

5. Котляр Л.М., Миназетдинов Н.М. Определение формы анода с учетом свойств электролита в задачах электрохимической обработки металлов // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, № 3. С. 179–184.
6. Крылов А.А. Задача Коши для уравнения Лапласа в теории электрохимической обработки металлов // Доклады АН СССР. 1968. Т. 178, № 2. С. 321–323.
7. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1987. 688 с.
8. Миназетдинов Н.М. Об одной модели кавитационного течения электролита при электрохимической обработке // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2020. Вып. 3. С. 41–51.
9. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля: справочн. пособие для электротехн. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1989. 271 с.

### Literatura

1. Volgin V.M. Komp'yuternoe modelirovanie elektrohimicheskogo formoobrazovaniya reguljarnyh rel'efov // Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki materialov. Tula: TulGU, 1996. S. 52–61.
2. Gurevich M.I. Teoriya struj ideal'noj zhidkosti. M.: Nauka, 1979. 536 s.
3. Davydov A.D., Kozak E. Vysokoskorostnoe elektrohimicheskoe formoobrazovanie. M.: Nauka, 1990. 272 s.
4. Klovov V.V. Elektrohimicheskoe formoobrazovanie. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta, 1984. 80 s.
5. Kotlyar L.M., Minazetdinov N.M. Opredelenie formy anoda s uchetom svojstv elektrolita v zadachah elektrohimicheskoy obrabotki metallov // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2003. T. 44, № 3. S. 179–184.
6. Krylov A.A. Zadacha Koshi dlya uravneniya Laplasa v teorii elektrohimicheskoy obrabotki metallov // Doklady AN SSSR. 1968. T. 178, № 2. S. 321–323.
7. Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. Metody teorii funkcij kompleksnogo peremennogo. M.: Nauka, 1987. 688 s.
8. Minazetdinov N.M. Ob odnoj modeli kavitacionnogo techeniya elektrolita pri elektrohimicheskoy obrabotke // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2020. Vyp. 3. S. 41–51.
9. Tatur T.A. Osnovy teorii elektromagnitnogo polya: spravochn. posobie dlya elektrotekhn. spec. vuzov. M.: Vysshaya shkola, 1989. 271 s.

DOI: 10.25586/RNU.V9187.20.04.P.032

УДК 004.658

**В.И. Алексеев, И.А. Шевкунов**

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Проведен обзор ряда научных публикаций, который показал, что крайне актуальным является создание новых автоматизированных систем контроля и диагностики, способных повысить отказоустойчивость и продлить срок эксплуатации аэрокосмической техники. Для этого применяются различные подходы, в основе которых лежат математические модели, деревья решений, искусственные нейронные сети и другие алгоритмы.

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, предаварийные ситуации, диагностика.

V.I. Alekseev, I.A. Shevkunov

APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGY  
IN AEROSPACE INDUSTRY ANNOTATION

Summary in this article, a review of a number of scientific publications was conducted, which showed that it is extremely relevant to create new automated control and diagnostic systems that can increase fault tolerance and to extend the life of aerospace technology. To do this, various approaches are used, which are based on mathematical models, decision trees, artificial neural networks, and other algorithms.

*Keywords:* artificial neural networks, pre-emergency situations, diagnostics.

## Введение

Физические нейронные сети сами по себе практически нигде не применяются, разве что в каких-то лабораториях. Вместо них применяются обычные компьютерные программы, которые имитируют поведения нейронных сетей [21].

Обычное и самое распространенное применение эти компьютерные программы-имитаторы нейронных сетей находят в качестве экспертных систем и систем распознавания [2].

Важной чертой искусственных нейронных сетей является то, что в силу конструктивных особенностей они позволяют успешно решать задачи с большим количеством переменных, не требуя большого количества вычислительных ресурсов [3; 4; 5]. Искусственную нейронную сеть можно рассматривать как направленный граф со взвешенными связями, в котором узлами являются некоторые элементарные процессоры, называемые искусственными нейронами [6]. Устройство этих процессоров согласно коннекционистскому подходу должно быть достаточно простым и обычно выбирается следующим (рис. 1) [7; 8].

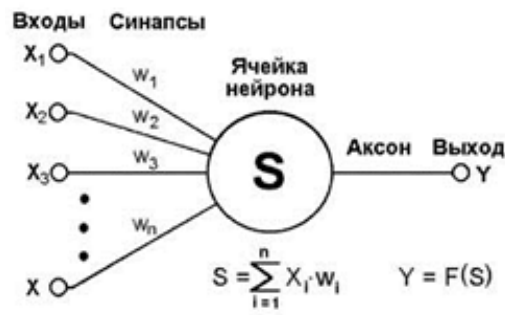


Рис. 1. Искусственный нейрон

Здесь наблюдается определенная аналогия с биологическим нейроном: входные и выходной каналы имитируют дендриты и аксоны, веса связей соответствуют синапсам, а функция активации отражает активность сомы [12].

*Применение искусственных нейронных сетей для распознавания образа ситуации  
в ситуационных советующих системах*

В настоящее время при моделировании на ЭВМ задач управления организационно-техническими системами широко применяются методы, позволяющие решать на ЭВМ такие задачи, решение которых до недавнего времени считалось прерогативой человека. Речь идет о так называемых методах искусственного интеллекта, или искусственной нейронной сети [13].

Под искусственными нейронными сетями (ИНС) подразумеваются вычислительные структуры, которые моделируют простые биологические процессы, обычно ассоциируемые с процессами человеческого мозга [16].

Они представляют собой распределенные и параллельные системы, способные к адаптивному обучению путем анализа положительных и отрицательных воздействий [20]. Элементарным преобразователем в данных сетях является искусственный нейрон или просто нейрон, названный так по аналогии с биологическим прототипом [17].

Искусственные нейронные сети строятся по принципам организации и функционирования их биологических аналогов. Они способны решать широкий круг задач распознавания образов, идентификации, прогнозирования, оптимизации, управления сложными объектами. Дальнейшее повышение производительности компьютеров все в большей мере связывают с ИНС, в частности с нейрокомпьютерами (НК), основу которых составляет искусственная нейронная сеть [9].

Такая система, как космический аппарат, относится к классу организационно-технических систем, то есть систем, включающих технику и коллективы людей, интересы которых связаны с функционированием системы [2]. Одним из факторов, существенно влияющих на функционирование организационно-технической системы, является управление, которое осуществляет особая подсистема – подсистема управления [10]. Процесс управления состоит из комплекса операций, процедур преобразования информации, результатом которого является воздействие на объект управления, приводящее к достижению поставленных целей [18].

Процесс управления разбивается на функции управления – отдельные операции управления, выполняемые лицами, принимающими решения, и лицами, реализующими промежуточные процедуры, которые предшествуют этапу принятия решения [11]. К основным функциям управления относятся: прогнозирование, планирование, организация, координация, контроль [15].

Задачи управления представляют собой процесс переработки информации и решаются должностными лицами органов управления [3].

Анализ процесса переработки информации при решении задачи управления позволяет выделить в нем три типа взаимосвязанных информационных процедур, индивидуально выполняемых должностными лицами [12]:

- полностью формализуемые информационные процедуры;
- неформализуемые информационные процедуры;
- трудноформализуемые информационные процедуры.

Таким образом, основными типами информационных процедур, выполняемых должностными лицами при решении задач управления, являются полностью формализуемые и неформализуемые процедуры [1].

Анализ особенностей задач, а также различных видов классификации [4; 6; 8; 21] позволил определить наиболее целесообразный подход, учитывающий сложность предметной области и особенности моделирования задач управления [14]. Соответствующая этому подходу классификация основана на схеме, согласно которой задачи управления делятся на три класса:

- структурированные задачи управления;
- неструктурированные, или качественно выраженные задачи управления;
- слабоструктурированные, или смешанные задачи управления.

Анализ процесса управления космическим аппаратом [12] позволяет сделать вывод, что процесс управления имеет циклическую структуру [19]. Схема процесса управления показана на рисунке 2.

Уяснение поставленной задачи есть не что иное, как определение глобальной цели функционирования системы на данный момент времени. Оценкой обстановки можно считать анализ параметров, описывающих состояние космического аппарата, состояние внешней среды и других значащих факторов. Принятием решения в данном случае следует считать выбор рационального способа действий (сценария) с учетом возможности выполнения задач, стоящих перед космическим аппаратом.

Сущность процесса оценки обстановки такова, что его можно представить как задачу распознавания образа некой ситуации, представляющей собой некоторую точку параметрического пространства, описывающего обстановку, цели космического аппарата как организационно-технической системы, а также состояние объекта управления. Под образом в данном случае следует понимать множество объектов, «сходных между собой в некотором фиксированном отношении» [12].



Рис. 2. Структура цикла управления

Под образом ситуации понимается некоторая область ситуационного пространства, в которой выбор определенного сценария из заранее сформированного алфавита сценариев обеспечивает наибольшую эффективность (наибольшее значение показателя эффективности) по сравнению с остальными сценариями алфавита. Задача осложняется тем, что зависимость показателя эффективности от характеристик создавшейся ситуации и сценария описать аналитически зачастую невозможно. Невозможность построения отображения показателя эффективности как функции от характеристик ситуации и сценария аналитическими методами показывает, что задача определения эффективности относится к классу неструктурированных или слабоструктурированных. Задача выбора эффективного сценария вытекает из задачи определения показателя эффективности и также относится к этому классу.

Моделирование выбора сценария на основе правил и продукций правил, сформированных экспертами, дает приближенные результаты. Это связано в первую очередь с тем, что система строится на субъективных оценках специалистов предметной области. Кроме того, экспертные системы дают разбиение пространства ситуаций на подмножества путем кусочной линеаризации границ подмножеств (разделение методом комитетов неравенств [12]). Одним из основных недостатков таких систем является невозможность определения значения показателя эффективности в сложившейся ситуации при выборе того или иного сценария.

Имитационное моделирование позволяет определять показатель эффективности для любой точки ситуационного пространства и любого сценария. Но для выбора удовлетворительного решения необходимо осуществить достаточно большое количество «прогнозов» имитационной модели, что не всегда приемлемо в системах реального времени, так как не обеспечивает своевременность принятия решения.

Выходом из положения может быть определение показателя эффективности как функции от ситуации и сценария в виде многомерной таблицы путем имитационного моделирования в режиме офлайн и аппроксимация этой функции по полученным точкам.

Аналитические методы аппроксимации функций весьма сложны в разработке и для многомерных функций практически неприменимы. Одним из возможных способов аппроксимации многомерной функции является применение искусственных нейронных сетей (ИНС) [5; 7].

Опираясь на вышеизложенное, можно сделать вывод о возможности построения отображения показателя эффективности каждого сценария на множестве ситуаций с использованием ИНС. В качестве обучающей выборки для ИНС используются известные точки функции показателя эффективности, полученные в результате имитационного моделирования. Моделирование ИНС на ЦЭВМ принципиально сводится к перемножению матриц и вычислению значений функции активации нейронов от результирующей матрицы и технически легко реализуемо [5]. Следует заметить, что хотя теоретически множество ситуаций не является замкнутым и ограниченным, на практике его можно считать таковым в силу технических ограничений.

Например, движущемуся марсоходу или луноходу надо распознать, что перед ним пропасть, и самому затормозить, так как с Земли сигнал запаздывает из-за большого расстояния и ограниченности скорости радиоволн. Или в военной авиации во время воздушного

Алексеев В.И., Шевкунов И.А. Применение нейросетевой технологии...

боя надо в режиме реального времени отличать свои самолеты от самолетов противника, чтобы самонаводящиеся ракеты «не перепутали».

При использовании нейронных сетей появляется возможность раннего диагностирования аварийных ситуаций, что позволяет снизить последствия аварии и предотвратить разрушение двигателя при проведении испытаний. Включение в число диагностических параметров максимального количества измеряемых на стенде физических величин, в том числе первых и вторых производных этих величин по времени, позволяет не только повысить качество диагностических алгоритмов, но и получить графическую иллюстрацию логики распознавания нейросетями аварийных ситуаций.

#### *Применение искусственных нейронных сетей для гиперзвуковой аэрокосмической отрасли*

Подобный подход успешно использован для вычисления коэффициента максимальной подъемной силы профилей крыла летательного аппарата. Применение искусственных нейронных сетей широко используется для эффективного определения аэродинамических характеристик гиперзвуковых летательных аппаратов. В качестве входных сигналов проведен параметрический расчет аэродинамических характеристик треугольника в гиперзвуковом течении. Геометрия треугольника условно имитирует форму гиперзвуковых летательных аппаратов. Для вычисления аэродинамических характеристик обтекаемых тел использовалась разработанная в МФТИ и ЦАГИ и хорошо зарекомендовавшая себя для подобных задач информационная технология «АДАНАТ» (аэродинамический анализ в обеспечении создания аэрокосмической техники) [17].

В качестве элементов АДАНАТ включает в себя методику решения кинетических уравнений методами статистического моделирования, решение уравнений сплошной среды (АРГОЛА-2). На результатах расчета аэродинамических характеристик гиперзвуковых летательных аппаратов проводится обучение предложенной нейронной сети.

Сегодня перспективно использование биологической особенности человеческого мозга при моделировании искусственного интеллекта в интересах гиперзвуковой аэрокосмической отрасли. Применение нейронных сетей на этапе проектирования гиперзвуковых летательных аппаратов позволяет существенно повысить достоверность оценки характеристик устойчивости и управляемости гиперзвуковых летательных аппаратов, что делает возможным сокращение затрат на создание систем за счет уменьшения затрат на натурные испытания и трудоемкие вычисления.

#### *Применение искусственных нейронных сетей на производстве и в военной отрасли*

Другое важное направление использования искусственных нейронных сетей – производство и военная отрасль, где нейросети применяются для прогнозирования, планирования, проектирования, управления манипуляторами и робототехникой, контроля качества продукции, а также управления процессами.

Например, нейронная сеть, примененная на предприятиях Intel, способна идентифицировать брак при производстве микросхем. Первоначально в опытную систему вводили электрическую испытательную информацию от готовых чипов и соответствующих переменных управления производственным процессом. Обученная нейронная сеть способна забраковать неисправный чип с точностью 99,5%.

Метод нейронных сетей применялся для решения задачи риск-анализа при проектировании самолетов. Был разработан имитатор работы двигателя при различных режимах полета. На вход имитатора вводится число Маха и высота полета. На выходе получаются стендовые тяговые характеристики. В рамках работ в области автоматического пилотирования созданы обучаемые автопилоты, беспилотные летательные аппараты, предусмотрено адаптивное пилотирование сильно поврежденных самолетов.

#### *Применение искусственных нейронных сетей в космической отрасли*

С помощью ИНС в настоящее время разработана технология контроля датчиков положения космического аппарата, организован мониторинг приближения и интерполирования экспериментальных данных. Использование кластерного вычислительного устройства повышает скорость и общую эффективность методов обработки информационных потоков.

Также широко используется прототип программной системы на основе нейронной сети, которая управляет потоком телеметрических данных. Результаты тестирования разработанных программных компонент на задачах классификации и прогнозирования данных позволяют достигнуть точности прогнозирования временных рядов свыше 94%, при этом улучшение результатов обеспечивается применением комитета нейронных сетей.

Сегодня динамическая нейронная сеть используется для обнаружения и парирования неисправности аппаратуры спутников. В частности, схема диагностики применяется для анализа состояния импульсных плазменных двигателей. Предложенный многоуровневый метод диагностики показал высокую точность контроля систем отдельных спутников и их группировок. Похожий метод использует многослойный персептрон, который диагностирует группу спутников на высоком уровне, тогда как на низком уровне он способен выявлять неисправности отдельных спутников. Диагностика группировки спутников позволяет выявлять сбои в телеметрии каждого из КА более эффективно. При обработке данных телеметрии отдельного спутника нейронная сеть способна зафиксировать сбой при отклонении значений более чем на 60% от номинального, тогда как при обработке данных группировки спутников фиксируются отклонения в 5%.

Применение нейронных сетей используется для решения задач обработки бортовых данных объектов космической техники. Методы построения основных компонентов предназначены для повышения автономности и эффективности функционирования бортовых комплексов управления. Результаты применения теории нейронных сетей используются для контроля и прогнозирования технического состояния бортовых систем на этапах испытаний и летной эксплуатации. Представленные результаты характеризуют современное направление развития систем автоматического управления.

Перечисленные задачи решаются как с использованием персептронов вероятностных нейронных сетей и сетей прямого распространения, так и комитетов на их основе.

Применение высокопроизводительных программно-аппаратных комплексов может сократить временные затраты на обработку поступающих телеметрических данных, в особенности на обучение классификаторов. Наиболее эффективным решением в данном случае может стать разработка гетерогенных систем на основе кластерных вычислительных устройств, поддерживающих GPGPU-вычисления.

Общая схема функционирования средств контроля, диагностики и прогнозирования состояния КА применительно к наземному комплексу показана на рисунке 3.

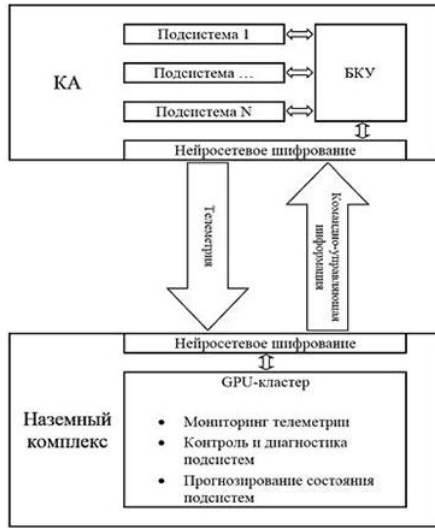


Рис. 3. Схема с применением ресурсов наземного комплекса

С борта КА поступает телеметрическая информация, которая анализируется интеллектуальными средствами наземной командно-измерительной системы, установленными на высокопроизводительном GPU-кластере. Применение подобной схемы позволяет получить доступ к значительным аппаратным ресурсам и при необходимости легко модифицировать аппаратную платформу и алгоритмы обработки поступающей информации.

В случае наличия специализированных технических решений для организации высокопроизводительных вычислений на борту КА основные функции обработки целевой информации могут быть реализованы локально на программно-аппаратном уровне (рис. 4).

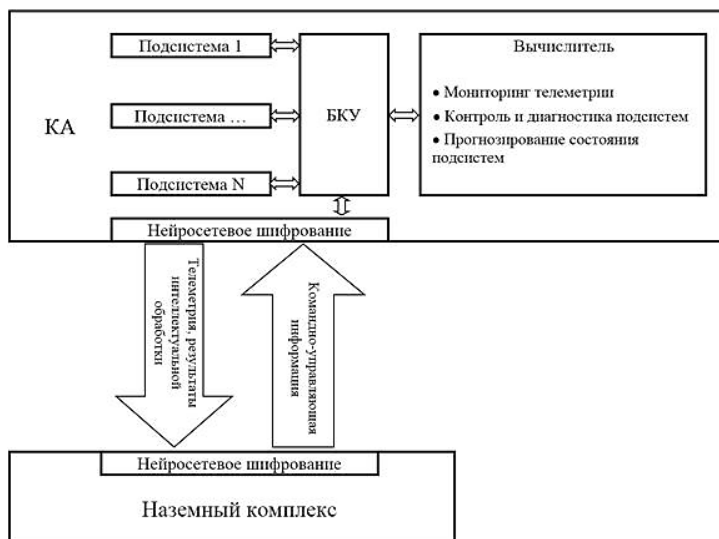


Рис. 4. Схема с выделенной бортовой подсистемой КА



Реализация подобной схемы требует выбора технической платформы, способной обеспечить высокую производительность вычислений с сохранением принципиальной возможности установки в бортовую систему. Она позволяет значительно расширить функциональные возможности управления и повысить автономность КА.

В данной статье проведен обзор ряда научных публикаций, который показал, что крайне актуальным является создание новых автоматизированных систем контроля и диагностики, способных повысить отказоустойчивость и продлить срок эксплуатации аэрокосмической техники. Для этого применяются различные подходы, в основе которых лежат математические модели, деревья решений, искусственные нейронные сети и другие алгоритмы.

#### *Заключение*

Искусственные нейронные сети являются наиболее перспективным инструментальным средством, позволяющим эффективно реализовывать методы интеллектуального контроля и диагностики. Объединение возможностей искусственных нейронных сетей и гетерогенных вычислительных систем увеличивает скорость обработки информации и принятия решений, повышает надежность работы узлов КА за счет многоуровневой диагностики и прогнозирования нештатных ситуаций.

#### *Литература*

1. Борисов А.А., Краснов С.А., Нечай А.А. Технология блокчейн и проблемы ее применения в различных информационных системах // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2018. Вып. 2. С. 63–67.
2. Бурков В.Н., Ириков В.А. Модели и методы управления организационными системами. М.: Наука, 1994. 270 с.
3. Еремин Д.М., Гарцев И.Б. Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления. М.: МИРЭА, 2004. 75 с.
4. Кирпичев Б.Ю., Субботин С.С., Суриков А.Н. Информационная система в органах военного управления // Тематический сборник № 25. СПб.: МАА, 1998. С. 97–99.
5. Кокорева Т.А. Системный анализ процедур принятия управленческих решений. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 1994. 148 с.
6. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. 382 с.
7. Мдинарадзе В.Ю., Сазанович А.Н., Уткин В.Б. Военная информатика. М.: РВСН, 1992. 168 с.
8. Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы / под ред. Н.М. Амосова. Киев: Наук. думка, 1991. 146 с.
9. Нечай А.А. Формирование безопасной информационной среды // Актуальные проблемы современности: наука и общество. 2019. № 4 (25). С. 43–44.
10. Нечай А.А., Борисов А.А., Борисова Ю.И. Точечный анализ данных дистанционного зондирования Земли средствами языка программирования Python // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2019. Вып. 1. С. 49–55.
11. Нечай А.А., Копьев А.И. Метод управляемого распределения ресурсов между ядрами процессора // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2018. Вып. 2. С. 101–107.

12. Ньюэлл П., Саймон Г. GPS-программа, моделирующая процесс человеческого мышления // Вычислительные машины и мышление. М.: Мир, 1967. С. 283–301.
13. Поддубный В.А., Первухин Д.А. Определение оценок частичной прецедентности в ситуационных советующих системах боевого надводного корабля // Труды российской конференции «Анализ, прогнозирование и управление в сложных системах». СПб.: СЗТУ, 2002. С. 360–366.
14. Полончик О.А., Артюшкин А.Б., Нечай А.А., Полончик Е.О. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли на базе спутников со стабилизацией вращением // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2017. Вып. 1. С. 35–41.
15. Свиначук А.А., Нечай А.А. Использование квантовых вычислений при выборе управленческого решения // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2018. Вып. 2. С. 31–36.
16. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс = Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
17. Хлопков Ю.И., Ткаченко В.В., Воронич И.В., Зезя Мью Мьинт. Проект информационной технологии «АДАНАТ» // Наука и технологии в современном обществе: материалы Международной научно-практической конференции. Уфа, 2014. С. 64–67.
18. Шаймарданов А.М., Нечай А.А., Лепехин С.В. Математические модели систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2019. Вып. 2. С. 27–39.
19. Щиробоков В.В., Нечай А.А. Алгоритм планирования энергосберегающей параллельной обработки информации с учетом информационной важности и времени поступления задач // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2017. Вып. 1. С. 88–93.
20. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект. М.: Академия, 2005. 176 с.
21. Simon H.A. The New Science of Management Decision Support System. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1982. 135 s.

### Literatura

1. Borisov A.A., Krasnov S.A., Nechaj A.A. Tekhnologiya blokchejn i problemy ee primeneniya v razlichnyh informacionnyh sistemah // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2018. Vyp. 2. S. 63–67.
2. Burkov V.N., Irikov V.A. Modeli i metody upravleniya organizacionnymi sistemami. M.: Nauka, 1994. 270 s.
3. Eremin D.M., Garceev I.B. Iskusstvennye nejronnye seti v intellektual'nyh sistemah upravleniya. M.: MIREA, 2004. 75 s.
4. Kirpichev B.Yu., Subbotin S.S., Surikov A.N. Informacionnaya sistema v organah voennogo upravleniya // Tematicheskij sbornik № 25. SPb.: MAA, 1998. S. 97–99.
5. Kokoreva T.A. Sistemnyj analiz procedur prinyatiya upravlencheskih reshenij. SPb.: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo un-ta, 1994. 148 s.
6. Kruglov V.V., Borisov V.V. Iskusstvennye nejronnye seti. Teoriya i praktika. M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2001. 382 s.
7. Mdinardze V.Yu., Sazanovich A.N., Utkin V.B. Voennaya informatika. M.: RVSN, 1992. 168 s.
8. Nejrokomputery i intellektual'nye roboty / pod red. N.M. Amosova. Kiev: Nauk. dumka, 1991. 146 s.
9. Nechaj A.A. Formirovanie bezopasnoj informacionnoj sredy // Aktual'nye problemy sovremennosti: nauka i obshchestvo. 2019. № 4 (25). S. 43–44.

10. *Nechaj A.A., Borisov A.A., Borisova Yu.I.* Tochechnyj analiz dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli sredstvami yazyka programmirovaniya Python // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2019. Vyp. 1. S. 49–55.
11. *Nechaj A.A., Kop'ev A.I.* Metod upravlyaemogo raspredeleniya resursov mezhdu yadrami processora // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2018. Vyp. 2. S. 101–107.
12. *N'yuell P., Sajmon G.* GPS-programma, modeliruyushchaya process chelovecheskogo myshleniya // Vychislitel'nye mashiny i myshlenie. M.: Mir, 1967. S. 283–301.
13. *Poddubnyj V.A., Pervuhin D.A.* Opredelenie ocenok chastichnoj precedentnosti v situacionnyh sovetuyushchih sistemah boevogo nadvodnogo korablya // Trudy rossijsko-pol'skoj konferencii "Analiz, prognozirovaniye i upravlenie v slozhnyh sistemah". SPb.: SZTU, 2002. S. 360–366.
14. *Polonchik O.L., Artyushkin A.B., Nechaj A.A., Polonchik E.O.* Radiolokacionnye sistemy distancionnogo zondirovaniya Zemli na baze sputnikov so stabilizaciej vrashcheniem // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2017. Vyp. 1. S. 35–41.
15. *Svinarchuk A.A., Nechaj A.A.* Ispol'zovanie kvantovyh vychislenij pri vybore upravlencheskogo resheniya // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2018. Vyp. 2. S. 31–36.
16. *Hajkin S.* Nejronnye seti: polnyj kurs = Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2-e izd. M.: Vil'yams, 2006. 1104 s.
17. *Hlopkov Yu.I., Tkachenko V.V., Voronich I.V., Zeya M'o M'int.* Proekt informacionnoj tekhnologii "ADANAT" // Nauka i tekhnologii v sovremennom obshchestve: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ufa, 2014. S. 64–67.
18. *Shajmardanov A.M., Nechaj A.A., Lepekhin S.V.* Matematicheskie modeli sistem avtomaticheskogo upravleniya s shirotno-impul'snoj modulyaciej // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2019. Vyp. 2. S. 27–39.
19. *Shirobokov V.V., Nechaj A.A.* Algoritm planirovaniya energosberegayushchej parallel'noj obrabotki informacii s uchedom informacionnoj vazhnosti i vremeni postupleniya zadach // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2017. Vyp. 1. S. 88–93.
20. *Yasnitskij L.N.* Vvedenie v iskusstvennyj intellekt. M.: Akademiya, 2005. 176 s.
21. *Simon H.A.* The New Science of Management Decision Support System. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1982. 135 s.

DOI: 10.25586/RNU.V9I87.20.04.P.042

УДК 519.6

**Ю.А. Завражнов**

---

## АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РЕЗОЛЬВЕНТНОГО ПОДХОДА

---

Разработан адаптивный метод для решения волнового уравнения с помощью резольвентного подхода, использующий параллельное разбиение процессов и высокую точность оценок.

*Ключевые слова:* алгоритм, численный метод, сетка, устойчивость, явная схема, спектральная задача, собственные значения, метод конечных разностей.