е. Колтышев

Рассмотрены алгоритмы сопровождения одиночных воздушных и наземных целей по дальности, её производным и угловым координатам как в однопозиционной, так и в двухпозиционной РЛС при автономной и совместной работе с оптико-электронными системами и с системами радиотехнической разведки, в том числе и в условиях помех. Представленный материал основан на последних достижениях науки и техники.

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Том 3

Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов

Многоцелевое сопровождение

Авторы: В.И. Меркулов, В.С. Верба, А.Р. Ильчук, Б.Г. Татарский

Представлены существующие и перспективные алгоритмы многоцелевого сопровождения с оптимизацией его этапов. Проведен анализ оптимальных алгоритмов многоцелевого сопровождения воздушных и наземных объектов и даны упрощенные варианты многоцелевого сопровождения в однопозиционных бортовых РЛС для однозадачных и многозадачных РЛС. Рассмотрены особенности сопровождения больших групп разрешаемых и неразрешаемых целей. Сделана оценка помехозащищенности РЛС при многоцелевом сопровождении. Представленный материал основан на последних достижениях науки и техники.

Для специалистов-разработчиков, сотрудников НИИ, преподавателей, аспирантов и студентов радиотехнических вузов и факультетов.

Стоимость подписки 4000 руб.

По вопросам заказа и приобретения книг обращаться по адресу:
107031 г. Москва, Кузнецкий мост, 20/6.
Тел./факс: (495) 625-92-41, тел.: (495) 625-78-72, 621-48-37
Полный перечень книг, выпускаемых Издательством «Радиотехника», размещен на сайте
http://www. radiotec.ru; e-mail: info@radiotec.ru