

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ИННОВАЦИОННЫХ
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

СТНО-2021

**IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

Сборник трудов

Том 5

Рязань
Book Jet
2021

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5
С 568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2021 [текст]: сб. тр. IV междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2021; Рязань. –160 с.,: ил.

Сборник включает труды участников IV Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2021.

В сборнике освещаются вопросы математического моделирования, новых технологий в радиотехнике, телекоммуникациях, электротехнике и радиоэлектронике, вопросы полупроводниковой наноэлектроники, приборостроения, лазерной, микроволновой техники, силовой промышленной электроники, новые технологии в измерительной технике и системах, биомедицинских системах, алгоритмическое и программное обеспечение вычислительной техники, вычислительных сетей и комплексов, вопросы систем автоматизированного проектирования, обработки изображений и управления в технических системах, перспективные технологии в машиностроительном и нефтехимическом производствах, новые технологии и методики в высшем образовании, в т.ч. вопросы гуманитарной и физико-математической подготовки студентов, обучения их иностранным языкам, перспективные технологии электронного обучения, в том числе, дистанционного, вопросы экономики, управления предприятиями и персоналом, менеджмента, а также вопросы гуманитарной сферы.

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5

ISBN 978-5-7722-0301-9

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2021
© Издательство «Book Jet»,
макет, 2021

ИНФОРМАЦИЯ О IV МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2021

IV Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2021 состоялся 03.03.2021-05.03.2021 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2021 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

«Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и электроника», секции

- Радиотехнические системы и устройства;
- Телекоммуникационные системы и устройства;
- Цифровые информационные технологии реального времени;
- Промышленная силовая электроника, электроэнергетика и электроснабжение;
- Физика полупроводников, микро- и наноэлектроника;
- Микроволновая, оптическая и квантовая электроника;
- Актуальные задачи химических технологий;

«Современные технологии в науке и образовании. Вычислительная техника и автоматизированные системы», секции

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- ЭВМ и системы;
- Системы автоматизированного проектирования;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы в научных исследованиях;
- Обработка изображений и управление в технических системах;
- Геоинформационные и космические технологии;
- Автоматизация производственно-технологических процессов в приборо- и машиностроении;

- Информационно-измерительные устройства и системы в технике и медицине.

Стандартизация и управление качеством;

- Информационные системы и технологии;

«Современные технологии в науке и образовании. Экономика и управление», секции;

- Современные технологии государственного и муниципального управления;
- Экономика, менеджмент и организация производства;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Управление персоналом;
- Экономическая безопасность;

«Современные технологии в науке и образовании. Новые технологии и методы в высшем образовании», секции

- Современные технологии электронного обучения;
- Иностранный язык в техническом вузе;
- Лингвистика и межкультурная коммуникация;
- Направления и формы гуманитаризации высшего образования и гуманитарная

подготовка студентов;

- Методы преподавания и организация учебного процесса в вузе;
- Физико-математическая подготовка студентов;
- Особенности военного образования на современном этапе.

Организационный комитет Форума:

Чиркин М.В., ректор, д.ф.-м.н., проф. – председатель

Гусев С.И., проректор по научной работе и инновациям, д.т.н., проф. – зам. председателя;

Бабаян П.В., проректор по учебной работе и информатизации, к.т.н., доц. – зам. председателя;

Миловзоров О.В., зам. начальника управления организации научных исследований, к.т.н, доц. – координатор;

Устинова Л.С., начальник отдела информационного обеспечения – отв. за информационную поддержку;

Трубицына С.Г., вед. инженер – секретарь оргкомитета;

Благодарова И.А., ведущий программист – секретарь оргкомитета;

члены оргкомитета:

Авилкина С.В., начальник управления по воспитательной работе, к.п.н., доц.;

Алпатов Б.А., профессор кафедры автоматике и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Бухенский К.В., зав. кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Витязев В.В., зав. кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, д.т.н., проф.;

Евдокимова Е.Н., зав. кафедрой экономики, менеджмента и организации производства, д.э.н., проф.;

Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон», д.т.н., проф.;

Есенина Н.Е., зав. кафедрой иностранных языков, к.п.н., доц.;

Жулев В.И., зав. кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., проф.;

Кириллов С.Н., зав. кафедрой радиоуправления и связи, д.т.н., проф.;

Клейносова Н.П., директор центра дистанционного обучения, к.п.н., доц.;

Ключко В.К., профессор кафедры автоматике и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Коваленко В.В., зав. кафедрой химической технологии, к.т.н., доц.;

Корячко В.П., зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, д.т.н., проф.;

Костров Б.В., зав. кафедрой электронных вычислительных машин, д.т.н., проф.;

Кошелев В.И., зав. кафедрой радиотехнических систем, д.т.н., проф.;

Круглов С.А., зав. кафедрой промышленной электроники, к.т.н., доц.;

Куприна О.Г., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Литвинов В.Г., зав. кафедрой микро- и нанoeлектроники, д.ф.-м.н., проф.;

Лукьянова Г.С., доцент кафедры высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Мусолин А.К., профессор кафедры автоматизации информационных и технологических процессов, д.т.н., проф.;

Овечкин Г.В., зав. кафедрой вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Паршин Ю.Н., зав. кафедрой радиотехнических устройств, д.т.н., проф.;

Перфильев С.В., зав. кафедрой государственного, муниципального и корпоративного управления, д.э.н., проф.;

Пржегорлинский В.Н., зав. кафедрой информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Пылькин А.Н., профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Рохлина Т.А., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Серебряков А.Е., зам. зав. кафедрой электронных приборов, к.т.н.;

Соколов А.С., зав. кафедрой истории, философии и права, д.и.н.;

Таганов А.И., профессор кафедры космических технологий, д.т.н., проф.;

Харитонов А.Ю., нач. военного учебного центра, полковник, к.т.н., доц.;

Холопов С.И., декан ф-та автоматике и информационных технологий в управлении, к.т.н., доц.;

Чеглакова С.Г., зав. кафедрой экономической безопасности, анализа и учета, д.э.н., проф..

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ.
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ»**

**СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ»**

УДК 378.16; ГРНТИ 27.43

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ
АРМЕЙСКОЙ ТАКТИЧЕСКОЙ СТРЕЛЬБЕ**

Е. Гужвенко *, Н. Тумаков *, В. Гужвенко**

**Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова,
Россия, Рязань, donisgalkin777@mail.ru*

*** в/ч 64712 Россия. Омск, vasilii_guj@mail.ru*

Аннотация. При обучении армейской тактической стрельбе в военных вузах возникла необходимость изучения эффективности внедряемой методики. В статье приведены процесс и результаты математической обработки тестирования умений курсантов выполнять различные стрелковые упражнения.

Ключевые слова: информатика, обучение, прикладные задания, военный вуз.

**STATISTICAL PROCESSING OF THE RESULTS OF TRAINING
IN ARMY TACTICAL SHOOTING**

E. Guzhvenko *, N. Tumakov *, V. Guzhvenko**

** Ryazan Higher Airborne Command School named after General of the Army V. F. Margelov,
Russia, Ryazan, donisgalkin777@mail.ru*

*** v / h 64712 Russia. Omsk, vasilii_guj@mail.ru*

Annotation. When teaching army tactical shooting in military universities, there was a need to study the effectiveness of the implemented methodology. The article presents the process and results of mathematical processing of testing cadets' skills to perform various shooting exercises.

Keywords: computer science, training, applied tasks, military university.

Главные цели исследовательской работы в военном вузе по внедрению новых методик обучения в дидактический процесс – разработка такой системы обучения, которая отвечала бы требованиям дидактики и педагогики, реализовала основные идеи подготовки военного специалиста, являлась бы основой для формирования будущего специалиста ВС РФ, а также экспериментальная проверка эффективности разработанных теоретических положений и практических решений. Чтобы проверить эффективность обучения курсантов РВВДКУ армейской тактической стрельбе в течение 8 лет проводился педагогический эксперимент, позволяющий определить условия, при которых обучение армейской тактической стрельбе курсантов военных вузов будет наиболее результативно.

При проведении педагогического эксперимента была проделана следующая работа: разработана и апробирована методика обучения армейской тактической стрельбе курсантов РВВДКУ; обоснован способ формирования выборки; сформирована выборочная совокупность; проверено, является ли выборочная совокупность репрезентативной; определены признаки, подлежащие изучению; выбраны способы измерения признаков, подлежащих изучению и произведено их вычисление; оценена достоверность полученных результатов.

Разработке методики обучения армейской тактической стрельбе курсантов РВВДКУ посвящено большое количество публикаций авторов статьи [3; 4], поэтому на данном вопросе в статье не будем останавливаться, рассмотрим остальные этапы эксперимента.

Способ формирования выборки. Генеральная совокупность – абсолютно репрезентативная выборка, поэтому, если возможно, эксперимент проводят на ней, иначе – создают произвольную выборку, доказывают ее репрезентативность для проводимого эксперимента. В экспериментальной проверке эффективности обучения армейской тактической стрельбе в десантном училище изучались не все курсанты вуза, а по 40 человек ежегодно, взятых из различных подразделений произвольным образом, поэтому взятую совокупность можно считать выборочной. В силу специфики педагогического исследования для изучения выборки применялся повторный (типический) отбор – тестирование начальных умений военнослужащих по огневой подготовке и итоговое тестирование по тем же тестам.

Обеспечение репрезентативности выборки. Известно, что для педагогических исследований выборки объема не менее 30 единиц характеризуются нормальным распределением, к ним применимы традиционные статистические способы анализа [1; 2; 5]. Педагогическое исследование охватывало около 40 человек ежегодно, то есть около 500 военнослужащих за период исследования, поэтому для данного исследования можно говорить о выборочной совокупности, являющейся репрезентативной: она достаточного объема, случайна, однотипна, с нормальным распределением. Случайность обеспечивается тем, что исследовались случайно выбранные курсанты вуза. Однотипность выборки обеспечена способом формирования воинских подразделений – взводы, роты создаются так, чтобы их начальные потенциалы были одинаковы. Исследуемые подразделения характеризуются нормальным распределением, так как выборки содержали более 30 человек.

Репрезентативность выборки обусловлена тем, что экспериментальные группы были максимально однородны по величине исследуемого признака, а также другим значимым параметрам – идентичности стартовых условий (возрастная группа, оценки по огневой подготовке, оценки по физической подготовке).

Определение признаков, подлежащих изучению. В исследовании выделены признаки, подлежащие изучению, и произведен учет полного перечня независимых факторов, влияющих на исследуемые признаки. В качестве изучаемого признака было выбрано время выполнения стрелковых упражнений (стрельба до попадания в мишень в различных условиях).

Так как при обучении армейской тактической стрельбе обрабатывалось умение быстрой и меткой стрельбы из пистолета и автомата, то требуемые признаки тестировались для двух видов оружия. В каждом упражнении стрельба велась до попадания в мишень, учитывалось время первого попадания. Для пистолета и автомата цель – картонная метрическая мишень (метрический стальной гонг).

Штрафы при выполнении тестов: если стрелок не поразит цель, то ко времени стрельбы добавляется максимальное в группе время выполнения данного теста. Если стрелок нарушит процедуру выполнения упражнения и получит преимущество, то ко времени стрельбы добавляется 10 секунд.

Результаты тестов: время стрельбы от стартового сигнала до последнего выстрела при условии попадания по цели с прибавлением начисленных штрафов. В случае промаха стрелок может стрелять до тех пор, пока не поразит цель.

Пистолет (тесты).

Тест-П1. Стрельба стоя с извлечением пистолета из кобуры. Пистолет заряжен, патрона в патроннике нет. Рубеж 25 м.

Тест-П2. Стрельба стоя из-за укрытия справа с извлечением пистолета из кобуры. Пистолет заряжен, патрона в патроннике нет. Рубеж 15 м.

Тест-П3. Стрельба стоя из-за укрытия слева с извлечением пистолета из кобуры. Пистолет заряжен, патрона в патроннике нет. Рубеж 15 м.

Тест-П4. Стрельба стоя, смена магазина, принятие положения с колена, снова стрельба до попадания. Пистолет заряжен, патрона в патроннике нет. Рубеж 10 м.

Тест-П5. Выстрел, перемещение по фронту 5 м, выстрел. Пистолет заряжен, патрона в патроннике нет. Рубеж 10 м.

Тест-П6. Выхватывание и выстрел одной рукой. Рубеж 7 м.

Автомат (тесты)

Тест-А1. Стрельба до попадания стоя. Рубеж 100 м. Стартовая подготовка: положение низкой готовности автомата, патрон в патроннике, оружие на предохранителе.

Тест-А2. Принятие положения лежа из положения стоя и выполнение выстрела. Рубеж 100 м. Стартовая подготовка: положение низкой готовности автомата, патрон в патроннике, оружие на предохранителе.

Тест-А3. Принятие положения с колена/с корточек из положения стоя и выполнение первого выстрела. Рубеж 70 м. Стартовая подготовка: положение низкой готовности автомата, патрон в патроннике, оружие на предохранителе.

Тест-А4. Выстрел стоя из-за укрытия справа (левша – слева). Рубеж 50 м. Стартовая подготовка: положение низкой готовности автомата, патрон в патроннике, оружие на предохранителе.

Тест-А5. Выстрел стоя из-за укрытия слева с левой прикладкой (у правши – с правой прикладкой). Рубеж 50 м. Стартовая подготовка: положение низкой готовности автомата с левой прикладкой, патрон в патроннике, оружие на предохранителе.

Тест-А6. Выстрел стоя, смена магазина, выстрел стоя со сбросом магазина. Рубеж 50 м. Стартовая подготовка: положение низкой готовности автомата, патрон в патроннике, оружие на предохранителе.

Тест-А7. Выстрел стоя, перемещение по фронту 5 м, выстрел. Рубеж 50 м. Стартовая подготовка: положение низкой готовности автомата, патрон в патроннике на предохранителе.

Тест-А8. Переход на резервное оружие стоя. Выстрел из автомата, включение предохранителя, выстрел из пистолета. Рубеж 15 м. Стартовая подготовка: положение низкой готовности автомата, патрон в патроннике, оружие на предохранителе. Заряженный пистолет в кобуре, на предохранителе. Цель: Метрическая картонная мишень. Использовать стальной метрический гонг запрещено.

Выбор способа измерения признаков, подлежащих изучению. Часто, сравнивая по процентным соотношениям результаты до и после какого-либо воздействия, исследователь приходит к заключению, что если наблюдаются различия, то имеет место различие в сравниваемых выборках, однако, с точки зрения правдоподобия выводов, подобный подход категорически неприемлем, так как для процентов нельзя определить уровень достоверности в различиях. Проценты, взятые сами по себе, не дают возможности делать статистически достоверные выводы. Чтобы доказать эффективность какого-либо воздействия, необходимо выявить статистически значимую тенденцию в смещении (сдвиге) показателей. Для сравнения изменения времени выполнения стрелковых тестов одной и той же выборкой военнослужащих использовались абсолютные величины (время выполнения теста), что позволяет провести качественный статистический анализ.

Покажем, что процентные результаты недостаточно информативны. Для эксперимента были рассчитаны точечные характеристики распределения случайных величин тестов в начале и конце обучения (табл. 1).

Таблица 1. Точечные характеристики обработки результатов тестов

	начало обучения	конец обучения
Среднее	4,954736842	2,813157895
Медиана	4,13	2,58
Мода	-	2,58
Стандартное отклонение	2,654397543	0,713925398
Дисперсия выборки	7,045826316	0,509689474
Эксцесс	1,438593188	1,642787707
Асимметричность	1,438420075	1,353890359
Минимум	2,25	1,95
Максимум	11,69	4,67
Сумма	94,14	53,45

Сравнивая среднее значение, медиану и моду в начале и конце обучения, видим, что отличия в них небольшие, то есть можно утверждать, что закон распределения нормальный (как и предполагалось в начале эксперимента на основании размеров групп военнослужащих).

Отсортировав данные тестов, получим следующее (рис. 1): со средним временем выполнения теста ПМ-1 (в пределах 10% от среднего времени выполнения заданий ($\tau \pm 0.1\tau$)) в начале обучения 21%, в конце – 16%; выше среднего ($\tau < \tau - 0.1\tau$) в начале обучения 11%, в конце – 21%; ниже среднего ($\tau > \tau + 0.1\tau$) в начале обучения 68%, в конце – 63%.

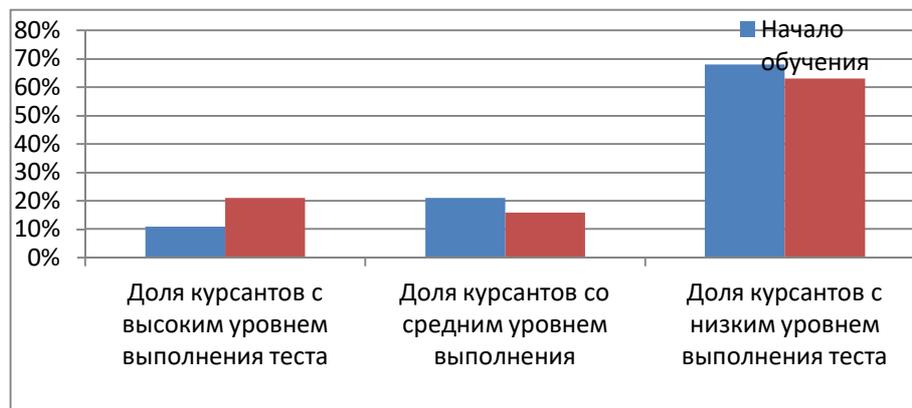


Рис. 1. Распределение курсантов по среднему времени выполнения стрелкового теста ПМ-1 в начале и конце обучения

Из рисунка 1 видно, что доля курсантов в низком уровне выполнения теста (большое время выполнения) примерно в 3 раза больше среднего и высокого как в начале, так и в конце обучения, из этого, если не смотреть на точечные характеристики, можно было бы сделать выводы, что обучение армейской тактической стрельбе нецелесообразно, однако, это не так: максимальное время выполнения теста в начале обучения 11,69 с, а в конце – 2,99 с, это гораздо меньше среднего времени выполнения теста (4,9547 с) в начале обучения. Суммарное время выполнения теста в начале обучения почти в два раза больше аналогичного параметра в конце обучения, следовательно, в среднем курсанты стали в два раза быстрее выполнять данный стрелковый тест.

Так как функция распределения выборки считается нормальной (выборка большого объема, в статье приводится лишь часть данных), то задача оценки различий была решена с использованием параметрического критерия статистики – парного t-критерия Стьюдента, так как сравнение велось по средним значениям выполнения входного и итогового тестов.

t-критерий позволяет найти вероятность того, что оба средних значения в выборке относятся к одной и той же совокупности. Данный критерий наиболее часто используется для проверки гипотезы: "Средние двух выборок относятся к одной и той же совокупности», позволяет дать ответ на вопрос о наличии различий в выборке в начальном и итоговом вариантах (проверка гипотезы о равенстве средних и принадлежности выборки в начальном и итоговом вариантах одной генеральной совокупности)".

Также результаты эксперимента обрабатывались с использованием параметрических критериев методов математической статистики (применялись методы для вычисления описательных статистик, построения графиков на нормальность распределения).

Чтобы подтвердить нормальное распределение выборки, можно основываться на том факте, что выборки большого размера характеризуются нормальным распределением или применять следующие методы:

1) в пределах осей нарисовать полигон частоты (эмпирическую функцию распределения) и кривую нормального распределения на основе данных исследования. Исследуя формы кривой нормального распределения и графика эмпирической функции распределения, выяснить те параметры, которыми последняя кривая отличается от первой;

2) вычислить среднее, медиану, моду и на основе этого определить отклонение от нормального распределения. Если мода, медиана и среднее арифметическое друг от друга значительно не отличаются, мы имеем дело с нормальным распределением. Если медиана значительно отличается от среднего, то мы имеем дело с асимметричной выборкой.

3) эксцесс кривой распределения должен быть равен нулю. Кривые с положительным эксцессом имеют правый скос кривой нормального распределения длиннее левого;

4) после определения среднего значения распределения частоты и стандартного отклонения найти следующие четыре интервала распределения сравнить их с действительными данными ряда:

а) $\bar{x} \pm 0,3\sigma$ – к интервалу должно относиться около 25% частоты совокупности,

б) $\bar{x} \pm 0,7\sigma$ – к интервалу должно относиться около 50% частоты совокупности,

в) $\bar{x} \pm 1,1\sigma$ – к интервалу должно относиться около 75% частоты совокупности,

г) $\bar{x} \pm 3\sigma$ – к интервалу должно относиться около 100% частоты совокупности.

Оценка достоверности полученных результатов. Достоверность результатов исследования рассчитана по закону распределения Стьюдента и позволяет сделать вывод о том, что ошибка результатов почти во всех тестах не превышает 0,01, в двух – не превышает 0,1.

В исследовании статистика t-критерия Стьюдента вычислялась для случая связанных данных (парных) выборок.

Вычисление значения t осуществляется по формуле (1):

$$t_{эмн} = \frac{\bar{d}}{Sd}, \quad (1)$$

где $d_i = x_{экс} - x_{вых}$ - разности между соответствующими значениями тестов в начале эксперимента (до обучения) $x_{экс}$ и в конце эксперимента $x_{вых}$;

\bar{d}_i - среднее этих разностей;

Sd вычисляется по формуле (2):

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum d_i^2 - \frac{(\sum d_i)^2}{n}}{n \cdot (n-1)}}. \quad (2)$$

Число степеней свободы k определяется по формуле $k=n-1$, где n – количество обучаемых, принимавших участие в эксперименте.

Сравнивая полученное в эксперименте значение $t_{эмп}$ с табличным значением $t_{крит}$ с учетом степеней свободы, получаем: если $t_{эмп} < t_{крит}$, то нулевая гипотеза о равенстве средних (о неэффективности экспериментального обучения) принимается, в противном случае принимается альтернативная – различия в начальных и итоговых умениях по армейской тактической стрельбе существенны.

Рассмотрим использование t -критерия Стьюдента для выборки обучаемых, апрель 2019 года, тест П1. По результатам контрольных тестирований в начале и конце обучения получаем:

$$\bar{d} = 2,142, Sd=0,5035, t_{эмп}=3,6087, t_{крит}(18, 0,99)=2,8784,$$

то есть $t_{эмп} > t_{крит}$, следовательно на уровне значимости (достоверности) 0,99 принимается альтернативная гипотеза – различия в начальных и итоговых умениях военнослужащих по армейской тактической стрельбе существенны, военнослужащие при проведении итоговых тестов показывают в среднем более высокий уровень стрелкового мастерства, чем в начале обучения.

Аналогичные результаты получены для остальных автоматных и пистолетных тестов. Доказано ли преимущество экспериментального метода армейской тактической стрельбе? Не столько доказано, сколько показано, потому что с самого начала допускается риск ошибиться в одном случае из ста ($p=0,01$). Но 99% возможных случаев говорит в пользу альтернативной гипотезы, а это достаточно убедительный аргумент в статистическом доказательстве.

Библиографический список

- 1 Ахметжанова, Г.В. Применение методов математической статистики в психолого-педагогических исследованиях : электронное учебное пособие / Г.В. Ахметжанова, И.В. Антонова. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – 1 оптический диск.
- 2 Граничина О.А. Математико-статистические методы психолого-педагогических исследований. – СПб.: Издательство ВВМ, 2012 – 115 с.
- 3 Тумаков Н.Н. Обучение военнослужащих специальной скоростной стрельбе. [Текст] / Е.И. Гужвенко, Н.Н. Тумаков, В.Ю. Гужвенко. Материалы IV научно-методической конференции «Методы обучения и организация учебного процесса в вузе». – Рязань, РГРТУ, 2015. – С. 420-422.
- 4 Тумаков Н.Н. О необходимости внедрения специальной скоростной стрельбы из стрелкового оружия в практику обучения военнослужащих // Современная педагогика. 2015. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://pedagogika.snauka.ru/2015/02/3407> (дата обращения: 12.09.2020).
- 5 Яковлев Е.В., Яковлева Н.О. Педагогическое исследование: содержание и представление результатов / Е.В. Яковлев, Н.О. Яковлева. – Челябинск.: Изд-во РБИУ, 2010. – 317 с.
- 6 <https://www.sites.google.com/site/ktnoscience/Home/lecture/16>

УДК 519.766.2; ГРНТИ 27.03.33

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОЕКТУ «ТРАНСФОРМАЦИИ НЕЧЕТКОСТИ В СИСТЕМАХ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА»

К.В. Бухенский, А.Н. Конюхов, А.Б. Дюбуа, К.В. Анисимов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, chronos@bk.ru

Аннотация. Промежуточные результаты включают: 1) уточненный формульно-понятийный аппарат; 2) формулу быстрого расчета индексов нечеткости нечетких чисел (НЧ) LR-типа; 3) некоторые закономерности преобразований нечеткости при арифметических операциях над НЧ LR-типа; 4) зависимость нечеткости бинарного нечеткого отношения, выражающего правило Мамдани, от составляющих его НЧ LR-типа; 5) формулы быстрого расчета индекса нечеткости правила Мамдани.

Ключевые слова: нечеткое множество, нечеткое число, спрэд, мера нечеткости, индекс нечеткости, антецедент, консеквент, система нечеткого вывода, нечеткое правило Мамдани.

MIDTERM RESULTS OF INVESTIGATIONS ON THE PROJECT «FUZZINESS TRANSFORMATIONS IN FUZZY INFERENCE SYSTEMS»

K.V. Bukhensky, A.N. Konyukhov, A.B. Dubois, K.V. Anisimov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, chronos@bk.ru

Abstract. Midterm results include: 1) detailed base definitions and formulas; 2) formula for rapid calculation indices of fuzziness of LR-type fuzzy numbers (FNs); 3) some features of fuzziness transformations on arithmetic operations over LR-type FN; 4) fuzziness of a binary fuzzy relation expressing Mamdani rule in dependence on its constituent LR-type FN; 5) formulas for rapid calculation indices of fuzziness of Mamdani rule.

Keywords: fuzzy set, fuzzy number, spread, measure of fuzziness, index of fuzziness, antecedent, consequent, fuzzy inference system (FIS), fuzzy relation, fuzzy Mamdani rule.

Проект «Трансформации нечеткости в системах нечеткого вывода» реализуется с конца 2019 года на кафедре «Высшая математика» РГРТУ. Цель проекта: совершенствование теории мягких вычислений и математического обеспечения контроллеров технических устройств на нечеткой логике.

Базовая терминология и обозначения

$\tilde{A} = \{ \langle x \in U, \mu_{\tilde{A}}(x) \rangle \}$ – нечеткое подмножество (НМ) \tilde{A} универсума U ;

$\mu_{\tilde{A}}(x)$ – функция принадлежности (ФП) элемента $x \in U$ множеству \tilde{A} , $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1$;

$\text{supp}(\tilde{A}) = \{ x \in U \mid \mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \}$ – носитель НМ \tilde{A} (четкое множество);

$\text{core}(\tilde{A}) = \{ x \in U \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = 1 \}$ – ядро НМ (четкое множество);

$\text{height}(\tilde{A}) = \max_{x \in \text{supp}(\tilde{A})} \mu_{\tilde{A}}(x)$ – высота непустого НМ \tilde{A} ;

$\mathcal{F}(U)$ – совокупность всевозможных НМ, заданных на универсуме U ;

$\tilde{u}(x)$ – нечеткое число (НЧ) – класс НМ с носителем на \mathbb{R} , причем: 1) $\text{height}(\tilde{u}) = 1$ (\tilde{u} – нормальное НМ); 2) \tilde{u} – выпуклое НМ; 3) $\text{supp}(\tilde{u})$ – ограниченное множество $[1, 2]$.

НЧ LR-типа (общий вид):

$$\tilde{u}(x) = [m_1, m_2, ls, rs]_{LR}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m_1 - x}{ls}\right), & \text{если } m_1 - ls \leq x \leq m_1, \quad ls > 0, \\ 1, & \text{если } m_1 < x \leq m_2 \\ R\left(\frac{x - m_2}{rs}\right), & \text{если } m_2 < x \leq m_2 + rs, \quad rs > 0, \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

где $[m_1, m_2]$ – ядро НЧ, ($m_1 \leq m_2$); $ls, rs, cs = (m_2 - m_1)$ – левый, правый и центральный спре-ды НЧ соответственно; $L(t), R(t)$ – левая и правая функции формы (ФФ). Если $m_1 = m_2 = m$, то получается унимодальное НЧ $\tilde{u}(x) = [m, ls, rs]_{LR}(x)$.

Класс функций формы $F[0,1]$ на отрезке $[0,1]$:

$$L(t) \in F[0,1] \Leftrightarrow \begin{cases} L(t): [0,1] \rightarrow [0,1] \\ L(t) \in C[0,1] \\ L(0) = 1, L(1) = 0 \\ L(t) \downarrow, 0 \leq t \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Нечеткое n -арное отношение $\tilde{\mathcal{R}}$, заданное на универсуме $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ – это любое нечеткое подмножество $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$, описываемое ФП $\mu_{\tilde{\mathcal{R}}}: U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n \rightarrow [0,1]$.

Мера математической нечеткости НМ $mf(\tilde{A})$ – всякая функция на множестве всех нечетких подмножеств $\mathcal{F}(U)$ универсума U , удовлетворяющая совокупности условий:

$$\begin{cases} (mf(\tilde{A}) = 0) \Leftrightarrow ((\mu_{\tilde{A}}(x) = 1) \vee (\mu_{\tilde{A}}(x) = 0) \forall x \in U); \\ (\mu_{\tilde{A}}(x) = 0,5 \forall x \in U) \Rightarrow (mf(\tilde{A}) = \max_{\tilde{Z} \in \mathcal{F}(U)} mf(\tilde{Z})); \\ \left. \begin{array}{l} \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x), \text{ если } \mu_{\tilde{B}}(x) \leq 0,5 \\ \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \mu_{\tilde{B}}(x), \text{ если } \mu_{\tilde{B}}(x) \geq 0,5 \end{array} \right\} \Rightarrow (mf(\tilde{A}) \leq mf(\tilde{B})); \\ mf(\tilde{A}) = mf(\tilde{\bar{A}}), \end{cases} \quad (3)$$

где $\tilde{\bar{A}}$ – дополнение НМ \tilde{A} до U , т.е. $\mu_{\tilde{\bar{A}}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x), \forall x \in U$ [1, 2].

Индекс математической нечеткости НМ $if(\tilde{A})$ или просто индекс нечеткости (ИН):

$$(if(\tilde{A}) = mf(\tilde{A})) \wedge (0 \leq if(\tilde{A}) \leq 1). \quad (4)$$

Основные результаты исследований

1. На множестве функций формы: гладкая гауссова (sg), гладкая квадратичная (sq), гармоническая (hgm), усеченная парабола (sp), усеченная гауссова (cg), гиперболическая (hup), логарифмическая (log), корень квадратный (sqrt), линейная (lin) – всего девять экземпляров, рассчитаны и сопоставлены значения известных индексов нечеткости (ИН) [3]:

- энтропийного ИН (A. De Luca & S. Termini):

$$if_H(\tilde{A}) = \frac{1}{(a-b)\ln 2} \int_a^b [\mu_{\tilde{A}}(x) \ln \mu_{\tilde{A}}(x) + (1 - \mu_{\tilde{A}}(x)) \ln(1 - \mu_{\tilde{A}}(x))] dx, \quad (5)$$

здесь и далее $(a, b) = \text{supp}(\tilde{A})$, причем для функций формы $(a, b) = (0, 1)$;

- кардинального ИН (B. Kosko):

$$if_C(\tilde{A}) = \frac{\text{card}(\tilde{A} \cap \overline{\tilde{A}})}{\text{card}(\tilde{A} \cup \overline{\tilde{A}})} = \frac{\int_a^b \min(\mu_{\tilde{A}}(x), 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)) dx}{\int_a^b \max(\mu_{\tilde{A}}(x), 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)) dx}; \quad (6)$$

- метрического ИН (R. Yager) по метрике p :

$$if_{Yp}(\tilde{A}) = 1 - \left(\frac{1}{b-a} \int_a^b |2\mu_{\tilde{A}}(x) - 1|^p dx \right)^{1/p}, \quad (7)$$

где $p = 1$ соответствует метрике Хэмминга, $p = 2$ - метрике Евклида;

- метрического ИН (A. Kaufmann)

$$if_K(\tilde{A}) = \frac{2}{b-a} \int_a^b |\mu_{\tilde{A}}(x) - \mu_A(x)| dx, \quad (8)$$

где

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0,5 < \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1, \\ 0, & \text{если } 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 0,5 \end{cases} \quad (9)$$

– характеристическая функция четкого множества A , ближайшего к данному НМ \tilde{A} .

Исчисленные на различных функциях формы, все индексы (кроме энтропийного) попарно продемонстрировали очень высокую линейную сонаправленную корреляционную связь (выборочный линейный коэффициент корреляции $r_g > 0,94$).

Обоснована формула расчета ИН НЧ LR-типа, основанная на таблице значений ИН функций формы и взвешивании их вклада по длине носителя в суммарную нечеткость НЧ:

$$if(\tilde{u}_{LR}) = (\mathbf{S}_{\tilde{u}}^*)^T \cdot \mathbf{IFF}_{\tilde{u}}, \quad (10)$$

где $\mathbf{S}_{\tilde{u}}^* = (ls_{\tilde{u}}^*, cs_{\tilde{u}}^*, rs_{\tilde{u}}^*)^T$ – вектор-столбец приведенных спрэдов числа \tilde{u}_{LR} :

$ls_{\tilde{u}}^* = \frac{ls_{\tilde{u}}}{s_{\tilde{u}}}$, $cs_{\tilde{u}}^* = \frac{cs_{\tilde{u}}}{s_{\tilde{u}}}$, $rs_{\tilde{u}}^* = \frac{rs_{\tilde{u}}}{s_{\tilde{u}}}$, где $s_{\tilde{u}} = ls_{\tilde{u}} + cs_{\tilde{u}} + rs_{\tilde{u}}$ – полный спред, равный длине носителя

НЧ \tilde{u}_{LR} ; $\mathbf{IFF}_{\tilde{u}} = (if(L_{\tilde{u}}), 0, if(R_{\tilde{u}}))^T$ – вектор-столбец ИН функций формы НЧ \tilde{u}_{LR} [3].

ИН функций формы вычисляются следующим образом, например, по Ягеру при $p=1$:

$$if_{Y1}(L) = 1 - \int_0^1 |2L(t) - 1| dt. \quad (11)$$

В случае унимодальных чисел LR-типа ($cs = 0$) при $L(t) \equiv R(t) \equiv F(t)$ установлена независимость значений всех четырёх ИН от величины общего спрэда (длины носителя числа), что следует из (10). В таком случае $if(\tilde{u}) = if(F)$ при любой длине носителя.

Предложенный подход (10) позволяет существенно сократить время расчета ИН, так как, по сути, сведен к единственной операции взвешенного усреднения.

Разграничены понятия спрэдовой и математической нечеткости (рисунок 1).

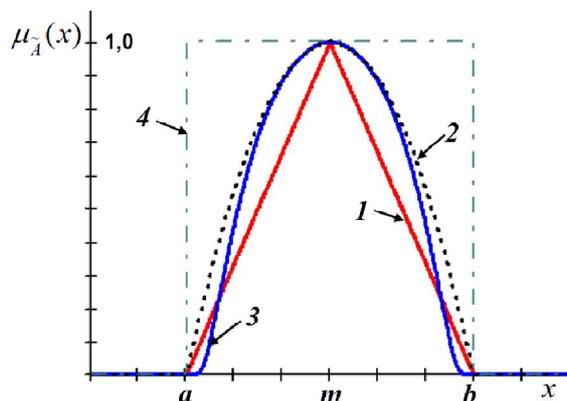


Рис. 1. Нечеткие числа (ФФ: 1 – линейная, 2 – усеченная парабола, 3 – гауссова гладкая) и четкий интервал (a, b) – 4.

Индексы математической нечеткости: 0,5 (1); 0,391 (2); 0,323 (3); 0 (4).
Спрэдовая нечеткость во всех случаях $(b - a)$.

Индексы математической нечеткости (Ягера, $p=1$) приведенных выше термов существенно различаются: 0,500 (треугольная); 0,391 (усеченная парабола); 0,323 (гауссова гладкая). Спрэдовая же нечеткость во всех случаях одинакова и равна $(b - a)$ [4].

2. На всех последующих этапах исследования использовался индекс нечеткости Ягера с линейной метрикой Хэмминга ввиду удобства его расчета. В качестве носителей НЧ брали подмножества \mathbb{R}^+ . Такая ситуация наиболее типична на практике.

Для исследования отображений НМ применялся принцип расширения (обобщения) Л.Заде [1, 2]. Изучено влияние инъективных отображений НМ с непрерывным ограниченным носителем на нечеткость образа. Показана инвариантность ИН относительно линейных отображений НМ и, как следствие, при умножении НМ на ненулевое действительное число [4].

Получена расчетная формула индекса математической нечеткости результата сложения: он определяется как средневзвешенное по спрэдам значение индексов нечеткости операндов в спрэде суммы:

$$if(\tilde{w}) = if(\tilde{u} + \tilde{v}) = (\mathbf{S}^*)^T \cdot \mathbf{IF} = s_u^* if(\tilde{u}) + s_v^* if(\tilde{v}), \quad (12)$$

где $\mathbf{IF} = (if(\tilde{u}), if(\tilde{v}))^T$ – вектор-столбец ИН слагаемых; $\mathbf{S}^* = (s_u^*, s_v^*)^T$ – вектор-столбец приведенных спрэдов – относительных долей спрэдов слагаемых \tilde{u} и \tilde{v} в носителе суммы – НЧ $\tilde{w} = \tilde{u} + \tilde{v}$; $s_{\tilde{w}}^* = ls_u + cs_u + rs_u + ls_v + cs_v + rs_v$, т.е.

$$s_u^* = \frac{ls_u + cs_u + rs_u}{s_{\tilde{w}}^*}, \quad s_v^* = \frac{ls_v + cs_v + rs_v}{s_{\tilde{w}}^*}; \quad (s_u^* + s_v^* = 1). \quad (13)$$

Доказана инвариантность значений индекса нечеткости для операций сложения унимодальных НЧ LR-типа с одинаковыми функциями формы:

$$(L_{\tilde{u}}(t) \equiv R_{\tilde{u}}(t) \equiv L_{\tilde{v}}(t) \equiv R_{\tilde{v}}(t)) \wedge (cs_{\tilde{v}} = cs_{\tilde{u}} = 0) \Rightarrow (if(\tilde{u} + \tilde{v}) = if(\tilde{u}) = if(\tilde{v})). \quad (14)$$

Показано, что в случае сложения НЧ, в том числе нечетких интервалов, с произвольными функциями формы индекс математической нечеткости суммы заключен в пределах от наименьшего до наибольшего из значений ИН слагаемых:

$$\min(if(\tilde{u}), if(\tilde{v})) \leq if(\tilde{u} + \tilde{v}) \leq \max(if(\tilde{u}), if(\tilde{v})). \quad (15)$$

3. На третьем этапе исследовали преобразование нечеткости в результате умножения двух унимодальных НЧ LR-типа [5]. Получена формула

$$if(\tilde{w}) = if(\tilde{u} \cdot \tilde{v}) = \frac{m_v s_u if(\tilde{u}) + m_u s_v if(\tilde{v})}{s_w} + \Delta, \quad (16)$$

где $s_u = ls_u + rs_u$, $s_v = ls_v + rs_v$ – полные спрэды \tilde{u} и \tilde{v} ;

$s_w = (m_v s_u + m_u s_v - ls_u ls_v + rs_u rs_v)$ – полный спрэд произведения – НЧ \tilde{w} ;

$\frac{m_v s_u if(\tilde{u}) + m_u s_v if(\tilde{v})}{s_w}$ – линейный относительно ИН сомножителей вклад в нечеткость

результата;

$\Delta = \frac{rs_u rs_v if(R_{uv}) - ls_u ls_v if(L_{uv})}{s_w}$ – нелинейный вклад в ИН, обусловленный взаимодействием функций форм сомножителей;

$L_{uv}(t) = (L_u^{-1}(\alpha)L_v^{-1}(\alpha))^{inv}$ и $R_{uv}(t) = (R_u^{-1}(\alpha)R_v^{-1}(\alpha))^{inv}$, где верхний индекс «-1» или «inv» обозначает функцию, обратную данной.

Для факторного анализа (16) удобнее переписать в виде

$$if(\tilde{w}) = \frac{m_v s_u if(\tilde{u}) + m_u s_v if(\tilde{v})}{m_v s_u + m_u s_v} k_1 + \frac{rs_u rs_v if(R_{uv}) - ls_u ls_v if(L_{uv})}{rs_u rs_v - ls_u ls_v} k_2, \quad (17)$$

где $k_1 = \frac{m_v s_u + m_u s_v}{s_w}$ – доля линейного (спрэд-модального) вклада в нечеткость;

$k_2 = \frac{rs_u rs_v - ls_u ls_v}{s_w}$ – доля нелинейного (спрэд-спрэдового) вклада в нечеткость. Очевидно,

что $k_1 + k_2 = 1$; $k_1 > 0$, в то время, как k_2 может быть положительным, отрицательным, либо равным нулю.

Показано, что в условиях малости спрэдов сомножителей по сравнению с величинами их мод $(m_u \gg 0, 5ls_u) \wedge (m_v \gg 0, 5ls_v) \wedge (m_u \gg 0, 5rs_u) \wedge (m_v \gg 0, 5rs_v)$, нечеткость результата определяется преимущественно спрэд-модальным вкладом и законы преобразования нечеткости при умножении аналогичны таковым для сложения двух НЧ со спрэдами $m_v s_u$ и $m_u s_v$. В частности в условиях данных ограничений индекс нечеткости инвариантен относительно операции умножения нечетких чисел LR-типа одинакового класса. Также применима взвешенная формула для быстрого исчисления индекса нечеткости, доказанная нами в [4].

Выведено условие инвариантности ИН унимодальных НЧ относительно операции умножения в отсутствии каких-либо ограничений на величины спрэдов операндов одного

класса, а именно равенство индексов нечеткости $if(F(t)) = if(F(\sqrt{t}))$, которому удовлетворяют, в частности, линейная, гладкая квадратичная, гармоническая функции формы $F(t)$.

Установлены нижняя и верхняя грани изменения ИН результата при умножении произвольных НЧ одного класса для которых $if(F(t)) \neq if(F(\sqrt{t}))$.

4. На четвертом этапе исследована нечеткость нечеткого отношения (НО), выражающего правило Мамдани [1, 2]:

$$\widetilde{\mathcal{R}}_M(x, y) = \min_{X \times Y} \{\mu_{\tilde{u}}(x), \mu_{\tilde{v}}(y)\} = \tilde{u}(x) \wedge \tilde{v}(y), \quad (18)$$

в зависимости от характеристик составляющих его НМ – антецедента и консеквента, заданных в виде унимодальных или полимодальных НЧ LR-типа; $X = \text{supp } \tilde{u} = [0, a]$ и $Y = \text{supp } \tilde{v} = [0, b]$.

Доказано, что индекс нечеткости отношения Мамдани в случае антецедента и консеквента одного вида, например, «треугольное НЧ – треугольное НЧ» равен $if(F(\sqrt{t}))$, где $F(t)$ – функция формы НЧ.

Выведено условие инвариантности индекса нечеткости НЧ одного вида относительно операции построения НО Мамдани, а именно $if(F(t)) = if(F(\sqrt{t}))$, которому удовлетворяют, в частности, линейная, гладкая квадратичная, гармоническая функции формы $F(t)$.

Установлено, что для пар различных унимодальных НЧ LR-типа с одинаковыми левыми и правыми функциями формы, например «треугольное число – усеченная парабола», индекс нечеткости НО Мамдани равен

$$if(\widetilde{\mathcal{R}}(\tilde{u}, \tilde{v})) = if\left(\left(F_u^{-1}(\alpha)F_v^{-1}(\alpha)\right)^{inv}\right), \quad (19)$$

или

$$if(\widetilde{\mathcal{R}}(\tilde{u}, \tilde{v})) = 2 \int_0^{1/2} (F_u^{-1}(\alpha)F_v^{-1}(\alpha)) d\alpha - 2 \int_{1/2}^1 (F_u^{-1}(\alpha)F_v^{-1}(\alpha)) d\alpha. \quad (20)$$

т.е. разности средних интегральных значений функции $F_u^{-1}(\alpha)F_v^{-1}(\alpha)$ на промежутках $0 \leq \alpha \leq 1/2$ и $1/2 \leq \alpha \leq 1$.

Предложен альтернативный подход – использование интегральной функции $I_{u,v}(x)$ для расчета индекса нечеткости НО Мамдани, которая в ряде случаев допускает аналитическое вычисление

$$if(\widetilde{\mathcal{R}}(\tilde{u}, \tilde{v})) = 2I_{u,v}\left(\frac{1}{2}\right) - I_{u,v}(1); \quad I_{u,v}(x) = 2 \int_0^x F_u^{-1}(\alpha)F_v^{-1}(\alpha) d\alpha, \quad 0 \leq x \leq 1. \quad (21)$$

Выведена формула верхней грани индекса нечеткости НО Мамдани в случае фиксированного вида антецедента (консеквента):

$$\sup_{\tilde{u}(x) \in \mathcal{F}(X)} \left(if(\widetilde{\mathcal{R}}(\tilde{u}, \tilde{v})) \right) = 2 \int_0^{1/2} F_v^{-1}(\alpha) d\alpha. \quad (22)$$

5. Получены формулы для расчета индекса нечеткости отношения Мамдани, не требующие вычисления двойного интеграла. Унимодальный случай:

$$if(\tilde{\mathcal{R}}(\tilde{u}, \tilde{v})) = \begin{pmatrix} ls_u^* & rs_u^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} if(\tilde{\mathcal{R}}(L_u, L_v)) & if(\tilde{\mathcal{R}}(L_u, R_v)) \\ if(\tilde{\mathcal{R}}(R_u, L_v)) & if(\tilde{\mathcal{R}}(R_u, R_v)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ls_v^* \\ rs_v^* \end{pmatrix} = S_u^{*T} \left\| if(\tilde{\mathcal{R}}(F_u^i, F_v^j)) \right\| S_v^*, \quad (23)$$

где S_u^* и S_v^* – вектор-столбцы приведенных спредов LR-антецедента и LR-консеквента соответственно; $\left\| if(\tilde{\mathcal{R}}(F_u^i, F_v^j)) \right\|$ – матрица ИН попарных отношений функций форм на квадрате $[0,1] \times [0,1]$, $i, j = \overline{1,2}$.

Полимодалный случай: $\tilde{u}(x)$ и $\tilde{v}(y)$ – нечеткие интервалы

$$if(\tilde{\mathcal{R}}(\tilde{u}, \tilde{v})) = \begin{pmatrix} ls_u^* & cs_u^* & rs_u^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} if(\tilde{\mathcal{R}}(L_u, L_v)) & if(L_u) & if(\tilde{\mathcal{R}}(L_u, R_v)) \\ if(L_v) & 0 & if(R_v) \\ if(\tilde{\mathcal{R}}(R_u, L_v)) & if(R_u) & if(\tilde{\mathcal{R}}(R_u, R_v)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ls_v^* \\ cs_v^* \\ rs_v^* \end{pmatrix}, \quad (24)$$

или

$$if(\tilde{\mathcal{R}}(\tilde{u}, \tilde{v})) = S_u^{*T} \left\| if(\tilde{\mathcal{R}}(F_u^i, F_v^j)) \right\| S_v^*, \quad (i, j = \overline{1,3}). \quad (25)$$

Для применения формул (23-25) предварительно рассчитан массив ИН попарных отношений для наиболее часто используемых девяти ФФ.

Продолжением данного исследования станет изучение преобразований нечеткости при реализации нечеткого вывода Мамдани, а также зависимости результата дефазификации выходного НМ от нечеткости последнего.

Библиографический список

1. Bede, B. Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. – London: Springer, 2013. – 276 p.
2. Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Сафошкин А.С. Основы теории нечетких множеств. Часть 2: учеб. пособие / А.Н.Конюхов, А.Б.Дюбуа, А.С.Сафошкин; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2018. 108 с.
3. Бухенский К.В., Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Сафошкин А.С. Быстрый алгоритм расчета индексов нечеткости для унимодальных нечетких чисел LR-типа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. №70. С. 65-75.
4. Бухенский К.В., Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Сафошкин А.С. Преобразования нечеткости при линейных операциях над нечеткими числами LR-типа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. №71. С. 137-150.
5. Бухенский К.В., Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Сафошкин А.С. Особенности преобразования нечеткости при операции умножения нечетких чисел LR-типа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. №73. С. 83-96.

УДК 004.942: 510.6; ГРНТИ 12.09.09

ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ БУЛЕВОЙ АЛГЕБРЫ ЛОГИКИ

Е.Б. Федосова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lena.fedosova2019@mail.ru*

Аннотация. В работе приводятся и анализируются исторические примеры применения алгебры логики (булевой алгебры) в создании моделей технических системах. Представлены первые попытки применения логики к механическим и электрическим устройствам, а также алгебраические модели современных технических системы.

Ключевые слова: алгебра логики, модели технических системы, электрические схемы, контактно-релейные схемы, история и современность применения.

HISTORICAL ASPECT OF TECHNICAL SYSTEMS MODELS CREATION BASED ON BOOLEAN LOGIC ALGEBRA

E.B. Fedosova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, lena.fedosova2019@mail.ru*

The summary. The paper presents historical examples of the use of logic algebra (Boolean algebra) in the creation of technical systems models. The first attempts to apply logic to mechanical and electrical devices, as well as algebraic models of modern technical systems are presented.

Keywords: logic algebra, models of technical systems, electrical circuits, contact relay circuits, history and modernity of application.

Переломным моментом в проблеме соотношения логики и техники стало открытие возможности использования булевой алгебры в изучении и моделировании технических устройств. Это открытие совершили почти одновременно в 30-е-40-е годы XX века К. Шеннон, А. Накашимаи В.И. Шестаков [1], которые независимо друг от друга пришли к использованию логики в задачах электротехники. Возможность применения логики в моделировании технических систем, в частности, электротехнических, стало настоящим прорывом в науке, поскольку средства алгебры логики позволили проводить формализованный анализ и синтез технических устройств, что значительно упростило работу с контактно-релейными схемами.

Разумеется, о практическом применении логики исследователи начали задумываться гораздо раньше. Еще в «до-булевский» период, начиная с XIII века, с «логической машины» Раймунда Луллия, предпринимались попытки приложить логику к технике – здесь достаточно упомянуть машину Стенли Джевонса, аналитическую машину Ч. Беббиджа [2], счетную машину Г.В. Лейбница. Говоря же о практическом применении логики, предложенной Ч. Булем, часто забывают упомянуть про американского логика Ч. С. Пирса, который в 1886 году в письме своему бывшему студенту А. Марканду упомянул, что булева логика хорошо подходит для описания электрических схем [3]. Однако высказанная Пирсом идея не была развита ни Маркандом, ни самим Пирсом, и, судя по всему, была забыта. Очевидно, все перечисленные идеи использования логики не могли сильно повлиять на складывавшиеся в науке тенденции развития технических устройств, в отличие от открытия, совершенного тремя упомянутыми учеными.

Справедливо отметить, что В.И. Шестаков был первым из отечественных исследователей, занимавшихся приложением логики к электротехническим задачам, но если говорить о первенстве применения логики к задачам технического характера в целом, среди отечественных ученых нельзя не вспомнить про Н.М. Герсеванова, изучавшего вопросы строительного дела и прикладной математики. Уже в 1923 году Герсеванов опубликовал работу «Применение математической логики к расчету сооружений», в которой использовал логический аппарат, базирующийся на книге французского математика Луи Кутюра «Алгебра логики». Интересно, что книга Луи Кутюра сыграла еще одну, косвенную роль в истории проблемы

«логика-техника»: в 1910 году Пауль Эренфест опубликовал на эту книгу рецензию, где впервые публично была отмечена и весьма ясно сформулирована идея возможности применения алгебры логики в вопросах электротехники. Возвращаясь к работе Герсеванова, отметим, что его подход не получил развития ни в его последующих работах, ни в работах его учеников. Кроме того, статья Герсеванова была издана всего в 300 экземплярах и, как пишут Бирюков и Шахов в работе [4], «не была известна В.И. Шестакову; а когда она в 1948 г. была переиздана, для него она была уже не интересна, так как Виктор Иванович уже шел своим собственным путем».

Как известно, алгебра логики – это раздел математики, рассматривающий высказывания со стороны их логических значений (истинности или ложности) и логических операций над ними. Основателем алгебры логики является английский математик Дж. Буль, который в середине XIX века разработал аппарат математического описания логических рассуждений. При исследовании истории применения логики в технических системах не может не возникнуть вопрос, почему же алгебра логики не привлекла внимание инженеров-электротехников раньше, ведь к моменту появления рецензии Эренфеста почти 50 лет развивалась булева алгебра и около 30 лет применялись релейно-контактные схемы. Существует мнение, что алгебра логики долгое время оставалась не востребованной инженерами-электриками потому, что использовавшиеся в то время контактно-релейные схемы были относительно несложными с точки зрения логики [5]. Например, схемы взаимной замкнутости в системах блокировки выстрела башенных орудий главного калибра русских броненосцев (сер. 1890-х). В таких схемах сложна электрическая разводка, но с логической точки зрения эта схема достаточно проста.

Еще одним примером возможного, но не реализованного применения алгебры логики в технике того времени является табулятор Германа Холлерита. В конце XIX-начале XX века табуляторы чаще всего использовались при переписи населения. Создатели табулятора, руководствуясь не законами алгебры логики, а простым здравым смыслом, реализовали условия срабатывания соответствующих счетчиков (рис. 1). Как видно, конъюнкты не учитывают инвертированные переменные, что могло приводить к пропуску ошибок в перфокартах (например, одновременная перфорация взаимоисключающих позиций).

$$\begin{aligned}
 white \wedge native \wedge male &= M^1 \\
 white \wedge native \wedge female &= M^2 \\
 white \wedge foreign \wedge male &= M^3 \\
 white \wedge foreign \wedge female &= M^4 \\
 colored \wedge male &= M^5 \\
 colored \wedge female &= M^6
 \end{aligned}$$

Рис.1. Условия срабатывания счетчиков табулятора Холлерита

Первой областью, где применение алгебры логики или близких к ней методов стало насущной потребностью, является железнодорожная сигнализация. Для моделирования работы систем управления были разработаны способы описания, близкие по своему характеру к алгебре логики. Например, бельгийскими инженерами А. Фламашем, А. Юберти и А. Стеваром была предложена система описания железнодорожных сигналов с выражениями, очень похожими на выражения алгебры логики [5]. Существенным отличием этой системы от булевой логики являлось то, что операторы системы Фламаша не имели развитого инструментария преобразований, каким обладала алгебра логики.

Итак, открытие связи булевой логики с электрическими цепями стало фундаментальным событием, определившим направление развития вычислительной техники. Релейно-переключающие схемы стали первым этапом применения логики в технических системах. С

течением времени релейные схемы ввиду своих неоптимальных параметров надежности, габаритов, энергопотребления и т.д. были замещены транзисторными схемами. Однако теория контактно-релейных схем стала некоей классической моделью, анализирующей свойства реальных объектов оторванно от физической природы этих объектов.

К середине XX века складывается второй этап применения логики в технике – теория автоматического регулирования. Этот этап охватывал не только электрические цепи, но и гидравлические, кинематические и проч. По мере развития теория автоматического регулирования нашла применение в разных областях, в том числе, в области наносхемотехники, где стандартные логические операции И, ИЛИ, НЕ реализуются с помощью молекулярных переключателей [6].

Помимо теории контактно-релейных цепей алгебра логики используется и в теории конечных автоматов (теории логических сетей). Основной ее задачей является синтез автоматов с конечной памятью – дискретных устройств, состоящих из логических элементов, представляющих собой конъюнкцию, дизъюнкцию и логическое отрицание. Одним из основных трудов в этой области считается сборник «Автоматы» 1956 года, который был переведен в том числе и русский язык [7]. В дальнейшем сложилась целая область исследований, посвященная анализу и синтезу автоматов с конечной памятью, включавшая в себя, в том числе, проблему синтеза надежных автоматов из ненадежных элементов [8, 9]. К этой же области принадлежит теория формальных нервных сетей, которая также может быть исследована на основе положений математической логики и булевой алгебры [10]. Все эти направления в настоящее время включены в область исследований искусственного интеллекта.

Тематически и по методам исследования проблема применения алгебры логики близко стоит (местами пересекаясь) к абстрактным проблемам современной алгебры систем и структур [11 – 13], а также ее техническим приложениям [14 – 18], что было показано, в частности, на предыдущем форуме СТНО-2020 [19, 20].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что булева алгебра была и остается важным разделом математики и логики в частности. Универсальность этого математического аппарата способствует применению его в самых разных технических системах – от контактно-релейных схем до нейронных сетей.

Библиографический список

1. Левин В.И., Бирюков Б.В. Еще раз об истории открытия логического моделирования технических устройств. – Вестник Московского университета. Сер.7. Философия. №1, 2009.
2. Шилов В.В. История логических машин. – Информационные технологии №6/2004.
3. Letter, Peirce to A. Marquand, 1886 December 30, published 1993 in Kloesel, C. et al., eds., Writings of Charles S. Peirce: A Chronological Edition, Vol. 5. Indiana Univ. Press, pp. 421–3
4. Бирюков Б. В., Шахов В. И. Первые приложения логики к технике: Эренфест, Герсеванов и Шестаков. От применения логики к расчету сооружений и релейным схемам к логической теории размерностей физических величин // Логические исследования. №14. 2007.
5. Дружинин Ю. О. История первых попыток применения алгебры логики для решения технических задач // Вопросы истории естествознания и техники. – Т. 40. – №1, 2019.
6. Горохов В.Г. Логика и техника: от теории электрических цепей к наносхемотехнике. – Логические исследования. Вып. 18, 2012.
7. Автоматы. Сборник статей под редакцией К. Шеннона и Дж. Маккарти. — М.: ИЛ, 1956.
8. Нейман Дж. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. – сб. «Автоматы», ИЛ, 1956.
9. Тарасов В. В. К синтезу надежных схем из ненадежных элементов, Матем. заметки, том 20, выпуск 3, 391–400, 1976
10. Барский А.Б. Нейроинформатика. Однослойные логические нецронные сети. – М: МИИТ, 2008.
11. Миронов В.В. Объединение одночленных многообразий алгебр // Математические заметки. 1984. Т. 35. № 6. С. 789-794.
12. Миронов В.В. Вложение свободной достижимой алгебры от счетного числа свободных порождающих в свободную достижимую алгебру от двух свободных порождающих // Сибирский математический журнал. 1988. № 2. С. 215.

13. Миронов В.В. Отсутствие конечного базиса тождеств свободных 2-ступенно разрешимых алгебр конечной степени свободы // Математические заметки. 1988. Т.43. №3. С. 320-326.
14. Mironov V.V. A Comparison of Systems for Recording Space Debris // Cosmic Research, 1996. V.34. № 4. P. 382-386..
15. Mironov V.V. A technique for estimating the space debris density from the data of onboard recording systems // Cosmic Research. 2003. Т. 41 № 2. С. 204-208
16. Mironov, V.V., A.K. Murtazov. Model of Meteoroid Risk in Near-Earth Space // Pleiades Publishing, Ltd., 2015. Vol. 53. No.6.-P. 430-436.
17. Valentin V. Mironov, Alexandr I. Zavolokin and Aleksey K. Rozanov, Preparing electronic handbook for using active grammar during process of translation of technical texts into English // SHS Web of Science Conferences, 9, 02029 (2016) DOI: 10.1051 /shsconf/ 2016 EEIA, 2016 2 2902029/
18. Mironov V.V. New Indices of Publication Activity // Herald of the Russian Academy of Sciences, 2020, No 5, P. 618 – 624.
19. Миронов В.В., Труханов С.В. Применение математического аппарата нечеткой логики при тематической обработке данных космической гиперспектральной съемки // Современные технологии в науке и образовании –СТНО-2020: сб. тр. III междуна. науч.-техн. форума: в 10 т. – Рязань: РГРТУ, 2020. – Т. 5 – С. 199 – 204.
20. Звездочкин М.Ю., Миронов В.В. Обработка потоков информации с применением кодов Рида-Соломона // Современные технологии в науке и образовании –СТНО-2020: сб. тр. III междуна. науч.-техн. форума: в 10 т. – Рязань: РГРТУ, 2020. – Т. 3 – С. 27 – 31.

УДК 517.925; ГРНТИ 27.29.17

УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМЕ «ХИЩНИК–ЖЕРТВА» С КОНКУРЕНЦИЕЙ ЗА РЕСУРСЫ В ПОПУЛЯЦИИ ЖЕРТВ И НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ПЛОДОВИТОСТИ ХИЩНИКОВ ОТ ИХ ЧИСЛЕННОСТИ

Е.Ю. Лискина

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, e.liskina@365.rsu.edu.ru*

Аннотация. В работе рассмотрена трехфакторная модель «хищник – жертва», представляющая собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений с кубической нелинейностью. Найденны коэффициентные условия существования в этой системе устойчивых состояний равновесия в первой координатной четверти.

Ключевые слова: динамическая система, состояние равновесия, устойчивость, фазовая траектория, модель «хищник – жертва», фазовый портрет.

CONDITIONS FOR THE EXISTENCE OF A STABLE EQUILIBRIUM IN THE «PREDATOR–PREY» SYSTEM WITH COMPETITION FOR RESOURCES IN THE PREY POPULATION AND THE NONLINEAR DEPENDENCE OF PREDATOR FECUNDITY ON THEIR NUMBERS

E.Ju. Liskina

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,
Russia, Ryazan, e.liskina@365.rsu.edu.ru*

The summary. We consider a three-factor model «predator-prey», which is a system of ordinary differential equations with cubic nonlinearity. We find the coefficient conditions for the existence of stable equilibrium states in this system in the first coordinate quarter.

Keywords: dynamic system, equilibrium state, stability, phase trajectory, «predator – prey» model, phase portrait.

Постановка задачи. Исследование различных типов систем «хищник – жертва» ведётся с первой четверти XX века, начавшись с классической системы А. Лотка и В. Вольтера, которая является двухфакторной моделью. Наиболее общая классификация моделей типа «хищник – жертва» в зависимости от типа меж- и внутривидовых

взаимодействий была предложена А.Д.Базыкиным в монографии [1]. Исследование некоторых трёхфакторных моделей представлено в работах [2, 3]. Один из типов трёхфакторных моделей динамики популяций учитывает тот факт, что плодовитость популяции немонотонно зависит от её численности (эффект У.К. Олли), что, как правило, характерно для популяции хищников. Для популяции жертв, как правило, характерна конкуренция за пищевые ресурсы [1].

Цель данной работы состоит в исследовании состояний равновесия модели динамики двух популяций, представленной следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = ax(B-x) - cxy, \\ \dot{y} = py(y-K)(L-y) + qxy, \end{cases} \quad (1)$$

в которой x, y – численности популяций жертв и хищников соответственно;

a, c, p, q, B, K, L – положительные постоянные коэффициенты;

a, p – темпы естественного роста популяций;

c – темп выедания жертв;

q – темп прироста хищников за счёт выедания жертв;

B – ёмкость среды для популяции жертв;

L – ёмкость среды для популяции хищников;

K – нижняя критическая ёмкость среды для популяции хищников, $L > K$, B сравнимо с L ;

числа a, c, p, q существенно меньше чисел B, K, L .

Результаты исследования. Рассмотрим систему дифференциальных уравнений (1). Её состояния равновесия определяются решениями системы алгебраических уравнений

$$\begin{cases} ax(B-x) - cxy = 0, \\ py(y-K)(L-y) + qxy = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Выполняя непосредственные вычисления, получаем, что система (2) имеет следующую совокупность решений:

$$\begin{cases} x=0, \\ y=0; \end{cases} \quad \begin{cases} x=0, \\ y=L; \end{cases} \quad \begin{cases} x=0, \\ y=K; \end{cases} \quad \begin{cases} x=B, \\ y=0; \end{cases} \quad \begin{cases} x=B - \frac{c}{a}y_1, \\ y=y_1; \end{cases} \quad \begin{cases} x=B - \frac{c}{a}y_2, \\ y=y_2; \end{cases}$$

где

$$y_{1,2} = \frac{(ap(K+L) - qc) \pm \sqrt{D}}{2pa}, \quad D = (ap(K+L) - qc)^2 + 4a^2(qB - pKL). \quad (3)$$

Следовательно, система (1) имеет следующие состояния равновесия: $O(0; 0)$, $M_1(0; L)$, $M_2(0; K)$, $M_3(B; 0)$, $M_4(B - \frac{c}{a}y_1; y_1)$, $M_5(B - \frac{c}{a}y_2; y_2)$, значения y_1 и y_2 определяются выражениями (3). При этом одно из состояний равновесия $M_4(B - \frac{c}{a}y_1; y_1)$ или $M_5(B - \frac{c}{a}y_2; y_2)$ может оказаться вне первого квадранта, или оба состояния равновесия отсутствуют одновременно. Последнее означает наличие условий, при которых одна из популяций вымирает.

Утверждение. Для существования хотя бы одной из точек M_4 и M_5 в первом квадранте необходимо и достаточно выполнение одной из следующих групп условий:

1) если $(qB - pKL) > 0$ и $B - \frac{c}{a}y_1 > 0$, то только M_4 расположена в первом квадранте,

2) если $(qB - pKL) = 0$ и $B - \frac{c}{a}y_1 > 0$, то точка M_5 совпадает с точкой $M_3(B; 0)$, а M_4 находится в первом квадранте,

3) если $(qB - pKL) < 0$, $\frac{(ap(K+L)-qc)^2}{4a^2} > (pKL - qB)$, $(ap(K+L) - qc) > 0$, $B - \frac{c}{a}y_1 > 0$ и $B - \frac{c}{a}y_2 > 0$, то обе точки M_4 и M_5 расположены в первом квадранте.

Доказательство. Необходимым и достаточным условием существования точек M_4 и M_5 является неотрицательность дискриминанта D в формулах (3). При этом возможны следующие случаи:

1. $(qB - pKL) > 0$, то $\sqrt{D} > |ap(K+L) - qc|$. Тогда $y_1 = \frac{(ap(K+L)-qc)+\sqrt{D}}{2pa} > 0$, $y_2 = \frac{(ap(K+L)-qc)-\sqrt{D}}{2pa} < 0$. Следовательно, точка M_5 находится вне первого квадранта, а точка M_4 находится в первом квадранте тогда и только тогда, когда $B - \frac{c}{a}y_1 > 0$.

2. $(qB - pKL) = 0$. В этом случае $\sqrt{D} = |ap(K+L) - qc|$, тогда $y_1 = \frac{(ap(K+L)-qc)}{pa}$, $y_2 = 0$. В этом случае точка M_5 совпадает с точкой $M_3(B; 0)$, а M_4 находится в первом квадранте тогда и только тогда, когда $B - \frac{c}{a}y_1 > 0$.

3. При $(qB - pKL) < 0$ для справедливости неравенства $D > 0$ необходимым и достаточным является условие $\frac{(ap(K+L)-qc)^2}{4a^2} > (pKL - qB)$. В этом случае $\sqrt{D} < |ap(K+L) - qc|$, тогда числа y_1 и y_2 будут одного знака с $(ap(K+L) - qc)$. Следовательно, для положительности y_1 и y_2 необходимо и достаточно выполнение неравенства $(ap(K+L) - qc) > 0$, а для существования точек M_4 и M_5 в первом квадранте необходимо и достаточно выполнение двух дополнительных неравенств $B - \frac{c}{a}y_1 > 0$ и $B - \frac{c}{a}y_2 > 0$.

Утверждение доказано.

Замечание. Дополнительного исследования требует случай 2, так как точка $M_3(B; 0)$ может оказаться сложным состоянием равновесия.

Определим тип каждого состояния равновесия. Для этого систему (1) приведём к виду

$$\begin{cases} \dot{x} = aBx - ax^2 - cxy, \\ \dot{y} = -KLpy + p(K+L)y^2 + qxy - py^3, \end{cases} \quad (4)$$

Матрица $A_{(0;0)} = \begin{pmatrix} aB & 0 \\ 0 & -KLp \end{pmatrix}$ системы линейного приближения, соответствующей системе (4) в точке $O(0; 0)$, имеет действительные собственные значения $\lambda_1 = aB$ и $\lambda_2 = -KLp$ разных знаков. Следовательно, точка $O(0; 0)$ является седлом [4].

Рассмотрим точку $M_1(0; L)$. С помощью замены переменных $x = u$, $y = v + L$ систему (4) преобразуем к виду

$$\begin{cases} \dot{u} = (aB - cL)u - au^2 - cuv, \\ \dot{v} = qLu - pL(L - K)v - p(2L - K)v^2 + quv - pv^3. \end{cases} \quad (5)$$

Матрица $A_{(0;L)} = \begin{pmatrix} aB - cL & 0 \\ qL & -Lp(L - K) \end{pmatrix}$ системы линейного приближения, соответствующей системе (5) в точке $M_1(0; L)$, имеет действительные собственные значения $\lambda_1 = aB - cL$ и $\lambda_2 = -Lp(L - K)$. Если предположить, что $aB > cL$, то собственные значения имеют разные знаки, и точка $M_1(0; L)$ является седлом [4]. Если же $aB < cL$, то точка $M_1(0; L)$ является устойчивым узлом. При $aB = cL$ возникает критический случай.

Аналогично для точки $M_2(0; K)$ с помощью замены переменных $x = u$, $y = v + K$ преобразуем систему (4) и получим матрицу $A_{(0;K)} = \begin{pmatrix} aB - cK & 0 \\ qK & Kp(L - K) \end{pmatrix}$ системы линейного приближения системы (4) в окрестности точки $M_2(0; K)$. При выполнении неравенства $aB > cL$ выполняется и неравенство $aB > cK$, следовательно, матрица $A_{(0;K)}$ имеет действительные положительные собственные значения, а точка $M_2(0; K)$ является неустойчивым узлом [4]. Если же $aB < cK$, то точка $M_2(0; K)$ является седлом. При $aB = cK$ возникает критический случай.

Рассмотрим точку $M_3(B; 0)$. С помощью замены переменных $x = u + B$, $y = v$ систему (4) преобразуем к виду

$$\begin{cases} \dot{u} = -aBu - cBv - au^2 - cuv, \\ \dot{v} = (qB - KLp)v + p(L + K)v^2 + quv - pv^3. \end{cases} \quad (6)$$

Матрица $A_{(B;0)} = \begin{pmatrix} -aB & -cB \\ 0 & qB - KLp \end{pmatrix}$ системы линейного приближения, соответствующей системе (6) в точке $M_3(B; 0)$, имеет действительные собственные значения $\lambda_1 = -aB$ и $\lambda_2 = qB - KLp$. В зависимости от знака $\lambda_2 = qB - KLp$ состояние равновесия $M_3(B; 0)$ может быть седлом (при $\lambda_2 = qB - KLp > 0$) или устойчивым узлом (при $\lambda_2 = qB - KLp < 0$).

Рассмотрим точку $M_4(B - \frac{c}{a}y_1; y_1)$. С помощью замены переменных $x = u + B - \frac{c}{a}y_1$, $y = v + y_1$ преобразуем систему (4) и выделим матрицу системы линейного приближения

$$A_{(B - \frac{c}{a}y_1; y_1)} = \begin{pmatrix} 2cy_1 - aB & \frac{c^2}{a}y_1 - cB \\ qy_1 & qB + KLp - 3py_1^2 + \left(2p(L + K) - \frac{qc}{a}\right)y_1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Аналогично в окрестности точки $M_5(B - \frac{c}{a}y_2; y_2)$ выделим матрицу системы линейного приближения

$$A_{(B - \frac{c}{a}y_2; y_2)} = \begin{pmatrix} 2cy_2 - aB & \frac{c^2}{a}y_2 - cB \\ qy_2 & qB + KLp - 3py_2^2 + \left(2p(L + K) - \frac{qc}{a}\right)y_2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Собственные значения матриц (7) и (8) могут быть как действительными (одного или разных знаков), так и комплексно-сопряжёнными. Целесообразно в системе (1) искать коэффициентные условия так, чтобы одно из состояний равновесия M_4 или M_5 было устойчивым (узлом или фокусом).

Рассмотрим численные примеры исследования системы (1) в пакете компьютерной математики MAPLE.

Пример 1. Пусть система (1) имеет вид

$$\begin{cases} \dot{x} = 0,7x(100 - x) - 0,4xy, \\ \dot{y} = 0,2y(y - 20)(150 - y) + 0,6xy. \end{cases} \quad (9)$$

С помощью вычислений в пакете MAPLE получим, что система (9) имеет следующие состояния равновесия: $O(0; 0)$ – седло, $M_1(0; 150)$ – седло (так как $aB > cL$), $M_2(0; 20)$ – неустойчивый узел, $M_3(100; 0)$ – устойчивый узел (собственные значения матрицы системы линейного приближения в окрестности точки M_3 равны $\lambda_1 = -70$ и $\lambda_2 = -540$), $M_4(14,10; 150,32)$ – седло (собственные значения матрицы системы линейного приближения в окрестности точки M_4 равны $\lambda_1 = 50,08$ и $\lambda_2 = -2727,77$), $M_5(89,74; 17,96)$ – седло (собственные значения матрицы системы линейного приближения в окрестности точки M_5 равны $\lambda_1 = -55,41$ и $\lambda_2 = 1681,41$). Фазовый портрет системы (9) и некоторые фазовые траектории представлены на рис. 1. Следует отметить, что система (9) соответствует ситуации, когда популяция хищников вымирает, а популяция жертв стремится к максимально допустимому значению $B = 100$.

Пример 2. Пусть система (1) имеет вид

$$\begin{cases} \dot{x} = 0,35x(200 - x) - 0,2xy, \\ \dot{y} = 0,1y(y - 40)(150 - y) + 0,3xy. \end{cases} \quad (10)$$

С помощью вычислений в пакете MAPLE получим, что система (9) имеет следующие состояния равновесия: $O(0; 0)$ – седло, $M_1(0; 150)$ – седло (так как $aB > cL$), $M_2(0; 40)$ – неустойчивый узел, $M_3(200; 0)$ – устойчивый узел (собственные значения матрицы системы линейного приближения в окрестности точки M_3 равны $\lambda_1 = -70$ и $\lambda_2 = -540$), $M_4(112,58; 1503,00)$ – устойчивый узел (собственные значения матрицы системы линейного приближения в окрестности точки M_4 равны $\lambda_1 = -10,64$ и $\lambda_2 = -572,50$), $M_5(179,83; 35,30)$ – седло (собственные значения матрицы системы линейного приближения в окрестности точки M_5 равны $\lambda_1 = -55,65$ и $\lambda_2 = 1621,24$). Фазовый портрет системы (10) и некоторые фазовые траектории представлены на рис. 2. Следует отметить, что поведение траекторий системы (10) зависит от начальных условий (начальных численностей популяций хищников и жертв). В первом случае популяция хищников вымирает, а популяция жертв стремится к максимально допустимому значению $B = 200$, Во втором случае численности популяций стремятся к точке $M_4(112,58; 1503,00)$.

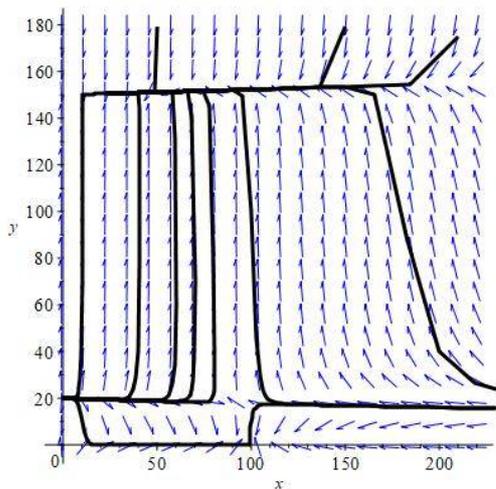


Рис. 1. Фазовый портрет и некоторые фазовые траектории системы (9)

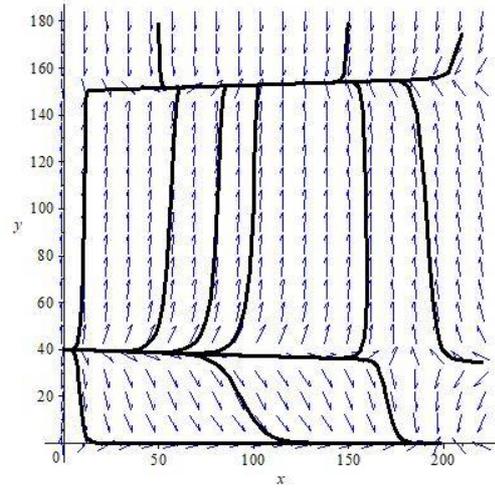


Рис. 2. Фазовый портрет и некоторые фазовые траектории системы (10)

Библиографический список

1. Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.
2. Терёхин М.Т. Устойчивость и предельные циклы в системе типа «хищник-жертва» при наличии внутривидовой конкуренции и заповедника // Известия РАЕН. Дифференциальные уравнения. 1999. № 2. С. 78 – 89.
3. Лискина Е.Ю. Применение Maple и Anylogic к исследованию нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Перспективы и возможности использования информационных технологий в науке, образовании, управлении: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Астрахань: Издатель Сорокин Роман Васильевич. С. 26–30.
4. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. М. : Наука, 1991. 486 с.

УДК 330.4; ГРНТИ 06.35.51

ФАЗОВЫЕ ТРАЕКТОРИИ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ А.В. ПОДЛАЗОВА

А.С. Прохорцева

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, e.liskina@365.rsu.edu.ru*

Аннотация. В работе выполнено исследование двух динамических демографических моделей А.В. Подлазова: модели гиперболического роста населения и модели демографического перехода. Построены фазовые траектории траектории решений обеих моделей.

Ключевые слова: динамическая система, состояние равновесия, устойчивость, фазовая траектория, решение задачи Коши, демографический переход.

PHASE TRAJECTORIES OF A.V. PODLAZOV'S DEMOGRAPHIC MODELS

A.S. Prokhortseva

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,
Russia, Ryazan, e.liskina@365.rsu.edu.ru*

The summary. We study two dynamic demographic models of A.V. Podlazov: models of hyperbolic population growth and models of demographic transition. The phase trajectories of the solution trajectories of both models are constructed.

Keywords: dynamic system, equilibrium state, stability, phase trajectory, solution of the Cauchy problem, demographic transition.

Обзор исследований демографических процессов в работах [1, 2] показал, что в масштабах столетий численность населения Земли испытывает периодические колебания (исследование для России есть, например, в [3]), а в масштабах тысячелетий – растёт по гиперболическому закону [1]. Модели гиперболического роста населения Земли были предложены С.П. Капицей [1], Х. фон Форстером, А.В. Подлазовым и М. Кремером [4], причём в моделях двух последних исследователей гиперболический рост численности населения связан с развитием технологий. В последней четверти XX века возникло новое явление – демографический переход – снижение численности населения при сохранении темпов развития технологий. Поэтому представляет интерес исследование и построение траекторий моделей как гиперболического роста, так и демографического перехода с целью выявления управляющих параметров этих моделей.

Рассмотрим модель гиперболического роста народонаселения А.В. Подлазова. Пусть N – численность населения, P – уровень жизнеспасающих технологий, то есть технологий, предотвращающих смерть и продляющих жизнь. Тогда уравнение роста населения можно записать в виде

$$\dot{N} = (b - d(P))N,$$

где $b = \text{const}$ – коэффициент рождаемости на начало фазы роста, а $d(P) = d - P$, где $d = \text{const}$ – коэффициент смертности на начало фазы роста.

С учетом этого перепишем уравнение роста населения

$$\dot{N} = (b - d)N + NP.$$

Обозначим $r = b - d$ – темп роста населения на начала фазы роста. В свою очередь уровень жизнеспасающих технологий определяется уравнением $\dot{P} = NP$.

При этом предполагается, что численность населения следует за емкостью технологической ниши, то есть $N = cP$. Объединяя уравнения для N и P и условие $N = cP$, получим модель гиперболического роста населения по А.В. Подлазову

$$\begin{cases} \dot{N} = rN + NP, \\ \dot{P} = NP, \\ N = cP. \end{cases} \quad (1)$$

По мнению А.В. Подлазова причина демографического перехода состоит в том, что нельзя до бесконечности понижать уровень смертности, тогда стадия демографического перехода описывается дифференциальным уравнением $\dot{P} = N(P_\infty - P)$, где $P_\infty = \text{const}$ – максимально возможный уровень жизнеспасающих технологий. Тогда система (1) в условиях демографического перехода примет вид

$$\begin{cases} \dot{N} = rN + NP, \\ \dot{P} = N(P_\infty - P), \\ N = cP. \end{cases} \quad (2)$$

Исследуем поведение решений и фазовых траекторий систем (1) и (2).

Рассмотрим систему (1). С учетом условия $N = cP$ она примет вид:

$$\begin{cases} \dot{N} = rN + \frac{1}{c}N^2, \\ \dot{P} = cP^2. \end{cases} \quad (2')$$

Оба уравнения системы (1') являются дифференциальными уравнениями с разделяющимися переменными. После интегрирования и подстановки в общие решения начальных

условий $N(t_0) = N_0$ и $P(t_0) = P_0$, получим общий вид решения задачи Коши уравнений системы (1)

$$\begin{cases} N = \frac{rcN_0e^{r(t-t_0)}}{N_0 + rc - N_0e^{r(t-t_0)}}, \\ P = \frac{P_0}{1 - cP_0(t - t_0)}. \end{cases}$$

Состояния равновесия системы (1) определяется уравнением $\dot{N} = 0, \dot{P} = 0$ и имеют вид $O(0; 0), M(d - b, 0)$. Вторая точка существует только при $b - d < 0$.

Матрица системы линейного приближения, соответствующей системе (1), в окрестности точки $O(0; 0)$ имеет вид $A_0 = \begin{pmatrix} r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, ее собственные числа $\lambda_1 = r; \lambda_2 = 0$. Следовательно, точка $O(0; 0)$ является сложным состоянием равновесия с простым нулевым корнем. Так как нелинейные части в обоих уравнениях системы (1) одинаковы, то нельзя воспользоваться алгоритмом определения типа этого состояния равновесия из книги [5]. Однако, одинаковость нелинейных слагаемых позволяет найти явный вид фазовых траекторий.

Для определения вида фазовых траекторий системы (1) разделим первое уравнение на второе и получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$\frac{dN}{dP} = \frac{r}{P} + 1.$$

Решая для него задачу Коши $N(P_0) = N_0$, получим семейство фазовых траекторий

$$N = r \ln \left| \frac{P}{P_0} \right| + (P - P_0) + N_0. \quad (3)$$

Функция (3) является возрастающей монотонной функцией при всех значениях r и $P > 0$. Следовательно, состояние равновесия $O(0; 0)$ является неустойчивым. Так как $\lim_{P \rightarrow 0} N(P) = +\infty$ (вне зависимости от знака r), то состояние равновесия $O(0; 0)$ имеет седловой сектор в первой координатной четверти плоскости OPN .

При $r < 0$ ($b < d$) рассмотрим состояние равновесия $M(d - b; 0)$. Выполним параллельным переносом начала координат в точку M с помощью замены переменных $N = x; P = y + (d - b)$. После подстановки новых переменных в систему (1), получим систему:

$$\begin{cases} \dot{x} = xy, \\ \dot{y} = (d - b)x + xy. \end{cases} \quad (4)$$

Матрица системы линейного приближения, соответствующей системе (4), в окрестности точки M имеет вид $A_M = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & d - b \end{pmatrix}, d - b > 0$; её собственные значения $\lambda_1 = 0; \lambda_2 = d - b > 0$; следовательно, данное состояние равновесия является неустойчивым (доказывается аналогично точке $O(0; 0)$).

При $b = d$ состояние равновесия $O(0; 0)$ становится сложным состоянием равновесия с кратным нулевым собственным значением. Фазовые траектории принимают вид

$$N = N_0 + (P - P_0).$$

Рассмотрим систему (2). При учете условия $N = Pc$ получим систему

$$\begin{cases} \dot{N} = rN + \frac{1}{c}N^2, \\ \dot{P} = \frac{P}{c}(P_\infty - P). \end{cases} \quad (2')$$

Для задачи Коши $N(t_0) = N_0, P(t_0) = P_0$ получаем решение системы (2')

$$\begin{cases} N = \frac{rcN_0e^{r(t-t_0)}}{N_0 + rc - N_0e^{r(t-t_0)}}, \\ P = \frac{P_\infty P_0}{P_0 + (P_\infty - P_0)e^{-\frac{P_\infty}{c}(t-t_0)}}. \end{cases}$$

Состояния равновесия системы (2) определим из условия $\dot{N} = 0, \dot{P} = 0$, получим при всех r две точки $L(P_\infty; 0)$ и $M(-r; 0)$ при $(-r) > 0$.

Рассмотрим состояние равновесия $L(P_\infty; 0)$. С помощью замены переменных $x = N, y = P - P_\infty$ приведем систему (2) к виду

$$\begin{cases} \dot{x} = (r + P_\infty)x + xy, \\ \dot{y} = -xy, \end{cases} \quad (5)$$

матрица системы линейного приближения которой имеет вид $A_L = \begin{pmatrix} r + P_\infty & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, то есть состояние равновесия L также является сложным с простым нулевым собственным значением. Так как нелинейные части обоих уравнений (5) различаются только знаком, то нельзя применить алгоритм определения типа состояния равновесия из книги [5]. Поэтому найдем вид фазовых траекторий системы (2). Деля первое уравнение на второе и интегрируя, для задачи Коши $N(P_0) = P_0$ получим вид фазовых траекторий

$$N = N_0 + P_0 - P + (P_\infty + r) \ln \left(\frac{P_\infty - P_0}{P_\infty - P} \right).$$

Так как при $r \geq 0$

$$\lim_{P \rightarrow P_\infty + 0} N(P) = \lim_{P \rightarrow P_\infty + 0} \left(N_0 + P_0 - P + (P_\infty + r) \ln \left(\frac{P_\infty - P_0}{P_\infty - P} \right) \right) = +\infty,$$

то состояние равновесия $L(P_\infty; 0)$ является неустойчивым (имеет неустойчивый сектор).

Если $r < 0$ и $P_\infty > |r|$, то состояние равновесия L не меняет своего характера устойчивости. Если $r < 0$ и $P_\infty < |r|$, то $\lim_{P \rightarrow P_\infty + 0} N(P) = -\infty$, и система (2) теряет смысл.

Пусть $r < 0$. Рассмотрим состояние равновесия $M(-r; 0)$ ($-r > 0$). Исследуем поведение фазовых траекторий при $P \rightarrow (-r)$ или $P \rightarrow (d - b)$. Имеем

$$\begin{aligned} & \lim_{P \rightarrow P_\infty + 0} (N_0 + P_0 - P + (P_\infty + r) \ln \left(\frac{P_\infty - P_0}{P_\infty - P} \right)) = \\ & = N_0 + P_\infty - (d - b) + (P_\infty + d - b) \ln \left(\frac{P_\infty - P_0}{P_\infty - d + b} \right), \end{aligned}$$

который существует только при $P_\infty > (d - b)$. При $P_\infty < (d - b)$ задача теряет свой смысл.

Модели А.В. Подлазова позволили ввести единую шкалу измерения различных технологических нововведений. Однако, по мнению исследователей [4], использование этой

шкалы на данном этапе затруднено. Кроме того, предположения модели А.В. Подлазова имеют ряд существенных недостатков. Во-первых, сложно оценить влияние различных технологических факторов на смертность. Во-вторых, демографические данные показывают, что демографический переход связан не со снижением смертности, а со снижением рождаемости. И, в-третьих, у А.В. Подлазова не объяснён переход от режима роста населения к режиму демографического перехода.

Пример 1. Рассмотрим систему (1) при модельных данных $N_0 = 3$ млрд. чел., $P_0 = 0,0001$, $t_0 = 1960$ г., $r = 0,022$. При этом значения (t_0, N_0) соответствуют данным мировой статистики [6]. Фазовая траектория и траектория решения системы (1) представлены на рисунках 1 и 2.

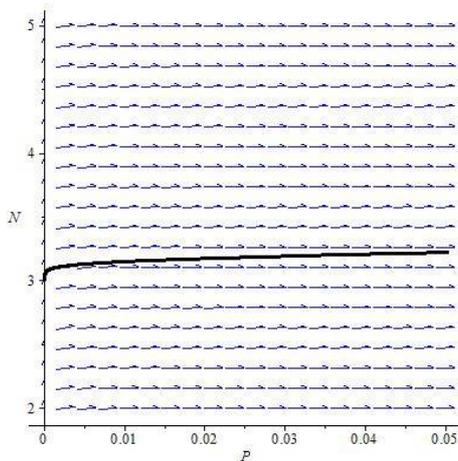


Рис. 1. Фазовый портрет и фазовая траектория решения системы (1)

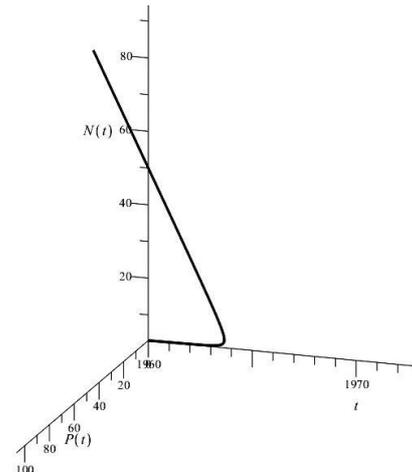


Рис. 2. Траектория решения системы (1)

Пример 2. Рассмотрим систему (2) при модельных данных $N_0 = 5$ млрд. чел., $P_0 = 0,0001$, $t_0 = 1987$ г., $r = 0,001$. При этом значения (t_0, N_0) также соответствуют данным мировой статистики [6]. При этом в [4] дана оценка для $P_\infty = 0,05$. Фазовая траектория и траектория решения системы (2) представлены на рисунках 3 и 4.

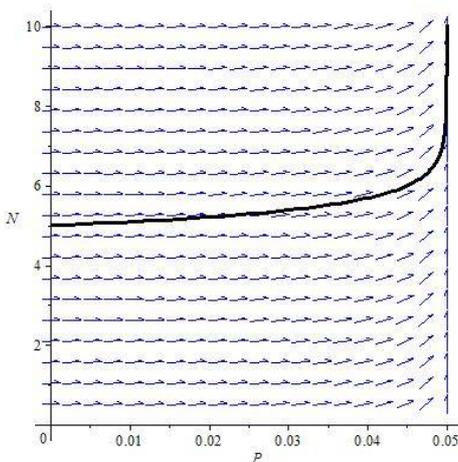


Рис. 3. Фазовый портрет и фазовая траектория решения системы (2)

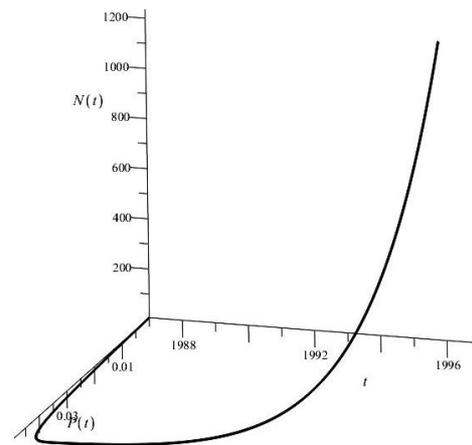


Рис. 4. Траектория решения системы (2)

Библиографический список

1. Капица С.П. Модель роста населения земли и предвидимое будущее цивилизации // Мир России. Социология. Этнология. 2002. №3. С. 22–43.
2. Романовский М.Ю., Романовский Ю.М. Введение в эконофизику. Статистические и динамические модели. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. 280 с.
3. Лискина Е.Ю. Математическая модель демографических волн на примере населения Российской Федерации // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020: сб. тр. Шмеждународ. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2020; Рязань. С. 42–47.
4. Коротаяев А.В., Малков А.С., Халтурина Д.А. Математическая модель роста населения Земли, экономики, технологии и образования // Препринты ИПМ им.М.В. Келдыша. 2005. Вып. 013. 39 с. https://www.keldysh.ru/papers/2005/prep13/prep2005_13.html
5. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. – М. : Наука, 1991. 486 с.
6. Население Земли – онлайн счетчик населения мира: электронный ресурс. URL:<https://rosinfostat.ru/naselenie-zemli/#i-3>.

УДК 330.4; ГРНТИ 06.35.51

ИССЛЕДОВАНИЕ СКРЫТЫХ ВРЕМЕННЫХ ЭФФЕКТОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОСТОЯНИЕ УРОВНЕЙ РАБОЧЕЙ СИЛЫ РЕГИОНОВ РОССИИ

Е.И. Давыдова

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, l.davydowa@yandex.ru*

Аннотация. В статье исследуется влияние скрытых временных эффектов на состояние уровней рабочей силы регионов Российской Федерации. В ходе исследования оценивалось уравнение множественной линейной регрессии, статистически незначимые факторы были исключены из уравнения. По результатам исследования выбрана наилучшая модель и проведена оценка скрытых временных эффектов.

Ключевые слова: скрытые временные эффекты, уровни рабочей силы, панельные данные.

STUDY OF HIDDEN TIME EFFECTS AFFECTING ON THE STATE OF LABOR LEVELS IN THE REGIONS OF RUSSIA

E. I. Davydova

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,
Russia, Ryazan, l.davydowa@yandex.ru*

The summary. We consider the influence of latent time effects on the state of labor force levels in the regions of the Russian Federation. The study evaluated the multiple linear regression equation, statistically insignificant factors were excluded from the equation. Based on the results of the study, the best model was chosen and the latent temporal effects were assessed.

Keywords: latent time effects, labor force levels, panel data.

Одной из характеристик трудового потенциала страны является количество и качество рабочей силы. В условиях демографического кризиса и миграционных процессов актуальна проблема определения условий трудовой привлекательности регионов и выявления экономических факторов, повышающих её. В данном исследовании показателем трудовой привлекательности региона для коренных жителей Y является доля рабочей силы на душу населения (отношение численности экономически активного населения к среднегодовой численности населения в данном регионе). В предыдущих работах [1, 2] был выявлен ряд факторов, влияющих на долю рабочей силы регионов Российской Федерации, затем по методологии [3] была построена модель панельных данных, выявляющая скрытые индивидуальные системные эффекты регионов. Задача настоящего исследования – в построенной в

[1, 2] лаговой модели выявить скрытые временные эффекты, влияющие на состояние рабочей силы регионов России.

Объекты исследования – регионы РФ (кроме Республики Крым и г. Севастополя, так как данные по этим субъектам есть только с 2014 г.). Период исследования для экзогенных факторов с 2006 по 2017 год, для объяснённой переменной – с 2007 по 2018 год. Источник данных – статистический сборник Росстата [4]. Для оценки коэффициентов и статистических характеристик модели использовался пакет Eviews, уровень значимости 0,05.

В работе [1] исследовалась панель, содержащая переменную Y и девятнадцать независимых факторов. Выяснилось, что на численность рабочей силы на душу населения Y оказывают влияние следующие факторы: X_1 (инвестиции в основной капитал на душу населения), X_3 (фондовооруженность), X_4 (стоимость основных фондов на душу населения), X_5 (число свободных рабочих мест на душу населения), X_6 (число зарегистрированных организаций и предприятий на душу населения), X_8 (густота автомобильных дорог общего пользования с твёрдым покрытием), X_{10} (мощность врачебных амбулаторно-поликлинических учреждений), X_{12} (численность населения на одного врача), X_{14} (численность студентов высших учебных заведений на душу населения), X_{15} (число образовательных организаций высшего образования и научных организаций на душу населения), X_{16} (выпуск учащихся государственными и муниципальными дневными общеобразовательными учреждениями на душу населения), X_{17} (общая площадь жилых помещений, приходящаяся в среднем на одного жителя).

В данном исследовании будем сравнивать уравнение лаговой модели сквозной регрессии, построенное на панели данных после исключения статистически незначимых факторов, с уравнением лаговой модели, построенным на панели данных после исключения статистически незначимых факторов, с индивидуальным эффектом каждого наблюдаемого года (временным эффектом).

Лаговое уравнение сквозной регрессии имеет вид

$$Y_{i(t+1)} = a_0 + \sum_{j \in \{1;3;4;5;6;8;10;12;14;15;16;17\}} a_{i,j} X_{i(t),j} + \varepsilon_{i(t)}, t = \overline{2006; 2017}. \quad (1)$$

После идентификации параметров уравнения (1) получаем

$$Y = 7,65 \cdot 10^{-8} X_1 - 6,61 \cdot 10^{-8} X_3 + 1,17 \cdot 10^{-7} X_4 + 0,9 X_5 + 0,96 X_6 - \\ - 1,1 \cdot 10^{-5} X_8 + 0,04 X_{10} - 13,17 \cdot 10^{-5} X_{12} + 0,34 X_{14} - \\ - 2075,25 X_{15} - 2,72 X_{16} + 319,41 \cdot 10^{-5} X_{17} + 0,46 + e. \quad (1')$$

Лаговое уравнение сквозной регрессии с индивидуальным эффектом $s_{(t)}$ каждого наблюдаемого года имеет вид

$$Y_{i(t+1)} = a_0 + \sum_{j \in \{1;3;4;5;6;8;10;12;14;15;16;17\}} a_{i,j} X_{i(t),j} + s_{(t)} + \varepsilon_{i(t)}, t = \overline{2006; 2017}. \quad (2)$$

После идентификации параметров уравнения (2) получаем

$$Y = 6,89 \cdot 10^{-8} X_1 - 4,8 \cdot 10^{-8} X_3 + 8,85 \cdot 10^{-8} X_4 + 1,16 X_5 + \\ + 0,95 X_6 - 9,51 \cdot 10^{-7} X_8 + 0,02 X_{10} - 15,06 \cdot 10^{-5} X_{12} + 0,22 X_{14} - \\ - 2425,33 X_{15} + 1,4 X_{16} + 419,28 \cdot 10^{-5} X_{17} + 0,43 + e. \quad (2')$$

Заметим, что $\bar{s} = 0,43$ – среднее значение индивидуальных эффектов каждого года наблюдаемого периода на промежутке времени $t = \overline{2006; 2017}$.

Статистические характеристики уравнений (1') и (2') приведены в таблице 1, из которой следует, что

- 1) линейная зависимость между зависимой переменной и регрессорами является умеренной для обоих уравнений,
- 2) оба уравнения значимы в целом,
- 3) в уравнении (1') все коэффициенты являются статистически значимыми,
- 4) в уравнении (2') статистически незначимыми являются переменные X_8 и X_{16} ,
- 5) для обоих уравнений статистика Дарбина– Уотсона показывает наличие автокорреляции в остатках,
- 6) для обоих уравнений значение статистики Жарке –Бера показывает, что гипотеза о нормальном распределении остатков уравнений регрессии принимается на выбранном уровне значимости,
- 7) по значениям информационных критериев Акайке и Ханнана – Куинна следует отдать предпочтение модели с индивидуальными фиксированными эффектами каждого года наблюдаемого периода.

Таблица 1. Основные статистические характеристики регрессионных моделей (1') и (2')

Характеристика	Модель	
	Модель сквозной регрессии	Модель с временным эффектом
R^2	0,52	0,55
Остаточная сумма квадратов (RSS)	0,76	0,71
F -статистика	85,39	49,90
Вероятность F -статистики	$4,29 \cdot 10^{-141}$	$1,83 \cdot 10^{-141}$
P_{X_1} –вероятность -статистики для переменной X_1	$7,4 \cdot 10^{-3}$	0,02
P_{X_3} –вероятность -статистики для переменной X_3	$1,3 \cdot 10^{-34}$	$5,26 \cdot 10^{-16}$
P_{X_4} –вероятность -статистики для переменной X_4	$1,1 \cdot 10^{-30}$	$2,79 \cdot 10^{-16}$
P_{X_5} –вероятность -статистики для переменной X_5	$5,92 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-8}$
P_{X_6} –вероятность -статистики для переменной X_6	$1,49 \cdot 10^{-19}$	$6,21 \cdot 10^{-20}$
P_{X_8} –вероятность -статистики для переменной X_8	0,0016	0,8
$P_{X_{10}}$ –вероятность -статистики для переменной X_{10}	$5,23 \cdot 10^{-6}$	0,04
$P_{X_{12}}$ –вероятность -статистики для переменной X_{12}	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
$P_{X_{14}}$ –вероятность -статистики для переменной X_{14}	$3,13 \cdot 10^{-9}$	$12,73 \cdot 10^{-5}$
$P_{X_{15}}$ –вероятность -статистики для переменной X_{15}	$2,07 \cdot 10^{-5}$	$4,44 \cdot 10^{-7}$
$P_{X_{16}}$ –вероятность -статистики для переменной X_{16}	$1,78 \cdot 10^{-5}$	0,09
$P_{X_{17}}$ –вероятность -статистики для переменной X_{17}	$9,94 \cdot 10^{-24}$	$5,68 \cdot 10^{-32}$
Статистика Дарбина – Уотсона	0,55	0,51
Статистика Жарке – Бера	6028,56	6216,99
Информационный критерий Акайке	-4,26	-4,31
Информационный критерий Шварца	-4,20	-4,18
Информационный критерий Ханнана – Куинна	-4,24	-4,26

Выбор наилучшего уравнения из (1') и (2') осуществлялся с помощью критерия Вальда. Нулевая гипотеза: модель сквозной регрессии предпочтительнее модели с индивидуальными эффектами каждого года наблюдаемого периода. Конкурирующая гипотеза: модель с индивидуальными эффектами каждого года наблюдаемого периода предпочтительнее модели сквозной регрессии. Результат проверки гипотезы содержится в таблице 2, из которой

следует, что уровне значимости 0,05 предпочтительна модель с индивидуальными фиксированными эффектами каждого года наблюдаемого периода.

Таблица 2. Наблюдаемые и критические значения тестов о выборе наилучшей модели

Тест	Значение		Вывод
	Наблюдаемое	Критическое	
F-тест Вальда	5,86	3,01	отклонена

В Таблице 3 содержатся значения отклонений от среднего временного эффекта и абсолютные значения. График динамики отклонения индивидуального эффекта каждого года наблюдаемого периода от среднего представлен на рисунке 1, а график динамики индивидуальных эффектов – на рисунке 2.

Полученные результаты показывают, что индивидуальные скрытые эффекты в каждом году наблюдаемого периода были положительными. При этом с 2012 года отклонение индивидуальных эффектов каждого года наблюдаемого периода $s_{(t)}$ от среднего эффекта \bar{s} стало отрицательным, то есть влияние некоторого скрытого системного фактора на численность рабочей силы на душу населения с течением времени снижалось. Следует отметить, что величина скрытого индивидуального эффекта однократно увеличилась в 2010 году, а затем демонстрировало устойчивую нисходящую тенденцию.

Таблица 3. Индивидуальные эффекты каждого года наблюдаемого периода

Дата	Отклонения от среднего эффекта \bar{s}	Значение абсолютного индивидуального эффекта $s_{(t)}$
01.01.2006	0,0159	0,4459
01.01.2007	0,0157	0,4457
01.01.2008	0,0111	0,4411
01.01.2009	0,0066	0,4366
01.01.2010	0,0076	0,4376
01.01.2011	$6,4355 \cdot 10^{-5}$	0,43
01.01.2012	-0,0024	0,4276
01.01.2013	-0,0052	0,4248
01.01.2014	-0,0082	0,4218
01.01.2015	-0,0095	0,4205
01.01.2016	-0,0149	0,4151
01.01.2017	-0,0169	0,4131

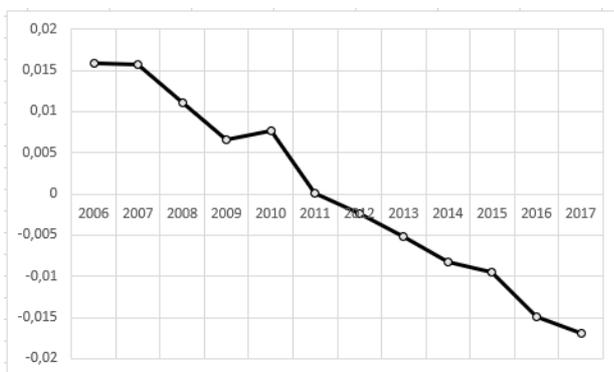


Рис. 1. График динамики отклонения индивидуальных эффектов каждого года наблюдаемого периода от среднего значения \bar{s}

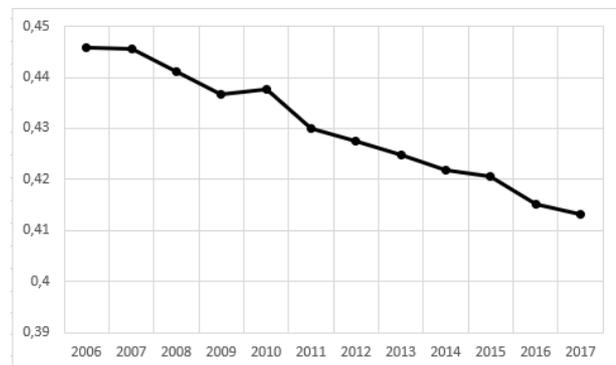


Рис. 2. График динамики индивидуальных эффектов каждого года наблюдаемого периода $s_{(t)}$

Библиографический список

1. Отбор факторов, влияющих на долю рабочей силы в общей численности населения на основе регрессионного метода исключения // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXV Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов; Рязань: ИП Коняхин А.В. (BookJet), 2020. С. 47–49.
2. Давыдова Е.И., Лискина Е.Ю., Эконометрическое моделирование влияния экономических факторов на численность рабочей силы на душу населения // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками. 2020. № 5. С. 71–76. Режим доступа: <https://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2020/12/14/mkmesur2020.pdf> (дата обращения: 05.12.2021).
3. Вакуленко Е.С. Миграционные процессы в городах России: эконометрический анализ // Прикладная эконометрика. 2012. № 1 (25). С. 25–50.
4. Регионы России. Социально-экономические показатели: статистический сборник. 2006–2018 гг. [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. Режим доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138623506156 (дата обращения: 28.11.2020).

УДК 629.7.054.44; ГРНТИ 59.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИОННО-МЕТОЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВОЗДУШНОЙ СКОРОСТИ

А.Р. Гизамова, Ф.А. Ганеев

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
Российская Федерация, Казань, qwerty171198@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается построение модели канала преобразования ионно-меточного измерителя в среде LabView.

Ключевые слова: ионно-меточный измеритель, LabView, моделирование.

MODELING OF THE CONVERSION CHANNEL OF AN ION-TAGGED AIR SPEED METER

A.R. Gizamova, F.A. Ganeev

*Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev,
Russia, Kazan, qwerty171198@mail.ru*

The summary. The paper considers the construction of a model of the conversion channel of an ion-mark meter in the LabView environment.

Keywords: ion-tag meter, LabView, simulation.

В данной работе описывается разработка модели канала преобразования, входящего в блок обработки сигналов ионно-меточного датчика. В блок подается оцифрованный сигнал, который интегрируется, находится точка максимума, и вычисляется время прохождения метки. Временной интервал, начало которого соответствует моменту генерации ионной метки, а окончание моменту пересечения границы базового расстояния L . По длительности временного интервала τ в блоке обработки сигнала БОС вычисляется скорость воздушного потока $V = L / \tau$ [1].

Для отработки и тестирования канала преобразования ионно-меточного измерителя скорости воздушного потока было использовано компьютерное моделирование частей схемы и алгоритма обработки сигнала в программных пакетах поставляемых National Instruments. Для отработки канала преобразования было использовано программное обеспечение LabView, для моделирования частей схемы Multisim. Для имитации сигнала при отработке канала преобразования было использовано аппаратное обеспечение NIELVISmxII.

Погрешности ионно-меточного измерителя скорости воздушного потока в основном появляются в процессе регистрации метки. Для корректировки параметров блока обработки

сигнала, а также тестирования на помехоустойчивость целесообразно использовать современные возможности для моделирования и имитации процессов. Программный комплекс LabView в купе с аппаратным комплексом NIELVISmxII позволяют модулировать и имитировать практически любой сложности. Для этого была составлена блок схема моделирования сигнала, которая приведена на рисунке 1.

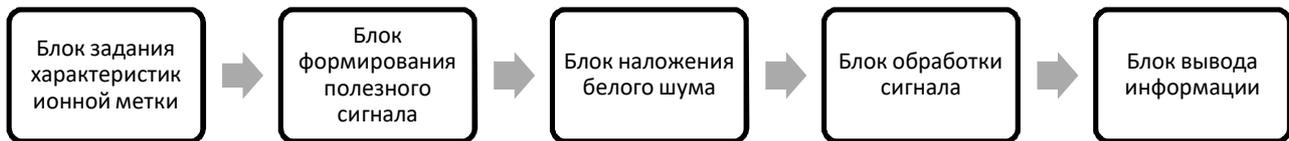


Рис. 1. Блок схема модели канала преобразования ионно-меточного измерителя скорости воздушного потока

Для проведения компьютерного эксперимента построим каждый блок в среде LabView.

1. Блок задания характеристик ионной метки

Данный блок необходим для задания скорости воздушного потока, амплитуды полезного сигнала и амплитуды белого шума. Реализация в среде LabView представлена на рисунке 2 (а).

2. Блок формирования полезного сигнала

Данный блок необходим для выдачи полезного сигнала с заданными параметрами. Реализация в среде LabView представлена на рисунке 2 (б).

Блок выдачи полезного сигнала реализован на элементе «Formula». Функция полезного сигнала представляет из себя следующую функцию:

$$A \cdot (2 \cdot k \cdot V \cdot (t \cdot V - L)) \cdot e^{k \cdot (t \cdot V - L)^2},$$

где A – постоянная, коэффициент усиления усилителя;

k – постоянная, зависит от параметров приемного электрода;

V – скорость метки;

L – базовое расстояние.

Для моделирования и имитации сигнала для цифровой обработки необходимо задавать сигнал дискретно, массивом данных, для реализации этого был применен цикл «Forloop», где 10000 – количество циклов (количество выборок для одного измерения), 0.01 – время дискретизации в миллисекундах.

3. Блок наложения белого шума

Данный блок необходим для наложения на сигнал, выданный с блока формирования полезного сигнала, белого шума. Блок необходим для приближения модели сигнала к реальному. Реализация в среде LabView представлена на рис. 2 (в). Блок реализован одним элементом «Gaussianwhitenoise». Количество элементов в массиве совпадает с количеством циклов.

4. Блок обработки сигнала

Данный блок реализует алгоритм обработки сигнала, максимально приближенный к оригиналу (в дискретном виде, с применением функций, доступных на микроконтроллере). Блок обработки содержит интегратор, функция которого имеет вид:

$$y_j = y_{i-1} + x_i$$

После интегрирования происходит определение точки максимума. Для этого применяется элемент «Arraymax&min».

Время пролета метки равно номеру элемента массива, приходящимся на максимум умноженный на время дискретизации. Скорость равна отношению базового расстояния и времени пролета метки.

Реализация в среде LabView представлена на рисунке 2 (г).

5. Блок вывода информации

Блок вывода информации служит для вывода на монитор компьютера графика полезного сигнала, сигнала с наложенным белым шумом, временного интервала и вычисленной скорости. Для уменьшения погрешности каждое значение скорости находится как среднее из 10 измерений.

Реализация в среде LabView представлена на рисунке 2 (д).

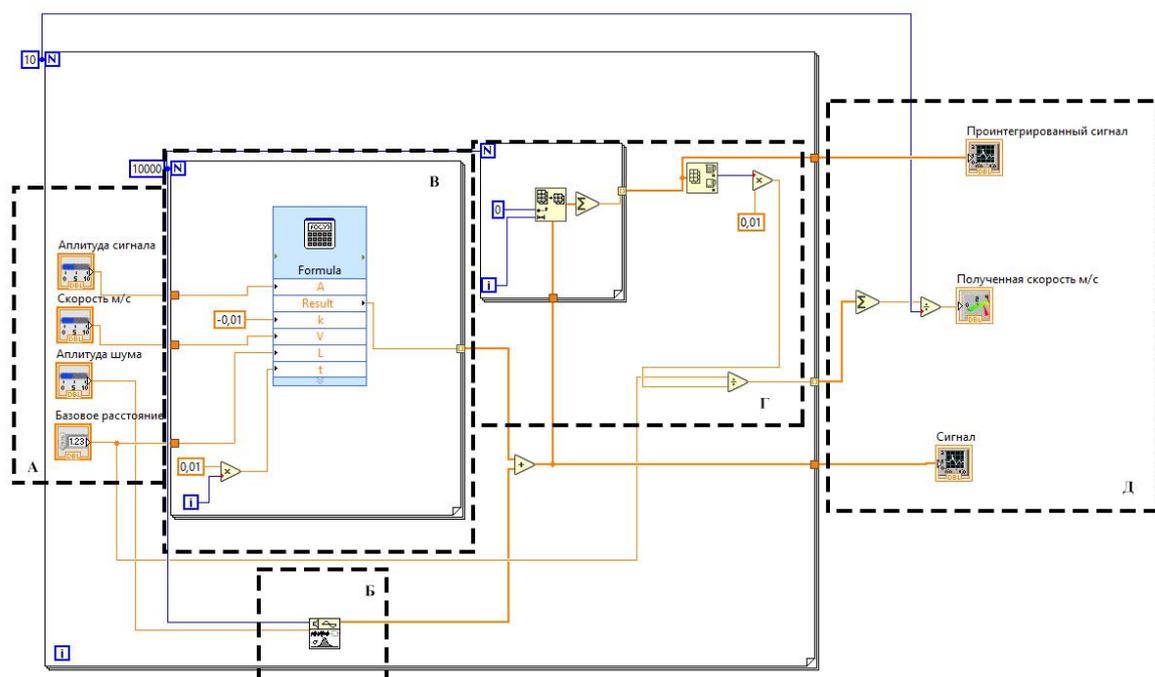


Рис. 2. Реализация модели канала преобразования в среде LabView

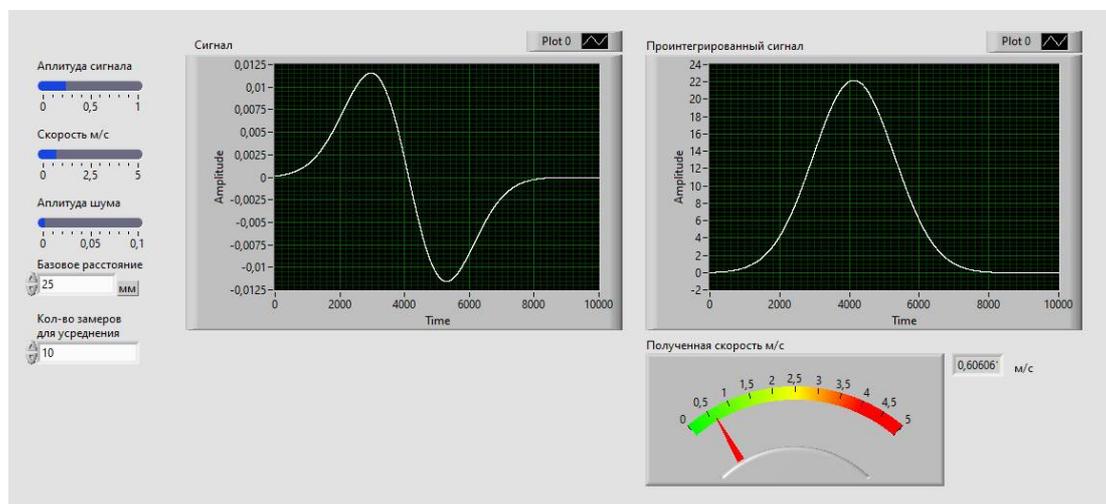


Рис. 3. Внешний вид реализации модели канала преобразования в среде LabView

С помощью данной панели можно настроить скорость пролета метки, амплитуду сигнала, амплитуду шума [2]. А также наблюдать за моделированным сигналом и проинтегрированным сигналом, наблюдать скорость, полученную путем обработки сигнала.

Таким образом, после проведения нескольких экспериментов следует отметить, что метод обработки отлично справляется при значении амплитуды шума превышающим амплитуду полезного сигнала, значение погрешности во всех экспериментах не превышает 1%. А также удалось подобрать оптимальные параметры для дальнейшей разработки измерителя.

Библиографический список

1. Патент на полезную модель РФ №194370 09.12.2019 «Измеритель скорости воздушного потока для систем вентиляции» / Авт. Ганеев Ф. А., Миннебаев М. Р., Резунов И. А. Оpubл. в бюл. №34, 2019.
2. Ганеев Ф.А., Солдаткин В.М. Всенаправленный ионно-меточный измеритель параметров вектора воздушной скорости // Тезисы докладов конференции КГТУ им. Туполева. - Казань, 1994.- С. 112.

УДК 536.24.08; ГРНТИ 28.17.23

УСТОЙЧИВЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

О.С. Дмитриев, А.А. Живенкова, А.А. Барсуков

*Тамбовский государственный технический университет,
Россия, Тамбов, phys@tstu.ru*

Аннотация. В статье рассмотрено построение устойчивого к возмущению входных данных алгоритма для определения теплофизических характеристик на основе фильтра Калмана. Приведена математическая модель проведения экспериментального исследования, представлена постановка задачи фильтрации для построения оптимальных оценок определяемых характеристик, а также показана блок-схема алгоритма расчета теплофизических характеристик, являющейся частью прикладного ПО ИИС исследования свойств полимерных композитов.

Ключевые слова: математическая модель, оптимальные оценки, фильтр Калмана, теплофизические характеристики.

SUSTAINABLE ALGORITHM FOR DETERMINING THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS

O.S. Dmitriev, A.A. Zhyvenkova, A.A. Barsukov

*Tambov State Technical University,
Russia, Tambov, phys@tstu.ru*

Abstract. The article discusses the construction of an algorithm that is resistant to perturbation of the input data for determining the thermophysical characteristics based on the Kalman filter. A mathematical model for conducting an experimental study is presented, the formulation of the filtration problem for constructing optimal estimates of system variables based on the measurements and the constructed mathematical model of the heat transfer process is given. The algorithm block diagram for calculating the thermophysical characteristics is shown, which is part of the applied software of the data-measuring system to study the properties of polymer composites.

Keywords: mathematical model, optimal estimates, Kalman filter, thermophysical characteristics.

Исследование свойств материалов и определение их теплофизических характеристик (ТФХ) в настоящее время является важной задачей для науки и техники. Это связано с тем, что от этих характеристик существенно зависит интенсивность теплообмена химико-технологических процессов и они необходимы для расчета оптимальных технологических режимных параметров. Для определения теплофизических характеристик, как правило, используются косвенные методы, в которых экспериментально измеряется не искомая физическая величина, а величины связанные с ней некоторым математическим выражением, кото-

рые возможно измерить в эксперименте, например температура T , тепловой поток q и т.п. Поэтому актуальными являются исследования характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ), для которых проводятся расчеты оптимальных параметров режимов отверждения изделий [1]. В связи с этим необходима разработка соответствующих алгоритмов обработки экспериментальных данных и экспериментальных установок для их получения.

Методы и алгоритмы расчета ТФХ материалов в большинстве случаев реализации построены на решении обратной задачи теплопроводности (ОЗТ), которая является некорректно поставленной и не всегда позволяет получать приемлемые для практики решения [2, 3]. Кроме того при проведении эксперимента стремятся использовать специальные образцы и осуществлять краевые условия, позволяющие получать простые расчетные формулы. Поэтому процесс определения теплофизических характеристик необходимо построить так, чтобы поле температуры в образце соответствовало полю полубесконечной пластины, которое формируется путем нагрева плоского образца с одной стороны и с отсутствием теплообмена в другой стороны. Тогда в математической модели теплопереноса образца будут реализованы ГУ2, а исходными данными, получаемыми в результате работы экспериментального оборудования, будут значения температур T и тепловые потоки q_0, q_L на поверхностях образца. ТФХ полимерных композитов в большинстве случаев существенно зависят от температуры особенно в процессе отверждения. Поэтому нами будет рассмотрен случай, когда ТФХ зависят от температуры и эксперимент проведен в условиях значительного возмущения температурного поля.

С учетом указанных условий математическая модель теплопереноса в образце полимерного композита в процессе нагрева и отверждения представляется в виде дифференциального уравнения теплопроводности [4]:

$$\begin{aligned} C(T) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\ T &\equiv T(x, t), \quad 0 < x < L, \quad 0 < t \leq t_m, \\ T(x, 0) &= f_0(x), \quad 0 \leq x \leq L, \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= q_0(t), \quad 0 < t \leq t_m, \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} &= q_L(t), \quad 0 < t \leq t_m. \end{aligned} \quad (1)$$

где C – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К);

f_0 – начальное температурное распределение, К;

q_0, q_L – плотность тепловых потоков на поверхностях образца, Вт/м²;

L – толщина образца, м; – температура, К;

t – время, с; t_m – продолжительность эксперимента, с;

x – пространственная координата, м;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К).

В модели (1) нагрева образца из ПКМ искомыми величинами являются зависящие от температуры T ТФХ: теплоемкость $C(T)$ и теплопроводность $\lambda(T)$. Также очень часто в практических приложениях ТФХ считают константами C, λ , или зависящими от времени $C(t), \lambda(t)$. В таком случае модель становится линейной. Если процессы и превращения, протекающие в материале, проходят во времени t , то возможно использовать отнесенные к температуре $T(t)$ временные зависимости ТФХ $C(T(t))$ и $\lambda(T(t))$.

Данные, которые возможно измерить в эксперименте, являются тепловые потоки $q_0(t)$, $q_L(t)$ и температурное поле $T(x,t)$. При экспериментальном исследовании регистрируются дискретные значения температуры $T_{i,j} = T(x_i, t_j)$ и теплового потока $q_j = q(t_j)$, измеренные в моменты t_j по координатам x_i . Эти измерения проводятся в условиях эксперимента и содержат в себе погрешности систематические и случайные, величина которых может быть весьма значительной. Таким образом, необходима разработка метода и устойчивого к возмущению входных данных алгоритма расчета теплофизических характеристик.

Математическим аппаратом, с помощью которого можно оценивать искомые параметры математической модели теплопереноса на базе зашумленных экспериментальных измерений, является фильтр Калмана [5]. Задача поиска решения при подавлении возмущения входных данных при обобщенной постановке формулируется так: экспериментальные измерения представляют собой случайный процесс $\xi(t)$, который является определенной функцией измерения $s(t, \eta(t))$, а также случайного возмущения (погрешности) входных данных $np(t)$: $\xi(t) = \Phi(s(t, \eta(t)), np(t))$. Экспериментальное измерение $s(t, \eta(t))$ зависит от времени t и сообщения $\eta(t)$. Экспериментальные измерения проводятся во времени от 0 до t . Изначально известны некоторые данные об экспериментальных измерениях $\xi(t)$, имея которые можно получить информацию о $\eta(t)$ для моментов времени t . Таким образом, уравнение регистрации экспериментальных измерений примет вид:

$$\xi(t) = s(t, \eta(t)) + n_0(t), \quad (2)$$

где $n_0(t)$ – белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и односторонней спектральной плотностью N_0 .

Определение ТФХ будем проводить на основе математической модели по измеренному в дискретные моменты времени температурному полю путем построения фильтра Калмана. Тогда для задачи линейной фильтрации с учетом случайного характера возникающих при измерениях возмущений уравнения фильтра Калмана примут вид:

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_j &= \beta_{j-1} \hat{\eta}_{j-1} + \kappa_j (\xi_j - H_j \omega_{j-1} \hat{\eta}_{j-1}), \\ \frac{1}{\vartheta_j} &= \frac{1}{\omega_{j-1}^2 \vartheta_{j-1} + D_{\eta j}} + \frac{H_j^2}{D_{0j}}, \quad \kappa_j = \frac{H_j \vartheta_j}{D_{0j}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $H_j = H(t_j)$ и $\omega_j = \omega(t_j)$ – заданные функции времени;

$\hat{\eta}_j$ – условное математическое ожидание, являющееся оптимальной оценкой η_j ; D_{0j} и $D_{\eta j}$ – дисперсии белого гауссовского шума;

ϑ_{j-1} – апостериорная дисперсия;

j – номер итерации.

Аналитическое решение уравнения теплопроводности с ГУ2 при одностороннем нагреве полубесконечной пластины имеет вид [2]:

$$\begin{aligned} T(x,t) &= T_0(x) + \frac{q_L(x,t)}{\lambda(x,t)} \times \\ &\times \left\{ \frac{\lambda(x,t)t}{C(x,t)L} - \frac{L^2 - 3x^2}{6L} + L \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{2}{k^2 \pi^2} \cos\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 k^2 \lambda(x,t)t}{C(x,t)L^2}\right) \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Анализируя ряд (3), можно сделать вывод, что последнее слагаемое в нем имеет нулевое математическое ожидание. Тогда среднеинтегральное значение температуры по толщине \hat{T}_j в дискретные моменты j можно записать в следующем виде:

$$\hat{T}_j = T_0(x) + \frac{q_L t_j}{C_j L} - \frac{q_L(L^2 - 3x^2)}{6\lambda_j L}. \quad (5)$$

Используя линейный фильтр Калмана (3) и аналитическое выражение (5) решения дифференциального уравнения теплопроводности (1) с ГУ2 при одностороннем нагреве пластины толщиной L в квазистационарном режиме, получаем итерационную процедуру для расчета теплоемкости C_j и теплопроводности λ_j [6]:

$$C'_j = C'_{j-1} + \frac{q_{Lj} t_j \vartheta_j}{LD_j} \left(\bar{T}_j - \frac{q_{Lj} t_j}{L} C'_{j-1} \right),$$

$$\frac{1}{\vartheta_j} = \frac{1}{\vartheta_{j-1}} + \frac{q_{Lj}^2 t_j^2}{L^2 D_j}, \quad (6)$$

$$\bar{T}_j = T_j - T_0(x) + \frac{q_{Lj}(L^2 - 3x^2)}{6\lambda_j L},$$

$$C'_j = \frac{1}{C_j}.$$

$$\lambda'_j = \lambda'_{j-1} - \frac{q_{Lj}(L^2 - 3x^2)\vartheta_j}{6LD_j} \left(\bar{T}_j + \frac{q_{Lj}(L^2 - 3x^2)}{6L} \lambda'_{j-1} \right),$$

$$\frac{1}{\vartheta_j} = \frac{1}{\vartheta_{j-1}} + \frac{q_{Lj}^2(L^2 - 3x^2)^2}{36L^2 D_j}, \quad (7)$$

$$\bar{T}_j = T_j - T_0(x) - \frac{q_{Lj} t_j}{C_j L},$$

$$\lambda'_j = \frac{1}{\lambda_j}.$$

где T_j – экспериментальное температурное поле пластины;

\bar{T}_j – оценка температурного поля в дискретные моменты времени;

D_0 – дисперсия шума, которая определяется погрешностью измерительного прибора.

В результате получен рекурсивный фильтр, на основе которого построен алгоритм расчета теплофизических характеристик ПКМ. Блок-схема алгоритма на основе фильтра Калмана для расчета ТФХ представлена на рисунке 1.

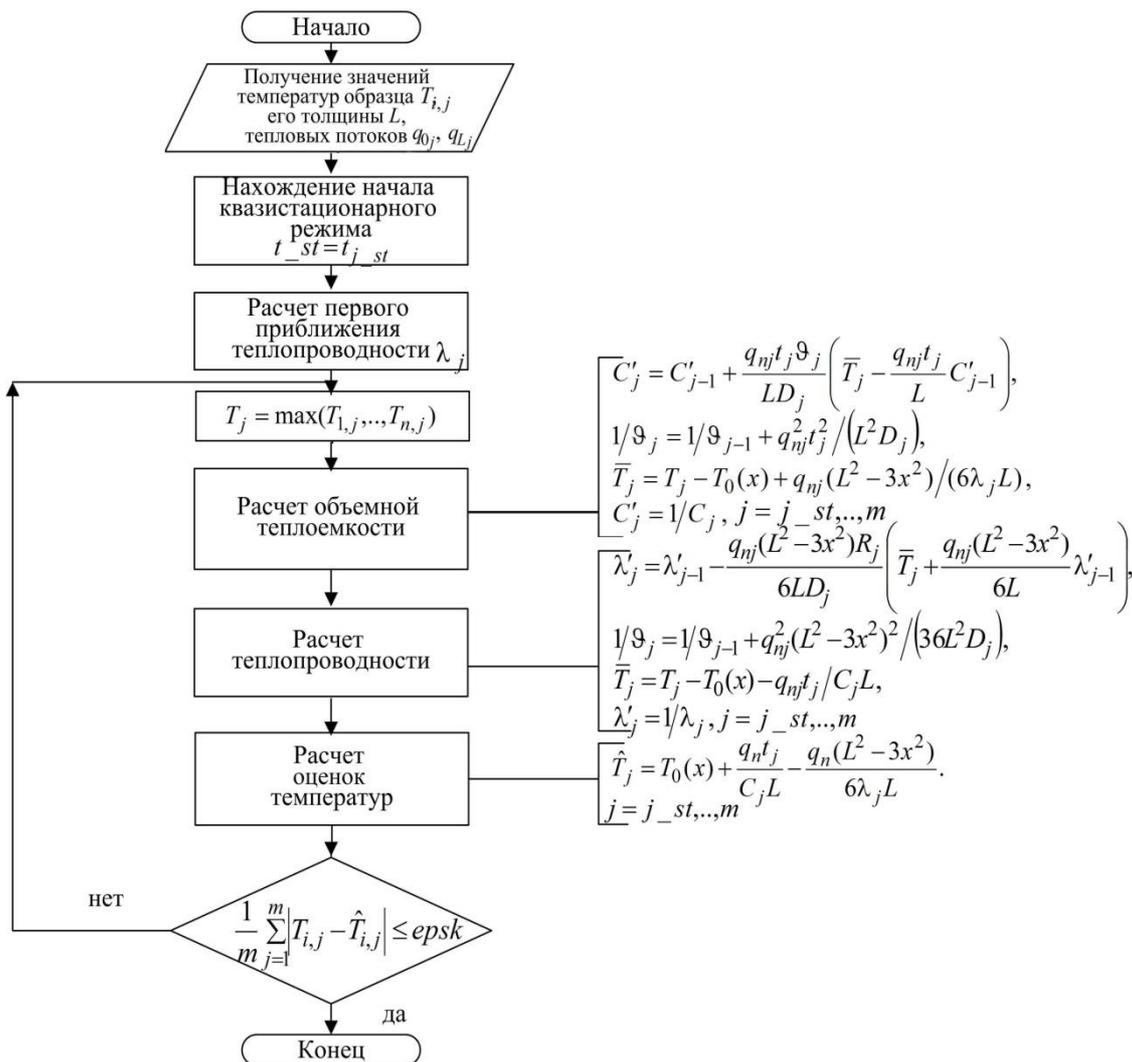


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета теплофизических характеристик

Таким образом, разработан устойчивый к значительным возмущениям входных экспериментальных данных алгоритм расчета теплофизических характеристик полимерных композитов, основанный на использовании фильтра Калмана. Устойчивость алгоритма исследована путем имитационного моделирования на модельных задачах. При имитационном моделировании задавались как постоянные, так и изменяющиеся от температуры ТФХ. Рассчитывалось температурное поле, на основе которого формировались исходные данные, на них накладывался шум с нулевым математическим ожиданием, и решалась обратная задача по определению ТФХ. Амплитуда шума накладываемого на моделируемую температуру задавали в пределах от 0,1 до 5%. В результате получили оценку устойчивости и работоспособности разработанного алгоритма. Сравнение погрешностей расчета ТФХ с линейной зависимостью от температуры приведено в таблице. При задании сложной зависимости ТФХ от температуры, как например теплоемкости при отверждении и большой амплитуды шума алгоритм показывал худшие результаты с погрешностью восстановления ТФХ до 20%.

Таблица. Сравнительная оценка погрешностей расчета ТФХ в зависимости от наложенного возмущения и количества термопар

Амплитуда наложенного шума, %	Относительная погрешность теплоемкости, %			Относительная погрешность теплопроводности, %		
	Количество термопар в образце					
	2	3	5	2	3	5
0,1	0,65	0,08	0,10	0,74	0,05	0,38
1	1,22	0,38	1,04	1,24	0,45	1,24
3	2,83	1,75	2,05	1,78	1,89	1,75
5	3,12	2,23	2,19	3,54	2,32	2,40

На основе разработанного алгоритма создана компьютерная программа, которая вошла в состав прикладного программного обеспечения информационно-измерительной системы исследования теплофизических характеристик ПКМ, и является частью интегрированной системы расчета оптимальных температурно-временных режимов отверждения изделий из полимерных композитов с единой базой данных [7].

Библиографический список

1. Dmitriev, O.S. Optimization of Curing Cycles Products of the Polymer Composite Materials on Base of Glutinous Prepregs / O.S. Dmitriev, S.V. Mischenko, S.O. Dmitriev, V.N. Kirillov // Polymer Science. Series D. – 2009. – V. 2, No. 4. – pp. 223–229.
2. Коздоба, Л.А. Методы решения обратных задач теплопереноса / Л.А. Коздоба, П.Г. Круковский. – Киев: Наук. думка, 1982. – 360 с.
3. Дмитриев, О.С. Численно-аналитическое решение нелинейной коэффициентной обратной задачи теплопроводности / О.С. Дмитриев, А.А. Живенкова // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91. № 6. – С. 1426-1437.
4. Дмитриев, О.С. Математическое моделирование процесса отверждения изделия из полимерных композиционных материалов методом горячего прессования / О.С. Дмитриев, С.В. Мищенко, С.В. Пономарев // Вестник ТГТУ. – 1998. – Т. 4. № 4. – С. 390-399.
5. Балакришнан, А.В. Теория фильтрации Калмана / А.В. Балакришнан. – М.: Мир, 1988. 168 с
6. Мищенко, С.В. Алгоритмы оптимальной фильтрации температурных измерений теплофизического эксперимента / С.В. Мищенко, Г.В. Романенко, О.С. Дмитриев // Вестник ТГТУ. – 1999. – Т. 5, № 4. – С. 489-496.
7. Дмитриев, О.С. Интегрированная информационно-измерительная система исследования свойств и расчета режимов отверждения полимерных композитов / О.С. Дмитриев, С.В. Мищенко, А.О. Дмитриев, И.С. Касатонов, С.О. Дмитриев // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14. № 2. – С. 230-240.

УДК 517.925; ГРНТИ 27.29.17

БИФУРКАЦИЯ АНДРОНОВА–ХОПФА В ОДНОЙ СИСТЕМЕ ВТОРОГО ПОРЯДКА

В.В. Абрамов

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, v.abramov@365.rsu.edu.ru

Аннотация. На плоскости рассматривается нормальная автономная система обыкновенных дифференциальных уравнений с малым параметром. Предполагается, что в правых частях уравнений выделены первые приближения в виде линейных и кубических форм от фазовых переменных. Решается проблема бифуркации асимптотически орбитально устойчивого цикла от нулевой особой точки. Условия существования цикла получены в результате исследования первого приближения оператора монодромии вспомогательной системы. Вывод об устойчивости получен на основе признака Пуанкаре.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, малый параметр, оператор монодромии, периодическое решение, предельный цикл, орбитальная устойчивость, бифуркация Андронова–Хопфа.

ANDRONOV-HOPF BIFURCATION IN ONE SECOND-ORDER SYSTEM

V.V. Abramov

Ryazan State University named after S.A. Esenin,
Russia, Ryazan, v.abramov@365.rsu.edu.ru

The summary. A normal autonomous system of ordinary differential equations with a small parameter is considered on the plane. It is assumed that the first approximations in the form of linear and cubic forms from the phase variables are distinguished in the right parts of the equations. The problem of bifurcation of an asymptotically orbitally stable cycle from a zero singular point is solved. The conditions for the existence of the cycle are obtained as a result of the study of the first approximation of the monodromy operator of the auxiliary system. The conclusion about stability is obtained on the basis of the Poincaré trait.

Keywords: differential equations, small parameter, monodromy operator, periodic solution, limit cycle, orbital stability, Andronov–Hopf bifurcation.

Проблема поиска условий бифуркации Андронова–Хопфа имеет важное значение в качественной теории дифференциальных уравнений и в ее приложениях. Фундаментальные результаты исследований по данной проблеме и изложены в книгах [1–4]. Эти результаты получены на основе построения топографической системы (принцип кольца) или функции последования в окрестности нулевой особой точки. В условиях бифуркации цикла недостаточно исследованными остаются вопросы о зависимости начального значения соответствующего решения и периода решения от параметра. Кроме того, при изучении в приложениях мягкого возбуждения автоколебаний слабо разработаны вопросы применения компьютерных технологий. Для их разработки необходимы признаки бифуркации устойчивого цикла на основе свойств коэффициентов моделей осцилляторов. С этой целью применим результаты, полученные в работе [5] на основе исследования первого нелинейного приближения оператора монодромии вспомогательной системы.

Рассмотрим автономную систему

$$\dot{x} = Ax + f(x, \mu), \quad (1)$$

в которой $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$, $\mu \in R$ – малый параметр, правая часть локально достаточно гладко зави-

сит от фазовых переменных и от параметра, $f(x, \mu) = f_1(x, \mu) + f_2(x, \mu) + f_3(x) + \tilde{f}(x, \mu)$,

$$f_1(x, \mu) = \mu \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad f_2(x, \mu) - \text{вектор-форма второго порядка от } x, \quad f_3(x) = \\ = \begin{pmatrix} c_{11}x_1^3 + c_{21}x_1^2x_2 + c_{31}x_1x_2^2 + c_{41}x_2^3 \\ c_{12}x_1^3 + c_{22}x_1^2x_2 + c_{32}x_1x_2^2 + c_{42}x_2^3 \end{pmatrix}, \quad \lim_{\gamma \rightarrow 0} \gamma^{-3} \|\tilde{f}(\gamma x, \gamma \mu)\| \equiv 0, \quad f(0_2, \mu) \equiv 0_2.$$

Для ветвления периодического решения системы (1) от ее нулевого решения необходимо [6], чтобы при нулевом значении параметра имела периодическое решение соответствующая линейная система $\dot{x} = Ax$. Поэтому без ограничения общности рассуждений будем предполагать, что матрица A в системе (1) имеет жорданову нормальную форму $A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

Задача: найти условия для коэффициентов функции $f(x, \mu)$, при которых в системе (1) происходит бифуркация орбитально асимптотически устойчивого цикла от нулевой особой точки.

В окрестности нулевой особой точки при нулевом значении параметра система (1) близка к линейной системе $\dot{x} = Ax$, все решения которой являются 2π -периодическими. Поэтому для системы (1) в поставленной задаче естественно предполагать, что цикл соответствует решению с периодом, близким к 2π . Выполнив в (1) замену переменной $t = (1 + \lambda)\tau$, где λ – малый параметр [7], получим вспомогательную систему

$$\frac{dv}{d\tau} = Av + \lambda Av + (1 + \lambda)f(v, \mu), \quad (2)$$

которая в силу автономности отличается от исходной лишь способом параметризации траекторий. Поэтому справедливо следующее утверждение.

Лемма. Система (1) имеет орбитально асимптотически устойчивое решение $x(t, a, \mu)$, $x(0, a, \mu) = a$ с периодом $\omega = (1 + \lambda)2\pi$ тогда и только тогда, когда система (2) имеет орбитально асимптотически устойчивое 2π -периодическое решение $v(\tau, a, \lambda, \mu)$, $v(0, a, \lambda, \mu) = a$.

По данной лемме задача для системы (1) о бифуркации решения с периодом, зависящим от параметра и близким к 2π , сводится к задаче для системы (2) о бифуркации решения с периодом 2π .

Составим бифуркационное уравнение относительно начального значения и параметров, определяющих периодическое решение. Вычислим $X(\tau) = e^{\tau A} = \begin{pmatrix} \cos \tau & -\sin \tau \\ \sin \tau & \cos \tau \end{pmatrix}$.

Решение системы (2) удовлетворяет интегральному уравнению

$$v(\tau, a, \lambda, \mu) = X(\tau)a + \lambda X(\tau) \int_0^\tau X(-s)Av(s, a, \lambda, \mu)ds + (1 + \lambda)X(\tau) \int_0^\tau X(-s)f(v(s, a, \lambda, \mu), \mu)ds.$$

Заметим, что $\int_0^{2\pi} X(-s)f_2(X(s)a, \mu)ds = 0_2$ (и вообще на периоде средние значения

всех форм четного порядка равны нулю вдоль решений системы $\dot{x} = Ax$). Начальные значения 2π -периодических решений системы (2) – это неподвижные точки оператора сдвига по траекториям на 2π [6], который в окрестности нулевой особой точки имеет вид

$$v(2\pi, a, \lambda, \mu) = a + q(a, \lambda, \mu) + \psi(a, \lambda, \mu), \quad (3)$$

где $q(a, \lambda, \mu) = 2\pi\lambda Aa + p(a, \mu)$, функции $p(a, \mu)$ и $\psi(a, \lambda, \mu)$ удовлетворяют равенствам

$$p(a, \mu) + \tilde{p}(a, \mu) = \int_0^{2\pi} X(-s)f(X(s)a, \mu)ds, \quad \lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-3} \|\tilde{p}(\alpha a, \alpha\mu)\| \equiv 0,$$

$$\psi(a, \lambda, \mu) = \lambda \int_0^{2\pi} X(-s)Av(s, a, \lambda, \mu)ds + (1 + \lambda) \int_0^{2\pi} X(-s)f(v(s, a, \lambda, \mu), \mu)ds - q(a, \lambda, \mu),$$

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-3} \|\psi(\alpha a, \alpha^2\lambda, \alpha\mu)\| \equiv 0.$$

Итак, по равенству (3) бифуркационное уравнение $v(2\pi, a, \lambda, \mu) - a = 0_2$ системы (2) имеет вид

$$q(a, \lambda, \mu) + \psi(a, \lambda, \mu) = 0_2. \quad (4)$$

Для решения исходной задачи требуется найти условия ветвления малого решения уравнения (4) при отклонении параметра от нуля. Применим схему рассуждений из работ [5, 8, 9].

Для левой части уравнения (4) вычислим первое приближение $q(a, \lambda, \mu) = \frac{\pi}{4} Q(a, \lambda, \mu)a$, в котором $a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$,

$$Q(a, \lambda, \mu) = \begin{pmatrix} 4\mu\bar{d}_1 + h_1(a_1^2 + a_2^2) & -(4\mu\bar{d}_2 + 8\lambda + h_2(a_1^2 + a_2^2)) \\ 4\mu\bar{d}_2 + 8\lambda + h_2(a_1^2 + a_2^2) & 4\mu\bar{d}_1 + h_1(a_1^2 + a_2^2) \end{pmatrix}, \quad \bar{d}_1 = d_{11} + d_{22}, \quad \bar{d}_2 = d_{21} - d_{12},$$

$$h_1 = 3(c_{11} + c_{42}) + c_{31} + c_{22}, \quad h_2 = 3(c_{12} - c_{41}) + c_{32} - c_{21}.$$

Малое решение уравнения (4) целесообразно искать, выбрав параметризацию переменных в виде

$$a = a(\alpha) = \alpha(a_0 + \bar{a}(\alpha)), \quad a_0 \neq 0_2, \quad \lim_{\alpha \rightarrow 0} \bar{a}(\alpha) = 0_2;$$

$$\mu = \mu(\alpha) = \alpha^2(\mu_0 + \bar{\mu}(\alpha)), \quad \mu_0 \neq 0, \quad \lim_{\alpha \rightarrow 0} \bar{\mu}(\alpha) = 0;$$

$$\lambda = \lambda(\alpha) = \alpha^2(\lambda_0 + \bar{\lambda}(\alpha)), \quad \lim_{\alpha \rightarrow 0} \bar{\lambda}(\alpha) = 0. \quad (5)$$

Для существования решения (5) необходимо, чтобы его направление ветвления (a_0, λ_0, μ_0) удовлетворяло равенству [8]

$$q(a_0, \lambda_0, \mu_0) = \frac{\pi}{4} Q(a_0, \lambda_0, \mu_0)a_0 = 0_2. \quad (6)$$

Так как $a_0 \neq 0_2$ для ненулевого начального значения периодического решения, то без ограничения общности рассуждений можно предполагать, что $\|a_0\|_2 = 1$. Тогда для выполнения равенства (6) требуется условие

$$\det Q(a_0, \lambda_0, \mu_0) = (4\mu_0\bar{d}_1 + h_1)^2 + (4\mu_0\bar{d}_2 + 8\lambda_0 + h_2)^2 = 0,$$

которое в свою очередь равносильно соотношениям

$$4\mu_0\bar{d}_1 + h_1 = 0, \quad (7)$$

$$4\mu_0\bar{d}_2 + 8\lambda_0 + h_2 = 0. \quad (8)$$

Далее будем предполагать, что справедливо неравенство

$$\bar{d}_1 = d_{11} + d_{22} \neq 0. \tag{9}$$

Тогда из условий (7) и (8) следует, что

$$\mu_0 = -h_1 / (4\bar{d}_1), \lambda_0 = (\bar{d}_2 h_1 - \bar{d}_1 h_2) / (8\bar{d}_1). \tag{10}$$

При этом $Q(a_0, \lambda_0, \mu_0) = 0_{22}$, то есть равенство (6) верно для любого значения $a_0 : \|a_0\|_2 = 1$.

Последнее равенство ясно с геометрической точки зрения, так как согласно теории Пуакаре – Бендиксона [1, 2] цикл при своей бифуркации должен окружать нулевую особую точку. Поэтому в качестве направления ветвления цикла в фазовом пространстве можно рассматривать проекцию произвольно выбранной точки цикла на единичную окружность.

Вычислим матрицы Якоби $J_1(a, \lambda, \mu) = \frac{\partial q(a, \lambda, \mu)}{\partial(\lambda, \mu)} = \pi \begin{pmatrix} \bar{d}_1 a_1 - \bar{d}_2 a_2 & -2a_2 \\ \bar{d}_2 a_1 + \bar{d}_1 a_2 & 2a_1 \end{pmatrix}$,

$$J(a, \lambda, \mu) = \frac{\partial q(a, \lambda, \mu)}{\partial(a, \lambda, \mu)} = \frac{\pi}{2} \begin{pmatrix} h_1 a_1^2 - h_2 a_1 a_2 & -h_2 a_2^2 + h_1 a_1 a_2 & 2(\bar{d}_1 a_1 - \bar{d}_2 a_2) & -4a_2 \\ h_2 a_1^2 + h_1 a_1 a_2 & h_1 a_2^2 + h_2 a_1 a_2 & 2(\bar{d}_2 a_1 + \bar{d}_1 a_2) & 4a_1 \end{pmatrix}.$$

Допустим, справедливо равенство (6). Тогда с помощью теоремы о неявной функции устанавливается [5, 8, 9], что для ветвления у уравнения (4) малого решения вида (5) достаточно выполнения условия

$$\text{rang} J(a_0, \lambda_0, \mu_0) = 2. \tag{11}$$

Так как $\det J_1(a, \lambda, \mu) = 2\pi \bar{d}_1 (a_1^2 + a_2^2)$, то $\text{rang} J(a_0, \lambda_0, \mu_0) = \text{rang} J_1(a_0, \lambda_0, \mu_0) = 2$ при условии (9). То есть по направлению ветвления (10) в пространстве параметров верно равенство (11).

Итак, при условиях (7)–(9) система (2) имеет малое 2π -периодическое решение вида $\bar{v} = v(\tau, a(\alpha), \lambda(\alpha), \mu(\alpha)) = \alpha X(\tau) a_0 + \tilde{v}(\tau, \alpha)$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-1} \|\tilde{v}(\tau, \alpha)\| \equiv 0$.

Исследуем это решение на устойчивость. Обозначим $g(v, \mu, \lambda) = \begin{pmatrix} g_1(v, \mu, \lambda) \\ g_2(v, \mu, \lambda) \end{pmatrix}$ правую часть системы (2). По признаку Пуанкаре [10] для орбитальной асимптотической устойчивости периодического решения достаточно, чтобы при всех малых $\alpha > 0$ выполнялось условие

$$\Delta(\alpha) = \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial g_1(\bar{v}, \mu(\alpha), \lambda(\alpha))}{\partial v_1} + \frac{\partial g_2(\bar{v}, \mu(\alpha), \lambda(\alpha))}{\partial v_2} \right) dt < 0. \tag{12}$$

Используем соотношение (7) и получим локальный вид левой части неравенства (12)

$$\Delta(\alpha) = \pi \alpha^2 (2\mu_0 \bar{d}_1 + h_1 \|a_0\|_2^2) + o(\alpha^2) = \pi \alpha^2 h_1 / 2 + o(\alpha^2).$$

Значит, если имеет место оценка

$$h_1 = 3(c_{11} + c_{42}) + c_{31} + c_{22} < 0, \tag{13}$$

то выполняется условие (12).

Итак, в результате проведенных рассуждений справедливо следующее утверждение.

Теорема. Если выполняются условия (9), (13), то для любого достаточно малого $\alpha > 0$ в системе (1) при $\mu = \mu(\alpha) = \alpha^2(\mu_0 + \bar{\mu}(\alpha))$, $\mu_0 = -\frac{3(c_{11} + c_{42}) + c_{31} + c_{22}}{4(d_{11} + d_{22})}$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \bar{\mu}(\alpha) = 0$ существует орбитально асимптотически устойчивое малое $(1 + \lambda(\alpha))2\pi$ -периодическое решение $x(t, a(\alpha), \mu(\alpha))$ с начальным значением $a(\alpha) = \alpha(a_0 + \bar{a}(\alpha))$, $\|a_0\|_2 = 1$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \bar{a}(\alpha) = 0_2$, причем $\lambda(\alpha) = \alpha^2(\lambda_0 + \bar{\lambda}(\alpha))$, $\lambda_0 = \frac{(d_{21} - d_{12})(3(c_{11} + c_{42}) + c_{31} + c_{22}) - (d_{11} + d_{22})(3(c_{12} - c_{41}) + c_{32} - c_{21})}{8(d_{11} + d_{22})}$, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \bar{\lambda}(\alpha) = 0$.

Пример. Рассмотрим систему вида (1)

$$\dot{x} = Ax + \mu \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} -2x_1^3 + 4x_1^2x_2 + x_2^3 \\ 3x_1^3 + 6x_1x_2^2 - x_2^3 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

в которой $f_2(x, \mu) \equiv 0_2$, $\tilde{f}(x, \mu) \equiv 0_2$, $\bar{d}_1 = -1$, $\bar{d}_2 = -1$, $h_1 = -9$, $h_2 = 11$.

Так как $\bar{d}_1 \neq 0$, $h_1 < 0$, то по установленной выше теореме в системе (14) имеет место бифуркация Андронова–Хопфа.

Выполним с помощью пакета Maple графическую иллюстрацию этого факта, изобразив траектории и интегральные кривые системы (14) при достаточно малых значениях параметра.

По формулам (10) вычислим $\mu_0 = -9/4$, $\lambda_0 = -5/2$.

На рисунке 1 для нескольких малых значений вспомогательного параметра $\alpha > 0$ изображена близкая к циклу траектория малого решения $x(t, a, \mu)$, в котором $t \in [0, 2\pi(1 + \alpha\lambda_0)]$, $a = \alpha a_0$, $a_0 = (1, 0)^T$ (точка произвольно выбрана на единичной окружности), $\mu = \alpha\mu_0$. (При $\alpha > 0,01$ в данном случае траектория размыкается.) Видим, что траектория близка к окружности, то есть к виду траекторий соответствующей системы $\dot{x} = Ax$, амплитуда траектории близка к величине начального значения и является при $\alpha \rightarrow 0$ бесконечно малой порядка $\sqrt{|\mu|}$.

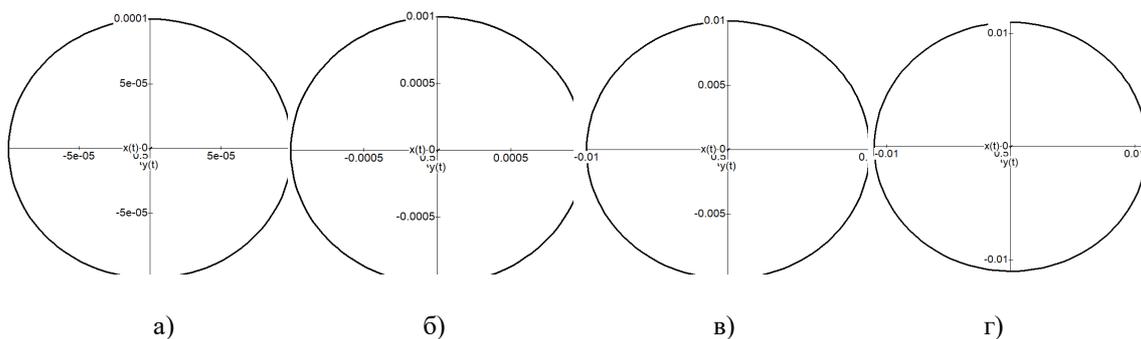


Рис. 1. Цикл системы (14) при значениях параметра: а) $\mu \approx 0,0001\mu_0$; б) $\mu \approx 0,001\mu_0$; в) $\mu \approx 0,01\mu_0$; г) $\mu \approx 0,011\mu_0$

На рисунках 2 и 3 для иллюстрации устойчивости цикла изображены при $\mu = \alpha\mu_0$ траектории и интегральные кривые решений с начальными значениями $a = \alpha a_0/2$, $a = \alpha a_0$, $a = 2\alpha a_0$. Видим, что с ростом вспомогательного параметра α притяжение возмущенных траекторий к циклу происходит на более коротком промежутке значений t .

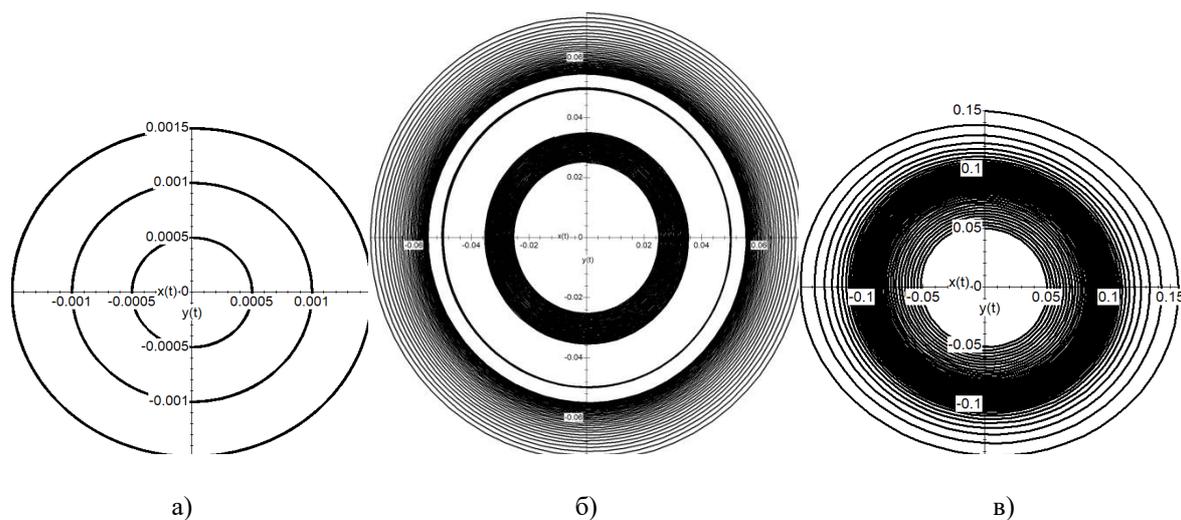


Рис. 2. Траектории системы (14) при значениях параметра: а) $\mu \approx 0,001\mu_0$; б) $\mu \approx 0,05\mu_0$; в) $\mu \approx 0,1\mu_0$

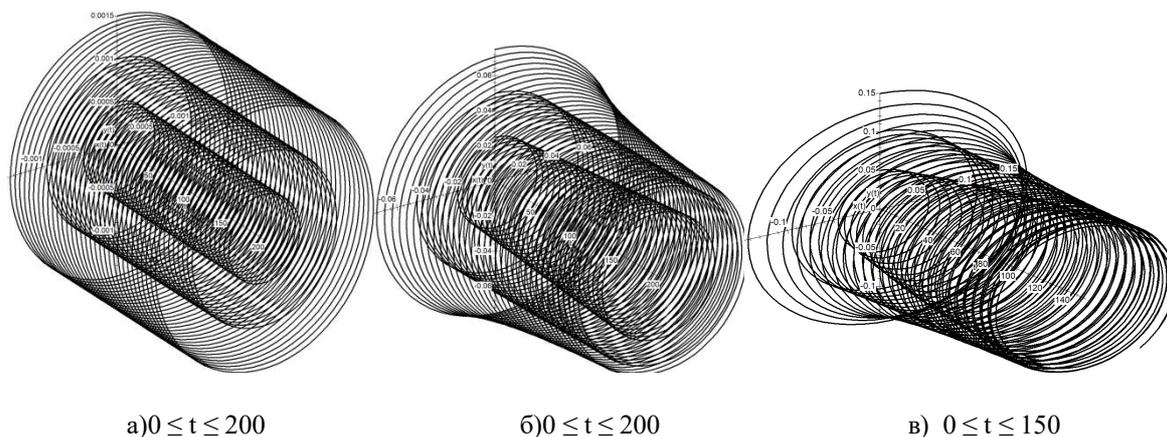


Рис. 3. Интегральные кривые системы (14) при значениях параметра: а) $\mu \approx 0,001\mu_0$; б) $\mu \approx 0,05\mu_0$; в) $\mu \approx 0,1\mu_0$

Библиографический список

1. Андронов, А.А. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости / А.А.Андронов, Е.А.Леонтович, И.И.Гордон // М.: Наука. – 1967.
2. Рейссиг, Р. Качественная теория нелинейных дифференциальных уравнений / Р.Рейссиг, Г.Сансоне, Р.Конти // М.: Мир. – 1974.
3. Марсен, Дж. Бифуркация цикла и ее приложения / Дж.Марсен, М.Мак-Кракен // М.: Мир. – 1980.
4. Хассард, Б. Теория и приложения бифуркации рождения цикла / Б.Хассард, Н. Казаринов, И.Вэн // М.: Мир. – 1985.
5. Абрамов, В.В. К проблеме устойчивости периодического решения в условиях бифуркации Хопфа / В.В.Абрамов, Е.Ю.Лискина, С.С.Мамонов // Чебышевский сборник. – 2019. – Т. 20, вып. 3 (71). – С. 78–91.
6. Красносельский, М.А. Оператор сдвига по траекториям дифференциальных уравнений / М.А.Красносельский // М.: Наука. – 1966.
7. Малкин, И.Г. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний / И.Г.Малкин // М.: ГИТТЛ. – 1956.
8. Абрамов, В.В. К задаче об устойчивости малого периодического решения / В.В. Абрамов // Итоги науки и техники. Серия «Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры». – 2018. – Т. 148. – С. 3–9.
9. Абрамов В.В. Малое периодическое решение системы дифференциальных уравнений с нулевой матрицей линейного приближения / В.В. Абрамов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020: сб. тр. III междунар. науч.-техн. форума / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: РГРТУ. – 2020. – Т.5. – С. 47–53.
10. Демидович, Б.П. Лекции по математической теории устойчивости / Б.П.Демидович // М.: Наука. – 1967.

УДК 517.925; ГРНТИ 27.29.17

ПЕРИОДИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С МАЛЫМ ПАРАМЕТРОМ

А.В. Земенков

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, zemenkov_a@mail.ru*

Аннотация. Для нормальной неавтономной системы обыкновенных дифференциальных уравнений с малым параметром установлены условия ветвления периодического решения.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, линейная система, периодическое решение, малый параметр.

PERIODIC SOLUTION OF A LINEAR SYSTEM OF DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH A SMALL PARAMETER

A.V. Zemenkov

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,
Russia, Ryazan, zemenkov_a@mail.ru*

The summary. For a normal nonautonomous system of ordinary differential equations with a small parameter, the branching conditions of the periodic solution are established.

Keywords: differential equations, linear system, periodic solution, small parameter.

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений с ω -периодической по t правой частью

$$\dot{x} = A(t)x + B(t, \varepsilon)x + f(t, \varepsilon), \quad (1)$$

в которой $x \in R^n$, $\varepsilon \in R^m$ – малый параметр, $A(t)$ и $B(t, \varepsilon)$ – $n \times n$ -матрица, $B(t, 0_m) = 0_{nn}$, $A(t)$, $B(t, \varepsilon)$, $f(t, \varepsilon)$ являются непрерывными при всех $t \in R$ и ε .

Ставится **задача**: найти условия существования периодического решения системы (1). Заметим, что эти условия целесообразно получить в форме, удобной для реализации их проверки с помощью вычислений в пакетах прикладных компьютерных программ. Для решения задачи построим определяющее уравнение, то есть уравнение относительно начального значения периодического решения, используя результаты работ [1–3].

Пусть $x(t, x_0)$ – решение системы (1) с начальным значением $x(t, x_0) = x_0$. Рассмотрим линейную систему

$$\dot{y} = A(t)y + (B(t, \varepsilon)x(t, x_0) + f(t, \varepsilon)). \quad (2)$$

Если $y(t, x_0)$, $y(t, x_0) = x_0$, – решение системы (2), то (в силу единственности решения с заданным начальным значением) оно совпадает с решением $x(t, x_0)$ системы (1). То есть справедливо утверждение.

Теорема 1. $x(t, x_0)$ – решение системы (1) тогда и только тогда, когда $y(t, x_0)$ – решение системы (2).

Так как (2) – линейная неоднородная система, то в силу теоремы 1 решение системы (1) удовлетворяет интегральному уравнению

$$x(t, x_0) = X(t)x_0 + X(t) \int_0^t X^{-1}(t) [B(t, \varepsilon)x(t, x_0) + f(t, \varepsilon)] dt. \quad (3)$$

Обозначим $z(t, x_0) = X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) [B(\tau, \varepsilon)x(\tau, x_0) + f(\tau, \varepsilon)] d\tau$. Тогда решение системы (1)

имеет вид $x(t, x_0) = X(t)x_0 + z(t, x_0)$. Подставив это выражение в равенство (3), получим

$$\begin{aligned} x(t, x_0) &= X(t)x_0 + X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) f(\tau, \varepsilon) d\tau + X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) [B(\tau, \varepsilon)(X(\tau)x_0 + z(\tau, x_0)) + \\ &+ f(\tau, \varepsilon)] d\tau = X(t)x_0 + X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) f(\tau, \varepsilon) d\tau + X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) B(\tau, \varepsilon) [X(\tau)x_0 + z(\tau, x_0)] + \\ &+ f(\tau, \varepsilon) d\tau = X(t)x_0 + X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) f(\tau, \varepsilon) d\tau + [X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) B(\tau, \varepsilon) X(\tau) d\tau] x_0 + \\ &+ X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) B(\tau, \varepsilon) f(\tau, \varepsilon) d\tau + X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) B(\tau, \varepsilon) X(\tau) \int_0^\tau X^{-1}(s) B(s, \varepsilon) x(s, x_0) ds d\tau \end{aligned}$$

Введём обозначения

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{B}(t, \varepsilon) &= X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) B(\tau, \varepsilon) X(\tau) d\tau, \\ \bar{f}(t, \varepsilon) &= X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) f(\tau, \varepsilon) d\tau, \\ \bar{\bar{f}}(t, \varepsilon) &= X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) B(\tau, \varepsilon) f(\tau, \varepsilon) d\tau, \\ \bar{\varphi}(t, \varepsilon, x_0) &= X(t) \int_0^t X^{-1}(\tau) B(\tau, \varepsilon) X(\tau) \int_0^\tau X^{-1}(s) B(s, \varepsilon) x(s, x_0) ds d\tau. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Так как $\|\bar{\varphi}(t, \varepsilon, x_0)\|$ имеет тот же порядок, что и $\|\bar{B}^2(t, \varepsilon)\|$, то $\lim_{\|\varepsilon\| \rightarrow 0} \frac{\|\bar{\varphi}(t, \varepsilon, x_0)\|}{\|\bar{B}(t, \varepsilon)\|} \equiv 0$, то есть величина $\|\bar{\varphi}(t, \varepsilon, x_0)\|$ имеет больший порядок малости, чем $\|\bar{B}(t, \varepsilon)\|$ при $\|\varepsilon\| \rightarrow 0$. С учётом обозначений (4) перепишем равенство (3)

$$x(t, x_0) = X(t)x_0 + \bar{B}(t, \varepsilon)x_0 + \bar{f}(t, \varepsilon) + \bar{\bar{f}}(t, \varepsilon) + \bar{\varphi}(t, \varepsilon, x_0).$$

Тогда условие периодичности решения [4] для системы (1) имеет вид

$$[X(\omega) - E] x_0 + \bar{B}(\omega, \varepsilon)x_0 + \bar{f}(\omega, \varepsilon) + \bar{\bar{f}}(\omega, \varepsilon) + \bar{\varphi}(\omega, \varepsilon, x_0) = 0_n.$$

Обозначим $B = X(\omega) - E$, $P(\varepsilon) = \bar{B}(\omega, \varepsilon)$, $\bar{f}(\omega, \varepsilon) = U(\varepsilon)$, $\bar{\bar{f}}(\omega, \varepsilon) = q(\varepsilon)$, $\bar{\varphi}(\omega, x_0, \varepsilon) = \varphi(x_0, \varepsilon)$. Итак, для начального значения и параметра, определяющих периодическое решение системы (1), получим уравнение

$$F(x_0, \varepsilon) = Bx_0 + P(\varepsilon)x_0 + U(\varepsilon) + q(\varepsilon) + \varphi(x_0, \varepsilon) = 0_n, \quad (5)$$

в котором $P(0_m) = 0_{nm}$, $q(0_m) = 0_n$, $\|\varphi(x_0, \varepsilon)\|$ – бесконечно малая более высокого порядка, чем $\|P(\varepsilon)\|$ при $\|\varepsilon\| \rightarrow 0$. Установим необходимое условие существования периодического решения.

Теорема 2. Если $Bx_0 + U(0_m) \neq 0_n$, то при малых $\|\varepsilon\|$: $F(x_0, \varepsilon) \neq 0_n$.

Справедливость теоремы 2 очевидна в силу непрерывности сложной функции $\varphi(\varepsilon) = \|F(x_0, \varepsilon)\|$. Действительно, из условия $\varphi(0_m) = \|F(x_0, 0_m)\| = b > 0$ следует, что существует $\delta > 0$, для которого $\varphi(\varepsilon) > b/2$ при $\|\varepsilon\| < \delta$. То есть $\|F(x_0, \varepsilon)\| > 0$. Следовательно, $F(x_0, \varepsilon) \neq 0_n$.

Значит начальное значение x_0 , определяющее ω -периодическое решение системы (1), следует искать в окрестности значения \bar{x}_0 , удовлетворяющего равенству $F(x_0, 0_m) = 0_n$. Итак, далее требуем существование значения \bar{x}_0 , удовлетворяющего условию:

$$Bx_0 + U(0_m) = 0_n. \quad (6)$$

Применим для решения уравнения (5) теорему о неявной функции. Вычислим матрицу Якоби $\frac{\partial F(\bar{x}_0, \varepsilon)}{\partial x_0} = [B + P(\varepsilon) + \varphi'_{x_0}(x_0, \varepsilon)]_{x=\bar{x}_0, \varepsilon=0_m} = B$. Допустим, $\det B \neq 0$. Взяв

$x_0 = \bar{x}_0, \varepsilon = 0_m$, получим $F(\bar{x}_0, 0_m) = 0_n, \det\left(\frac{\partial F(x_0, 0_m)}{\partial x_0}\right) \neq 0$. Итак, справедливо следующее утверждение.

Теорема 3. Если $x_0 = \bar{x}_0$ удовлетворяет условию (6) и $\det B \neq 0$, то система (1) имеет ω -периодическое решение $x(t, x_0(\varepsilon), \varepsilon)$, $x_0(\varepsilon) \rightarrow \bar{x}_0$ при $\varepsilon \rightarrow 0_m$.

Действительно, в условиях теоремы 1 уравнение (5) определяет непрерывную функцию $x_0(\varepsilon)$, $x_0(0_m) = \bar{x}_0$. Подставив её в уравнение (3), получим формулу для вычисления ω -периодического решения системы (1) методом последовательных приближений. Условие $B\bar{x}_0 + U(0_m) = 0_n$ означает, что $x(t, \bar{x}_0, 0_m)$ – решение системы вида

$$\dot{x} = A(t)x + f(t, 0_m). \quad (7)$$

Допустим, $\det B = 0$. Вычислим матрицу Якоби

$$C = \frac{\partial F(\bar{x}_0, 0_m)}{\partial(x_0, \varepsilon)} = [B \quad (P(0_m)\bar{x}_0)'_{\varepsilon} + (U(0_m))'_{\varepsilon} + (q(0_m))'_{\varepsilon} + (\varphi(\bar{x}_0, 0_m))'_{\varepsilon}],$$

в которой $(\varphi(\bar{x}_0, 0_m))'_{\varepsilon} = 0_{nm}$. То есть $C = [B \quad S(\bar{x}_0) + Q]$, где $S(\bar{x}_0) = (P(0_m)\bar{x}_0)'_{\varepsilon}$, $Q = U'_{\varepsilon}(0_m) + q'_{\varepsilon}(0_m)$ – $n \times m$ -матрицы. Аналогично теореме 3 устанавливается следующее утверждение.

Теорема 4. Пусть существует $x_0 = \bar{x}_0$, при котором: 1) выполняется условие (6), 2) $\text{rang } C = n$. Тогда система (1) имеет такое ω -периодическое решение $x(t, x_0(\varepsilon), \varepsilon)$, что $x_0(\varepsilon) \rightarrow \bar{x}_0$ при $\varepsilon \rightarrow 0_m$.

Если при каком-либо способе выбора матричной нормы для любого достаточно малого значения параметра справедливо неравенство $\|X(\omega) + \bar{B}(\omega, \varepsilon)\| < 1$, то любое решение системы (1), в том числе и периодическое, является асимптотически устойчивым.

Библиографический список

1. Абрамов, В.В. Устойчивость малого периодического решения / В.В. Абрамов // Вестник РАЕН. – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 3–5.
2. Абрамов, В.В. Ветвление периодического решения неавтономной системы с малым параметром / В.В. Абрамов // Вестник РАЕН. – 2015. – Т. 15, № 5. – С. 3–7.
3. Абрамов, В.В. К задаче об устойчивости малого периодического решения / В.В. Абрамов // Итоги науки и техники. Серия «Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры». – 2018. – Т. 148. – С. 3–9.
4. Красносельский, М.А. Оператор сдвига по траекториям дифференциальных уравнений / М.А. Красносельский // М.: Наука. – 1966.

УДК. 510.3.519.816

НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ

В.Г. Чернов

*Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
Россия, Владимир, vladimir.chernov44@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается возможность формализация задач исследования операций, которые могут быть представлены в матричной форме, методами теории нечетких множеств. Предложены методы решения таких задач.

Ключевые слова: исследование операций, нечеткие множества, функции принадлежности, антагонистическая игра, игра с природой.

FUZZY MODELS OF OPERATIONS RESEARCH

V.G. Chernov

*Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov,
Russia, Vladimir, vladimir.chernov44@mail.ru*

The summary. The possibility of formalization of the problems of operations research, which can be represented in matrix form, by the methods of the theory of fuzzy sets is considered. Methods for solving such problems are proposed.

Keywords: operations research, fuzzy sets, membership functions, antagonistic game, game with nature.

Значительная часть задач принятия решений могут быть отнесены к исследованию операций. Это модель конфликтных ситуаций в виде антагонистических игр, так называемые игры с природой, выбор наилучшей альтернативы в условиях неопределенности.

Классическая теория нахождения решений в подобных задачах исходит из принципа полного знания, при котором участникам ситуации принятия решений известны варианты действий противоположной стороны, распределение вероятностей состояний природы, а также оценки последствий принимаемых решений в форме точечных чисел.

Такое представление является приближенной моделью реальной ситуации, поскольку в действительности невозможно доказать полноту множества решений (стратегий) участников, в результате могут появиться решения, ранее не предвиденные. Выбор решения может иметь субъективный характер, что также не учитывается в классических методах. Во многих случаях отсутствует возможность корректно идентифицировать распределение вероятностей состояний природы и поэтому приходится использовать экспертные оценки, которые принципиально являются приближенными. В результате оценки последствий возможных решений также будут приближенными. В этих условиях модели, основанные на теории нечетких множеств, можно считать более соответствующими перечисленным выше обстоятельствам.

Формально рассматриваемые задачи можно записать следующим образом

$$G = \{X, Y, M(X, Y)\},$$

где $X = \{x_i : i = \overline{1, I}\}$ – множество возможных решений;

$Y = \{y_j : j = \overline{1, J}\}$ – в зависимости от вида задачи либо множество возможных решений противоположной стороны в антагонистических играх, либо множество состояний природы;

$M(X, Y)$ – матрица оценок последствий возможных решений.

В нечетком варианте матрица $L(X, Y)$ будет содержать либо нечеткие числа, либо нечеткие вербальные утверждения и может быть представлена в виде

$$\tilde{M} = \|\mu_{ij}(z)\|, \quad (1)$$

где $\mu_{ij}(z)$ – функция принадлежности нечеткой оценки последствий возможных решений;

z – принадлежит области определения оценок матрицы $M(X, Y)$.

Кроме того, если ситуация, требующая принятия решений, формализуется как игра с природой, задается распределение вероятностей состояний природы

$$\tilde{P}(Y) = \{\mu_j(q) : j = \overline{1, J}, q \in [0, 1]\}.$$

В зависимости от используемой модели при решении задачи либо сразу выполняется определение наилучшего решения (антагонистические игры, принятие решений в условиях неопределенности), либо предварительно выполняется преобразование над элементами матрицы (1), обеспечивающее учет влияния нечетких оценок вероятностей состояний природы (игры с природой).

Если предположить нечеткость знаний о действиях противоположной стороны, то можно показать, что антагонистическая игра становится эквивалентной задаче принятия решений в условиях неопределенности. Тогда поиск наилучшего решения может основываться на вычислении интегральной оценки некоторого i -го решения. Для ее вычисления предлагается использовать преобразование FztoTriangle [1], заменяющее всю совокупность нечетких оценок i -ой строки матрицы (1) эквивалентным нечетким множеством с треугольной функцией принадлежности.

Параметры эквивалентного нечеткого множества определяются следующим образом. Левая граница носителя $z_{L_i}^E = \min(z_{L_i})$, z_{L_i} – левая граница носителя нечетких оценок i -ой строки матрицы (1), $z_R^E = \max(z_{R_i})$, z_{R_i} – правая граница носителя нечетких оценок этой же строки. Координата центра тяжести CG_i^E треугольной функции принадлежности равна координате центра тяжести всей совокупности нечетких оценок, принадлежащих i -ой строке матрицы (1). В упрощенном варианте

$$CG_i^E = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J CG_{ij},$$

где CG_{ij} – координаты центра тяжести функций принадлежности нечетких оценок i -ой строки.

Координата максимума функции принадлежности эквивалентного нечеткого множества $z_{i \max}^E$ определяется из известного соотношения для вычисления координаты центра тяжести треугольника по координатам его вершин

$$CG_i^E = \frac{1}{3}(z_{L_i}^E + z_{i \max}^E + z_{R_i}^E), \quad z_{i \max}^E = 3CG_i^E - (z_{L_i}^E + z_{R_i}^E).$$

Можно показать, что преобразование $FztoTriangle$ не нарушает логику решаемой задачи [1]. Построенные для каждой строки матрицы (1) эквивалентные нечеткие множества можно рассматривать как интегральную оценку последствий выбранного решения. Для выбора наилучшего надо сравнить полученные оценки, используя известные методы сравнения нечетких множеств [2,3].

Отдельная задача - учет влияния нечетких оценок вероятностей состояний природы, которые также могут быть заданы либо в виде нечетких чисел, либо нечетких вербальных утверждений. Если оценки вероятностей состояний природы и значения элементов матрицы (1) заданы в виде нечетких чисел, то учет вероятностей может быть выполнен по стандартной схеме перемножения соответствующих оценок из матрицы (1) и оценок вероятностей, естественно, с учетом всех условий выполнения арифметических операций над нечеткими числами.

Наиболее общей будет ситуация, когда оценки вероятностей состояний природы и значения элементов матрицы (1) задаются в виде нечетких вербальных утверждений. В этом случае вербальные оценки вероятностей должны быть преобразованы в какой-то числовой эквивалент. Наиболее общим решением является использование точечных значений нечетких множеств [4,5], которые позволяют учесть все параметры нечетких множеств, формализующих оценки вероятностей состояний природы: вид функции принадлежности, ширину носителя, положение на области определения.

Точечное значение нечеткого множества рассчитывается на основе операции α -разбиения, когда сначала вычисляется среднее значение для элементов уровня α

$$S(P_{\alpha_i}) = \sum_{q_i \in P_{\alpha_i}} \frac{q_i}{n_{\alpha_i}}$$

для всех $q_i \in P_{\alpha_i}$ таких, что

$$\mu(q_i) \geq \alpha_i, \quad (2)$$

n_{α_i} – количество значений аргумента функции принадлежности, удовлетворяющих условию (2).

Точечное значение вычисляется по соотношению

$$W(\tilde{P}) = \frac{1}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \sum_i S(P_{\alpha_i}) d\alpha_i,$$

где $d\alpha_i = \alpha_i - \alpha_{i-1}$.

В результате будет получен набор оценок $W(\tilde{P})$, при этом, большему значению \tilde{P} будет соответствовать большее точечное значение. Если интерпретировать функцию принадлежности нечетких оценок значений матрицы (1) как распределение возможности получения результат выбранного решения, то чем меньше вероятность соответствующего состояния природы, тем меньше должно быть влияние этого результата на значение интегральной оценки соответствующего решения.

Для учета значений вероятности можно использовать либо операцию клиппирования, когда значения функций принадлежности ограничивается уровнем $W(\tilde{P})$, либо умножением значений функций принадлежности нечетких оценок последствий возможных решений на $W(\tilde{P})$. Любая из этих операций приведет к изменению распределения возможности получения результата выбранного решения.

В результате появляется возможность решать различные задачи исследования операций в условиях нечеткости исходных данных.

Библиографический список

1. Чернов В.Г. Нечеткая игра с «природой» как модель принятия экономических решений / В.Г. Чернов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. - 2020, №3, Т. 63. - С. 42-2.
2. Rao P.P., Shankar N.R. Ranking generalized fuzzy numbers using area, mode, spread and weight / P.P. Rao, N.R. Shankar // International Journal of Applied Science and Engineering. - 2012, №10, v.1. - P.41-57.
3. Воронцов Я.А., Матвеев М.Г. Методы параметризованного сравнения нечетких и трапециевидных чисел / Я.А. Воронцов, М.Г. Матвеев // Вестник ВГУ, Серия Системный анализ и информационные технологии. - 2014, №2. - С.90-97.
4. Yager R.R. Multiple-objective decision – making using a fuzzy sets / R.R. Yager // International Journal. Man - Machine Studies. - 1977, №4, v.9. - P.375-382.
5. Yager R.R. Multicriteria decisions with soft : an application of fuzzy set and possibility theory / R.R. Yager // Fuzzy Mathematics. - 1982, №2, v.2, Pt.1, P.21-28; №3, v.2, Pt.2, P.7-16.

УДК 51-76, 614.777; ГРНТИ 27.35.43, 87.01.81

АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ БОРА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДОИСТОЧНИКАХ НА ТЕРРИТОРИИ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.И. Карасева*, **М.Н. Дмитриева***, **И.А. Акимова****, **Л.Н. Ермошина*****, **Е.В. Костюкова***

**Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова,
Россия, Рязань, karaseva.18@mail.ru, dmitrm05@mail.ru, lena.kostyukova.96@mail.ru*

***Управление Роспотребнадзора по Рязанской области
Россия, Рязань, rzn@urpn62.ru*

**** Санитарно-гигиеническая лаборатория ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской области»
Россия, Рязань, ya.er-lida@yandex.ru*

Аннотация. В статье проведен анализ качества питьевой воды по содержанию бора в водоемках в районах Рязанской области по данным за шесть лет. Получены выводы о природном характере загрязнения воды и необходимости выбора современных подходов, направленных на обеспечение населения доброкачественной питьевой водой.

Ключевые слова: качество питьевой воды, содержание бора, предельно допустимая концентрация, водоем, метод гигиенического картографирования.

THE ANALYSIS OF BORON CONTENT IN UNDERGROUND WATER SOURCES IN RYAZAN REGION

N.I. Karaseva*, **M.N. Dmitrieva***, **I.A. Akimova****, **L.N. Ermoshina*****, **E.V. Kostyukova***

**Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlov:*

Russia, Ryazan, karaseva.18@mail.ru, dmitrm05@mail.ru, lena.kostyukova.96@mail.ru

***Department of Rosпотребнадзор in Ryazan Region
Russia, Ryazan, rzn@urpn62.ru*

**** Sanitary and hygienic laboratory of FBHI "Center for Hygiene and Epidemiology in Ryazan Region"
Russia, Ryazan, ya.er-lida@yandex.ru*

Abstract. The article analyzes drinking water quality by boron content in water sources in Ryazan region according to data for six years. Conclusions are obtained about the natural character of water pollution and the need to choose modern approaches to providing the population with good-quality drinking water.

Keywords: Drinking water quality, boron content, maximum permissible concentration, water source, hygienic mapping method.

Одним из основных факторов, определяющих здоровье населения, является состояние хозяйственно-питьевого водоснабжения. Но, несмотря на его значимость, ситуация с обеспечением населения качественной питьевой водой далека от удовлетворительной. Ряд обстоятельств, причем, зачастую непреодолимых в силу объективных причин, таких как неуклонный рост водопотребления, мощное антропогенное и техногенное загрязнение водоемков, далекая от совершенства традиционная технология водоподготовки, недостаточ-

ная надежность водоохраннх мероприятий, дефицит питьевой воды, являются основными причинами одной из актуальных проблем современности – обеспечение населения доброкачественной питьевой водой. Организация питьевого водоснабжения из подземных водоисточников, несмотря на существующие недостатки, традиционно рассматривалась как наиболее предпочтительная. Это вполне объяснимо. Бесспорно, хорошая защищенность подземных вод от негативного внешнего воздействия, стабильность дебита, органолептических, санитарно-химических показателей, практически стерильность в большинстве ситуаций, отсутствие необходимости водоподготовки – это основные аргументы в пользу первоочередного выбора в качестве источника водоснабжения именно подземных вод. Но следует отметить, что обогащение подземной воды значительным количеством химических элементов, нередко превышающих предельно-допустимые концентрации (ПДК), напрямую связано с гидрогеологическими условиями формирования водовмещающих пород. В научных публикациях за последние годы обозначена новая проблема, связанная с химическим составом подземных вод – наличие примесей природного происхождения в концентрациях, существенно превышающих регламенты [1, 2, 3]. Причем, речь идет не только о макрокомпонентах, таких как кальций, магний, натрий, железо, кремний, но и микрокомпонентах – свинец, цинк, медь, бор, кадмий, молибден, селен, марганец и др. Перечень химических элементов в подземных водах может достигать от 50 до 80 наименований, а концентрации от минимальных, не представляющих никакой опасности для человека, до значительных, определяющих формирование риска здоровью населения. Надо учесть, что на таких территориях население обеспечивается питьевой водой с нестандартными санитарно-химическими показателями на безальтернативной основе, причем не одно десятилетие, что определяет еще большую актуальность обозначенной проблемы. Немаловажное значение имеет факт сложности внедрения управленческих мер в связи с недостаточной разработкой современных методов кондиционирования питьевой воды с особенностями ранее указанного качественного состава.

Целью нашей работы явилось изучение особенностей химического состава подземных вод на территории Рязанской области на предмет содержания бора. На территории Рязанской области в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения используются исключительно подземные. Ранее проведенные научные исследования [4, 5] позволили дать оценку качества питьевой воды по таким показателям как жесткость, фтор, железо, минерализация, установить силу и направленность связи между заболеваемостью населения и соответствием ее качественного состава [3, 6, 7, 8], обосновать внедрение перспективных технологий водоподготовки [6, 9, 10]. В результате модернизации лабораторной базы санитарно-эпидемиологической службы и, как следствие, совершенствование контроля за качеством питьевой воды был расширен спектр определяемых санитарно-химических показателей природного происхождения. В результате было установлено, что ряд водоисточников характеризуется значительным содержанием бора. Бор - вещество 2 класса опасности, ПДК 0,5 мг/л, лимитировано по санитарно-токсикологическому показателю вредности. В связи с тем, что факт антропогенного происхождения бора в питьевой воде исключается из-за отсутствия возможных источников загрязнения подземных вод на территории области, без всякого сомнения принято, что источником бора служат различные борсодержащие породы. Хроническое поступление бора в организм человека может привести к раздражению желудочно-кишечного тракта, исходом которого возможно развитие борного энтерита. Поражение центральной нервной системы, печени, почек, нарушение репродуктивной функции являются следствием хронической интоксикации. В ходе продолжительных исследований, проведенных на животных, выявлены и отдаленные последствия – эмбриотоксическое воздействие, сопровождающееся возникновением дефектов у новорожденных. Все это явилось предпосылками к проведению данной работы.

Материалы и методы исследования

Гигиеническая оценка качества питьевой воды проведена по данным лабораторных испытаний, выполненных ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской области» как в рамках социально-гигиенического мониторинга, так и при проведении контрольно-надзорных мероприятий, проводимых Управлением Роспотребнадзора по Рязанской области. Всего проанализировано 7938 протоколов лабораторных испытаний за период с 2015 по 2020 годы, выполненных флуориметрическим методом по ГОСТ 31949-2012 «Вода питьевая. Метод определения содержания бора».

С помощью метода сравнительного анализа был выявлен процент нестандартных проб питьевой воды, не отвечающих требованиям СанПиН «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения», по содержанию бора. Полученные лабораторные данные явились основой метода гигиенического картографирования, позволяющего визуализировать полученную информацию.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований установлено, что из 7938 проб питьевой воды на содержание бора 858 не отвечают гигиеническим требованиям, установленным СанПиН «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения», что составило 10,8%. (см. таблицу 1).

Таблица 1. Динамика количества отобранных проб питьевой воды из подземных водоисточников Рязанской области для анализа содержания бора в период с 2015 по 2020 гг

Годы	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Отобрано проб	1129	1095	1426	1370	1470	1448

Таблица 2. Групповое распределение количества и доли проб питьевой воды из подземных водоисточников Рязанской области с превышением ПДК по содержанию бора в период с 2015 по 2020 гг.

Годы	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	абс.	отн.	абс.	отн.	абс.	отн.	абс.	отн.	абс.	отн.	абс.	отн.
Всего	126	11,2%	173	15,8%	148	10,4%	139	10,2%	136	9,3%	136	9,4%
От 1 до 2 ПДК	116	10,3%	152	13,8%	131	9,2%	113	8,2%	102	6,9%	98	6,8%
От 2 до 5 ПДК	10	0,9%	21	1,9%	17	1,6%	26	2%	34	2,4%	38	2,6%

С целью определения степени превышения нормативных требований все полученные результаты испытаний разделены на группы (см. таблицу 2). В первой представлено количество проб, в которых концентрация составила от 1,1 до 2 ПДК, во второй группе – от 2,1 до 5 ПДК, и в третьей группе – превышающие 5,1 ПДК. В первую очередь следует отметить, что проб с содержанием бора в концентрациях, превышающих 5,1 ПДК, не выявлено. В таблице 2 представлены данные по количеству проб, не соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям по содержанию бора. В связи со значимостью проблемы объем проведенных исследований существенно увеличился с 1129 проб в 2015 году до 1448 в 2020 году, что по-

зволяет дать более объективную оценку проводимым исследованиям. Процент нестандартных проб имеет тенденцию к незначительному снижению от 11,2% в 2015 году до 9,4% в 2020 году. Соответственно, возрастает относительное количество проб в пределах нормативных показателей – от 88,8% в 2015 году до 90,6% в 2020 году.

Определенный интерес представляет распределение нестандартных проб по указанным выше группам. Если процент нестандартных проб с содержанием бора от 1,1 до 2 ПДК снижается с 10,3% в 2015г и 13,8% 2016г соответственно до 6,8% в 2020г, то третья группа (2,1 до 5 ПДК) характеризуется небольшим повышением относительных показателей с 0,9% до 2,4%. Данное наблюдение согласуется с природным характером загрязнения воды и необходимостью выбора современных подходов, направленных на обеспечение населения доброкачественной питьевой водой.



Рис. 1. Динамика количества отобранных проб питьевой воды из подземных водоисточников Рязанской области для анализа содержания бора в период с 2015 по 2020 гг.



Рис. 2. Динамика доли проб питьевой воды из подземных водоисточников Рязанской области, не соответствующих гигиеническим требованиям по содержанию бора в период с 2015 по 2020 гг.

Анализ нестандартных проб питьевой воды по содержанию бора по муниципальным районам показал, что в ряде районов зафиксировано превышение в пределах 2 ПДК – Путя-

тинский, Сапожковский, Шацкий, Ухоловский, Спасский. В таких районах, как Клепиковский, Касимовский, Шиловский, Рязанский зафиксировано превышение бора от 2,1 до 5 ПДК, что представляет наибольшую опасность здоровью населения и требует особого внимания к состоянию хозяйственно-питьевого водоснабжения на этих территориях. Полученные данные явились основой гигиенического картографирования, которое позволило характеризовать санитарно-гигиеническое состояние водоисточников по содержанию одного из приоритетных загрязнителей отобразить пространственно и выделить три категории территорий (см. рис.3).

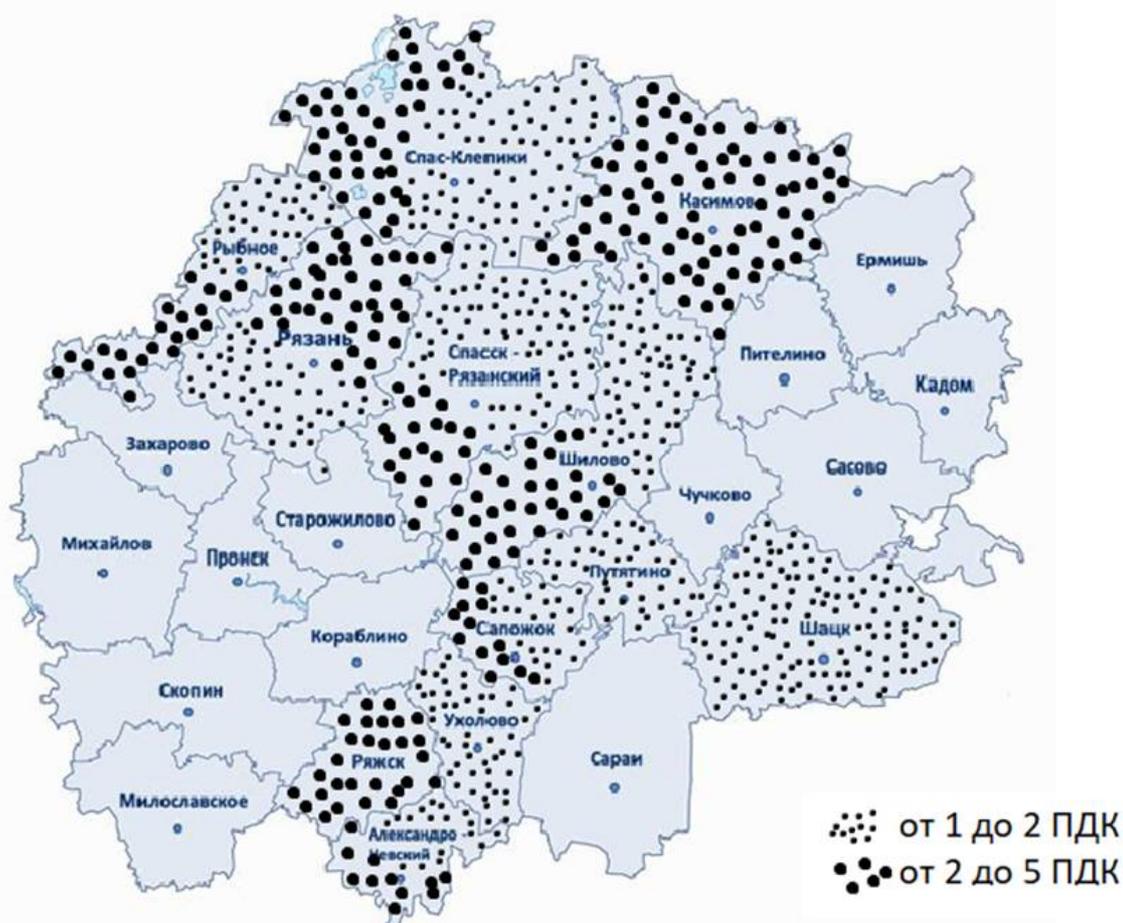


Рис. 3. Гигиеническая карта характеристики питьевой воды по содержанию бора в районах Рязанской области

К первой категории – благоприятные - отнесены те, где содержание бора в питьевой воде не превышает стандартов. Вторая категория охватывает районы, где незначительные отклонения от гигиенических норм, что является допустимым, но в определенных временных рамках. И третья категория объединила районы с существенным превышением до 5 ПДК. Полученное распределение может быть использовано при организации артезианского водоснабжения с одновременным учетом характеристик водоносных горизонтов Рязанской области (пять гидрогеологических районов на карте сайта ООО «Бургидропроект») [11].

Выводы

Концентрация бора в питьевой воде на территории Рязанской области определяется разным уровнем его содержания в бороносных породах. Природный характер загрязнения, безальтернативность в выборе источников хозяйственно-питьевого водоснабжения требуют

выбора современных подходов, направленных на обеспечение населения доброкачественной питьевой водой с учетом минимизации экономических затрат при дефицитном бюджетном финансировании этой сферы жизнеобеспечения населения Рязанской области.

Библиографический список

1. Михайличенко, К.Ю. Интегральная оценка качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения / К.Ю. Михайличенко, А.Ю. Коршунова, А.И. Курбатова // Вестник Российского университета дружбы народов. - 2014, №4. - С. 99-107.
2. Карасева, Н.И. Интегральная оценка качества воды реки Оки как основного источника хозяйственно-питьевого водоснабжения города Рязани (на примере Соколовского водозабора) / Н.И. Карасева, М.Н. Дмитриева, Д.В. Кулюкин // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2018. Сборник трудов международного научно-технического форума: в 11 томах под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязанский государственный радиотехнический университет. - Рязань, 2018. - С. 97-100.
3. Бакуменко, Л.П. Статистический анализ влияния качества питьевой воды на здоровье населения региона / Л.П. Бакуменко, П.А. Коротков // Прикладная эконометрика. - 2011, №2(22) - С.32-48.
4. Анализ сезонных изменений качества воды реки Оки, выявленных методом интегральной оценки / А.С. Соколовская, А.А. Шаров, И.Е. Ворошилина, М.Н. Дмитриева, Н.И. Карасева, И.А. Акимова // Материалы II Всероссийской конференции студентов и молодых ученых с международным участием "Естественнонаучные основы медико-биологических знаний". 2019. С. 188-191.
5. Карасева, Н.И. Технология комплексной оценки качества воды источника городского водоснабжения (на примере реки Оки) / Н.И. Карасева, М.Н. Дмитриева // Окружающая среда и здоровье населения: материалы XXX Всероссийской науч.-практ. конф. (Казань, 29 марта 2019г.) – Казань: Участок ротационной печати НБ КГМА, 2019. – С. 30-32.
6. Карасева Н.И., Дмитриева М.Н. Обоснование необходимости интегральной оценки качества воды и ее использование на примере Борковского водозабора на реке Оке / Материалы 69-ой Международной научно-практической конференции «Инновационное научно-образовательное обеспечение агропромышленного комплекса» 25 апреля 2018 г., Рязань: РГАТУ, 2018. – ч.1, С. 135-139.
7. Анализ влияния качественного состава питьевой воды на частоту заболеваний ЖКТ (на примере нескольких районов Липецкой области) / Н.И. Карасева, М.Н. Дмитриева, Р.П. Абрамова, А.Л. Варакута // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2020. Сборник трудов III Международного научно-технического форума: в 10 т.. - Рязань, 2020. - С. 83-88.
8. Кабанов, А.Н. Статистический анализ данных и процессов с помощью программы MS EXCEL и аналитической платформы DEDUCTOR при обучении студентов медицинского вуза / А.Н. Кабанов, Н.В. Дорошина, М.Н. Дмитриева // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сборник трудов международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. Рязанский государственный радиотехнический университет; Под общей редакцией О.В. Миловзорова. - Рязань, 2016. - С. 80-83.
9. Дмитриева, М.Н. Показатели вариации признака и их значение в статистической обработке данных медицинских исследований // Материалы ежегодной научной конференции / Рязанский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова. – Рязань, 2013. – С. 382–383.
10. Карасева Н.И., Дмитриева М.Н. Оценка аэрогенного риска здоровью населения при воздействии химических веществ воздушной среды закрытых помещений / Инновационные технологии в науке, транспорте и образовании: сборник статей международной научно-методической интернетконференции / под общ. ред. О.И. Садыковой, Е.И. Саниной, К.А. Сергеева, З.Л. Шулимановой. — Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2018. — С. 189-194.
11. Гидрогеологическая характеристика Рязанской области [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.burghp.ru/gidrogeologiya-ryazanskaya-oblast.php>. – Дата доступа: 01.03.2021.

УДК 004.942:678.027.36; ГРНТИ 61.01.77, 61.61.13

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СОЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РУКАВНОЙ ПЛЕНКИ ПО МЕТОДУ ПРАТТА

А.Н. Полосин, А.С. Артюхов

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт(технический университет),
Российская Федерация, Санкт-Петербург, polosin-1976@mail.ru*

Аннотация. В работе описана математическая модель процесса одношнековой соэкструзии с внешним комбинированием потоков расплавов полимеров, являющегося ключевой стадией производства упаковочной двухслойной рукавной пленки. Модель построена на основе законов сохранения физических субстанций и реологии расплавов полимеров. Она позволяет рассчитать распределения давления, температуры, вязкости расплава по длине канала шнека, индекс деструкции, степень смешения экструдата и производительность для каждого экструдера, подключенного к соэкструзионной головке, в зависимости от управляющих воздействий. Модель настраивается на конфигурации и геометрические параметры экструзионного оборудования, типы экструдированных полимеров. Программное обеспечение, реализующее модель, позволяет решать задачу выбора управляющих воздействий на экструдеры, обеспечивающих заданную производительность и качество каждого слоя экструдата.

Ключевые слова: математическое моделирование, программное обеспечение, производительность, показатели качества, процесс соэкструзии, полимеры, рукавная пленка.

MATHEMATICAL MODEL OF POLYMER COEXTRUSION AT THE PRODUCTION OF BLOWN FILM BY THE PRATT METHOD

A.N. Polosin, A.S. Artyukhov

*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University),
Russia, Saint-Petersburg, polosin-1976@mail.ru*

The summary. The paper describes a mathematical model of single-screw coextrusion with external combination of polymer melt flows. Coextrusion is a key stage in the production of packing two-layer blown film. The model is based on the conservation laws of physical substances and the rheology laws of polymer melts. It allows calculating the distributions of melt pressure, temperature viscosity along the screw channel length, the destruction index and mixing degree of the extrudate, and the throughput for each extruder connected to the coextrusion die, depending on the controlling actions. The model is adjusted for configurations and geometric parameters of extrusion equipment, types of extruded polymers. The software that implements the model makes it possible to solve the problem of calculating controlling actions on the extruders that ensure the required throughput and quality of each extrudate layer.

Keywords: mathematical modeling, software, throughput, quality indices, coextrusion, polymers, blown film.

Повышенный спрос на полимерные пленки для упаковки пищевых продуктов и фармацевтических препаратов, приводящий к ежегодному росту мирового рынка тароупаковочных средств более чем на 3 %, способствует интенсивной разработке и внедрению в промышленность инновационных технологических решений. Они связаны с совершенствованием рецептур пленок, оборудования для их изготовления и систем управления технологическими процессами для повышения производительности и выполнения жестких требований заказчиков к качеству (безопасности, механической прочности, барьерным свойствам, внешнему виду, цвету) целевой продукции. Одним из таких решений является организация производства многослойных пленок, которая позволяет получить новую продукцию, обладающую положительными характеристиками каждого из отдельных ее компонентов. Наиболее перспективным методом изготовления многослойных пленок является соэкструзия полимеров, образующих отдельные слои пленки, с последующим раздувом многослойного экструдата до рукава (пузыря), охлаждением и складыванием рукава. Соэкструзионно-раздувной метод характеризуется гибкостью и компактностью технологической схемы, экономичностью при производстве широкого ассортимента рукавных пленок по числу, толщине и типам полимерных слоев, ширине и цвету (пленки, полученные соэкструзией, на 15–25 % дешевле материалов, изготовленных кашированием или клеевым способом), высокой производительностью.

При производстве двухслойных рукавных пленок широко применяется метод Пратта, который заключается в том, что подготовленные в двух одношнековых экструдерах расплавы полимеров, образующих слои будущей пленки, одновременно подаются в общую кольцевую соэкструзионную головку, имеющую два формирующих зазора [1]. В головке два потока расплавов движутся через два полностью изолированных канала, формируются в кольцевых зазорах и сливаются только после выхода из них (внешнее комбинирование потоков), образуя двухслойную трубчатую заготовку. Преимуществом метода является возможность экструдировать расплавы со значительно различающимися вязкостями при разных температурах.

Многоассортиментный характер производства пленок приводит к необходимости частых переходов производственных линий на новые задания по типу пленки. Число таких перенастроек может достигать 30 и более в месяц. Потери времени на перенастройки составляют около 20 %, что приводит к снижению производительности процесса и ухудшению качества пленки (в частности, появлению поверхностных дефектов, например, потемнения полотна вследствие термической деструкции экструдированных полимеров), увеличению невозвратных отходов (потери дорогостоящего сырья достигают 10 % от производительности) и, как следствие, повышению себестоимости пленки. Показатели качества пленки зависят от характеристик процесса соэкструзии. Так, соотношение толщин слоев пленки напрямую определяется объемными производительностями экструдеров, нагнетающих расплавы полимеров в соэкструзионную головку, а наличие поверхностных дефектов – тепловым состоянием и материальной однородностью расплавов. Учитывая ограниченные возможности контроля на производстве выходных параметров процесса соэкструзии и, как следствие, неполноту информации о состоянии объекта, эффективное решение задач выбора управляющих воздействий на процесс, обеспечивающих заданную производительность экструдеров и качество каждого слоя экструдата при перенастройках линии на новые задания, невозможно без применения методов математического моделирования и информационных технологий. Поэтому актуальна разработка физически обоснованной и настраиваемой на характеристики процесса соэкструзии математической модели течения и формования расплавов полимеров в каналах шнеков экструдеров и соэкструзионной головки, предназначенной для управления процессом соэкструзии при перенастройках на различные типы полимерных пленок.

Постановка задачи управления процессом соэкструзии

Анализ характеристик процесса соэкструзии полимеров при изготовлении рукавной пленки по методу Пратта позволил составить его информационное описание, включающее векторы входных параметров X , управляющих воздействий U и выходных параметров Y :

$$Y = F(X, U), Y = \{Q_i, T_{exti}, I_{di}, \bar{\gamma}_i, i = \overline{1,2}\}, X = \{T_{film}, G_{equip}\}, U = \{N_i, T_{bik}, k = \overline{1, n_{Ti}}, T_{scri}\},$$

$$T_{film} = \{\delta_l, T_{pl}, l = \overline{1,2}\}, G_{equip} = \{G_{extrud}, G_{die}\},$$

$$G_{extrud} = \{D_i, L_i^j, B_i^j, H_i^j, z_{fi}^j, e_i^j, \delta_{0i}^j, j = \overline{1, N_{ei}}, i = \overline{1,2}\}, G_{die} = \{d_{outi}, d_{ini}, l_i, i = \overline{1,2}\}.$$

Входными параметрами процесса являются тип пленки T_{film} , определяемый толщиной δ_l и типом полимера T_{pl} каждого l -го слоя пленки, и геометрические параметры оборудования G_{equip} , включающие параметры одношнековых экструдеров G_{extrud} и соэкструзионной головки G_{die} . Для обеспечения переработки широкого ассортимента полимеров шнеков каждого i -го экструдера, имеющий диаметр D_i , составляется из N_{ei} элементов различных типов [2]. Каждый j -й элемент шнека характеризуется длиной L_i^j , шагом нарезки B_i^j , глубиной

канала H_i^j , числом заходов z_{fi}^j и толщиной витков e_i^j нарезки, радиальным зазором δ_{0i}^j между корпусом и витками нарезки. Каждый i -й кольцевой формирующий зазор головки, питаемый расплавом, подготовленным i -м экструдером, характеризуется диаметрами наружной и внутренней стенок d_{outi} , d_{ini} и длиной l_i . К управляющим воздействиям на i -й экструдер относятся частота вращения шнека N_i , температуры n_{Ti} тепловых зон обогреваемого (маслом) корпуса T_{bik} и температура охлаждаемого (водой) шнека T_{scri} . Выходными параметрами процесса являются объемная производительность i -го экструдера Q_i и показатели теплового состояния (температура T_{exti} , индекс термодеструкции I_{di}) и материальной однородности (средняя степень смещения $\bar{\gamma}_i$) экструдата, подготавливаемого i -м экструдером.

На основе информационного описания процесса созкструзии сформулирована задача управления, которая заключается в следующем: при перенастройке экструзионной линии, имеющей геометрические параметры G_{equip} , на новый тип пленки T_{film} варьированием управляющих воздействий в регламентных диапазонах $U \subset [U^{\min}; U^{\max}]$ по математической модели процесса созкструзии найти такие значения управляющих воздействий U^* , которые обеспечивают заданную производительность экструдеров и качество каждого слоя экструдата:

$$|Q_{0i} - Q_i|/Q_{0i} \leq \varepsilon, I_{di} \leq I_{di}^{\max}, \bar{\gamma}_i \geq \bar{\gamma}_i^{\min}, i = \overline{1,2},$$

где Q_{0i} , ε - заданная объемная производительность i -го экструдера (формируется в зависимости от требуемой толщины соответствующего слоя пленки δ_l , $l = i$ с учетом степени раздува рукава) и предельно допустимое относительное отклонение от нее;

I_{di}^{\max} , $\bar{\gamma}_i^{\min}$ - пороговые значения показателей качества расплава полимера, образующего соответствующий слой пленки, формируемые в зависимости от типа полимера T_{pl} , $l = i$.

Выполнение ограничений на показатели качества расплавов, образующих слои пленки, гарантирует получение пленки без дефектов, вызванных перегревом и неоднородностью.

Структура математической модели процесса созкструзии

Анализ описанных в литературе математических моделей процессов одношнековой экструзии показал, что они являются детерминированными, основываются на законах сохранения физических субстанций и реологии расплавов полимеров и позволяют учесть неньютоновский (аномально-вязкий) характер течения расплавов в каналах шнеков экструдеров, диссипативный разогрев расплава, теплообмен расплава с корпусом и шнеком [3]. Однако при этом часто принимаются упрощения, существенно увеличивающие погрешность модели: отсутствие циркуляционного потока расплава в канале шнека и потока утечки расплава через радиальный зазор между корпусом и витками нарезки элементов шнека, описание теплообмена на границах «расплав–корпус» и «расплав–шнек» на основе условий Дирихле (допущение о бесконечно больших коэффициентах теплоотдачи). Кроме того, никак не учитывается модульность шнека. Предлагаемая в настоящей работе модель, позволяя устранить указанные недостатки, описывает течение и нагрев расплавов полимеров в каналах модульных шнеков двух одношнековых экструдеров и формование расплавов в кольцевых зазорах созкструзионной головки. Зоны уплотнения, нагрева и плавления твердого полимера не рассматриваются, так как наиболее существенное влияние на производительность одношнекового экструдера, тепловое состояние и однородность экструдата оказывает зона перемешивания и нагрева расплава. При построении модели приняты допущения об обратном дви-

жении корпуса и шнека, малости кривизны канала элемента шнека, установившемся по длине канала и времени течения и теплообмене, постоянстве теплофизических свойств полимера, несжимаемости расплава, отсутствии проскальзывания расплава на стенках канала, малости инерционных и массовых сил по сравнению с силами вязкого трения. Вдоль осиканала преобладает конвективный перенос теплоты, а в радиальном направлении – перенос теплоты теплопроводностью. Теплообмен расплава с корпусом и шнеком описывается законом Ньютона–Рихмана. Применение указанных допущений к законам сохранения реологии позволило сформировать систему уравнений, описывающих течение и нагрев расплавленного полимера l -го типа в прямоугольном канале j -го элемента шнека i -го экструдера:

– уравнения материального баланса

$$\int_0^{H_i^j} v_{xi}^j dy = \dot{Q}_{\delta i}^j, W_i^j \int_0^{H_i^j} v_{zi}^j dy = Q_i^j, Q_i = z_{fi}^j Q_i^j - Q_{\delta i}^j; \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\delta i}^j = \frac{\delta_{0i}^j v_{xi}^j \Big|_{y=H_i^j}}{2} + \frac{B_i^j \cdot (\delta_{0i}^j)^3}{12 z_{fi}^j \eta_{\delta i}^j \sin \varphi_i^j (e_i^j \cos \varphi_i^j + \delta_{0i}^j)} \frac{\partial P_i^j}{\partial z}, Q_{\delta i}^j = Z_i^j \dot{Q}_{\delta i}^j; \quad (2)$$

– уравнения баланса сил давления и вязкого трения ($0 < y < H_i^j, z_i^{j-1} < z \leq z_i^{j-1} + Z_i^j$)

$$\frac{\partial P_i^j}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xyi}^j}{\partial y}, \frac{\partial P_i^j}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zyi}^j}{\partial y}; \quad (3)$$

– реологическая модель расплава ($0 < y < H_i^j$)

$$\tau_{xyi}^j = \eta_i^j \frac{dv_{xi}^j}{dy}, \tau_{zyi}^j = \eta_i^j \frac{dv_{zi}^j}{dy}, \eta_i^j = \mu_i^j \left[\left(\frac{dv_{xi}^j}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dv_{zi}^j}{dy} \right)^2 \right]^{\frac{n_i-1}{2}}, \mu_i^j = \mu_{0i} e^{-b_l (T_i^j - T_{0i})}, l = i; \quad (4)$$

– уравнение теплового баланса ($0 < y < H_i^j, z_i^{j-1} < z \leq z_i^{j-1} + Z_i^j$)

$$\rho_l c_{Pl} v_{zi}^j \frac{\partial T_i^j}{\partial z} = \lambda_l \frac{\partial^2 T_i^j}{\partial y^2} + \tau_{xyi}^j \frac{dv_{xi}^j}{dy} + \tau_{zyi}^j \frac{dv_{zi}^j}{dy}, l = i; \quad (5)$$

– граничные условия на входе в канал

$$j = 1: P_i^j \Big|_{z=z_i^0=0} = P_{0i}, T_i^j \Big|_{z=z_i^0=0} = T_{mi}; j = \overline{2, N_{ei}}: P_i^j \Big|_{z=z_i^{j-1}} = P_i^{j-1} \Big|_{z=z_i^{j-1}}, T_i^j \Big|_{z=z_i^{j-1}} = T_i^{j-1} \Big|_{z=z_i^{j-1}}; \quad (6)$$

– граничные условия на дне и верхней стенке канала

$$v_{xi}^j \Big|_{y=0} = v_{zi}^j \Big|_{y=0} = 0, v_{xi}^j \Big|_{y=H_i^j} = -\pi D_i N_i \sin \varphi_i^j, v_{zi}^j \Big|_{y=H_i^j} = \pi D_i N_i \cos \varphi_i^j, \quad (7)$$

$$-\lambda_l \frac{\partial T_i^j}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{scri} (T_i^j \Big|_{y=0} - T_{scri}), -\lambda_l \frac{\partial T_i^j}{\partial y} \Big|_{y=H_i^j} = \alpha_{bik} (T_{bik} - T_i^j \Big|_{y=H_i^j}), l = i, k = \overline{1, n_{Ti}}, \quad (8)$$

где v_{xi}^j, v_{zi}^j - скорости циркуляционного и поступательного потоков расплава, м/с;

x, y, z - координаты по ширине W_i^j , глубине H_i^j и длине Z_i^j канала элемента, м;

$\dot{Q}_{\delta i}^j, Q_{\delta i}^j$ - интенсивность (м²/с) и расход (м³/с) потока утечки через радиальный зазор;

Q_i^j - расход поступательного потока через канал элемента, м³/с;

$\eta_{\delta_i}^j, \eta_i^j$ - вязкость расплава в радиальном зазоре и канале элемента, Па·с;

φ_i^j - угол наклона витков нарезки элемента, рад;

P_{0i}, P_i^j - давление расплава на входе в канал шнека и в канале элемента, Па;

z_i^{j-1} - координата входного сечения канала j -го элемента, м;

$\tau_{xyi}^j, \tau_{zyi}^j$ - напряжения трения в циркуляционном и поступательном потоках, Па;

μ_i^j, μ_{0l} - коэффициент консистенции расплава при температуре расплава в канале элемента T_i^j и температуре приведения T_{0l} , Па·с ^{n_l} ;

n_l, b_l - индекс течения и температурный коэффициент вязкости (1/°C) расплава;

$\rho_l, c_{pl}, \lambda_l$ - плотность (кг/м³), теплоемкость (Дж/(кг·°C)), теплопроводность (Вт/(м·°C));

T_{ml} - температура перехода твердого полимера в вязкотекучее состояние расплава, °C;

$\alpha_{scri}, \alpha_{bik}$ - коэффициенты теплоотдачи от расплава к поверхности сердечника шнека и от внутренней поверхности корпуса в k -й тепловой зоне к расплаву, Вт/(м²·°C).

Формула (2) для расчета интенсивности потока утечки получена путем аналитического интегрирования уравнений несжимаемости и движения расплава, имеющего температуру, равную средней температуре \bar{T}_i^j , вязкость $\eta_{\delta_i}^j$ и текущего в плоской щели. Щель имеет ширину Z_i^j , высоту δ_{0i}^j и длину $e_i^j \cos \varphi_i^j$. Вязкость $\eta_{\delta_i}^j$ рассчитывается по реологической модели (4) при скорости деформации сдвига расплава в зазоре $\dot{\gamma}_{\delta_i}^j = \pi D_i N_i / \delta_{0i}^j$ и средней температуре. Средняя по глубине канала температура расплава \bar{T}_i^j вычисляется по уравнению притока теплоты, полученному аналитическим интегрированием уравнения теплового баланса (5) по координате y с использованием правила Лейбница, уравнений балансов по потокам (1) и сил (3), граничных условий (7), (8), формулы интегрирования по частям:

$$\rho_l c_{pl} Q_i^j \frac{d\bar{T}_i^j}{dz} = W_i^j \left[\alpha_{bik} (T_{bik} - \bar{T}_i^j) - \alpha_{scri} (\bar{T}_i^j - T_{scri}) \right] + W_i^j \left(v_{xi}^j \Big|_{y=H_i^j} \tau_{xyi}^j \Big|_{y=H_i^j} + v_{zi}^j \Big|_{y=H_i^j} \tau_{zyi}^j \Big|_{y=H_i^j} \right) - Q_i^j \frac{\partial P_i^j}{\partial z} - W_i^j \dot{Q}_{\delta_i}^j \frac{\partial P_i^j}{\partial x}, \quad l = i. \quad (9)$$

Такое интегрирование обосновано вследствие наличия циркуляционного потока, способствующего перемешиванию расплава и повышению его температурной однородности.

Модель (1)–(4), (6)–(9) настраивается на тип и геометрические параметры каждого элемента шнека (путем означивания параметров вектора G_{extrud}) и на тип полимера (путем означивания коэффициентов модели $K = \{T_{ml}, \rho_l, c_{pl}, \mu_{0l}, b_l, T_{0l}, n_l, \alpha_{scri}, \alpha_{bik}, l = i = \overline{1, 2}, k = \overline{1, n_{Ti}}\}$).

Согласно заданной конфигурации шнека модели течения в каналах элементов компонуются между собой на основе условий сопряжения элементов (6), определяющих, что значения давления и температуры на входе в канал элемента равны значениям этих параметров на выходе из канала предыдущего элемента. Сформированная модель течения в канале модульного шнека i -го экструдера компонуется с моделью течения в i -м формующем зазоре головки, в который расплав подается из i -го экструдера. Модель течения в формующем зазоре основывается на уравнении Пуазейля для потока аномально-вязкой жидкости, описываемой реологической моделью (4), и позволяет рассчитать давление на входе в зазор в зави-

симости от коэффициента консистенции μ_{di} и коэффициента сопротивления зазора k_{di} :

$$P_{di} = \mu_{di} \left(\frac{Q_i}{k_{di}} \right)^{n_i}, \mu_{di} = \mu_i^{N_{ei}}, k_{di} = \frac{\pi \cdot (d_{outi} - d_{ini})^{2+1/n_i} \cdot (d_{outi} + d_{ini})}{4^{2+1/n_i} \cdot (2+1/n_i) \cdot l_i^{1/n_i}}, l = i. \quad (10)$$

Производительность системы « i -й экструдер – i -й зазор головки» рассчитывается методом итераций. При каждом новом приближении для расхода Q_i последовательно по всем N_{ei} элементам шнека с учетом условий сопряжения (6) рассчитываются расходы Q_i^j , $Q_{\delta i}^j$ и распределения давления P_i^j , температуры \bar{T}_i^j и вязкости η_i^j расплава по длине каждого элемента. Для этого уравнения (1)–(4), (9) решаются с использованием вычислительной схемы, основанной на теории плоских несимметричных потоков в неизотермических условиях [4]. Поиск расхода Q_i продолжается, пока не выполнится условие сопряжения шнека и головки $|1 - P_{di}/P_{si}| \cdot 100 \leq \varepsilon_p$, где $P_{si} = P_i^{N_{ei}}$, ε_p - предельная погрешность поиска рабочей точки экструдера. Расход Q_i , при котором это условие выполняется, определяет объемную производительность i -го экструдера и температуру i -го слоя экструдата $T_{exti} = \bar{T}_i^{N_{ei}}$, в зависимости от которых вычисляются индекс термодеструкции I_{di} и средняя степень смешения $\bar{\gamma}_i$ [2].

Математическая модель реализована в виде программного обеспечения (ПО), разработанного в среде визуального объектно-ориентированного программирования VisualStudio (язык программирования C#). ПО настраивается на конфигурации шнеков экструдеров, типы экструдруемых полимеров и позволяет рассчитать (в зависимости от управляющих воздействий U) и визуализировать на интерфейсе исследователя распределения параметров состояния расплава по длине канала модульного шнека и объемную производительность каждого экструдера, а также показатели качества каждого слоя экструдата (рисунок 1).

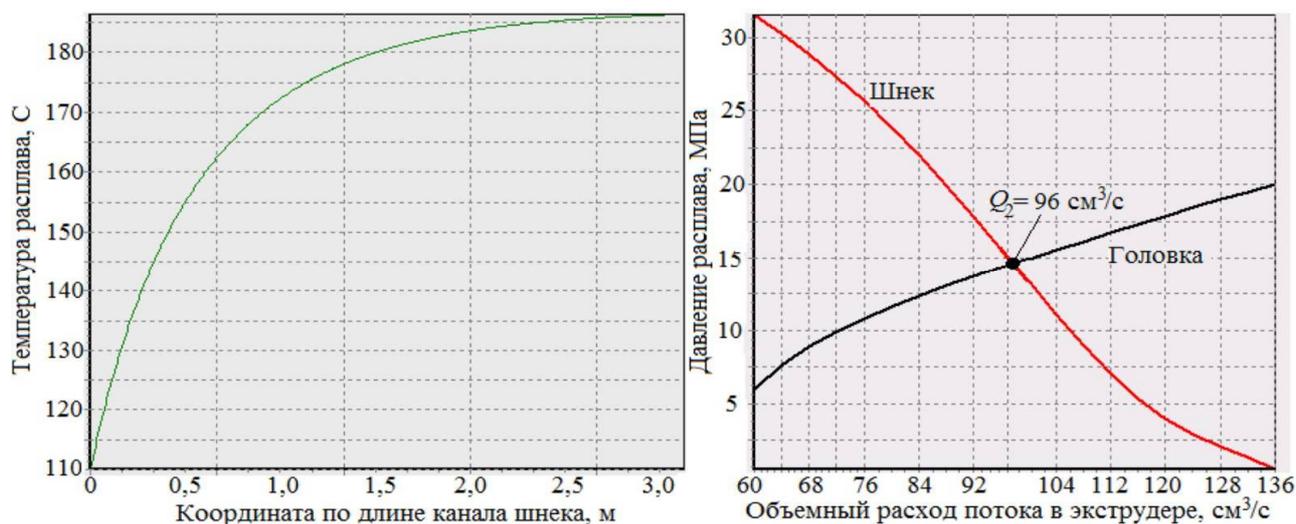


Рис. 1. Характеристики процесса подготовки слоя расплава полиэтилена в экструдере диаметром 0,12 м

Тестирование ПО по данным процессов соэкструзии при изготовлении упаковочных двухслойных пленок из полиамида и/или полиолефинов методом Пратта подтвердило адекватность математической модели по критерию Фишера и среднеквадратическому отклонению (не превышает 3 %). ПО позволяет решать задачу выбора управляющих воздействий, обеспечивающих заданную производительность экструдеров и качество слоев экструдата.

Библиографический список

1. Шерышев, М.А. Переработка листов из полимеров / М.А. Шерышев, В.С. Ким. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.
2. Чистякова, Т.Б. Математические модели и программный комплекс для управления экструзионными процессами в гибких многоассортиментных производствах полимерных материалов / Т.Б. Чистякова, А.Н. Полосин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Математическое моделирование и программирование». – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 5-28.
3. Multipurposecomputermodelforscrewprocessingofplastics / K. Wilczyński, A. Nastaj, A. Lewandowski, K.J. Wilczyński // Polymer-PlasticsTechnologyandEngineering. – 2012. – Vol. 51, № 6. – Pp. 626-633.
4. Полосин, А.Н. Технология моделирования неизотермического течения расплавов полимеров в одношнековых экструдерах на базе теории плоских потоков / А.Н. Полосин // Информационные технологии моделирования и управления. – 2007. – № 3. – С. 376-386.

УДК 510.2; ГРНТИ 27.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕКСА ХИРША-МИРОНОВА ЦИТИРОВАНИЯ СТАТЕЙ

Д.Р. Бабаев, С.А. Ларинский

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, babaev.daniil.r@gmail.com, s.larinskiy@gmail.com*

Аннотация. Проведено программное моделирование индекса цитирования Хирша-Миронова (оценки публикационной активности автора). Новые индексы просты в использовании, обработке и включают в себя уже привычную для научного сообщества методологию индекса Хирша и одновременно принципиально новую методологию более точной оценки публикационной активности ученого.

Ключевые слова: библиометрия, наукометрический показатель, индекс Хирша-Миронова, взвешенный М-индекс, новые многомерные индексы цитирования, программа BLMindexsolution.

MODELING THE HIRSH-MIRONOV INDEX OF ARTICLE CITATION

D.R. Babayev, S.A. Larinsky

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, babaev.daniil.r@gmail.com, s.larinskiy@gmail.com*

The summary. The software modeling of the Hirsch-Mironov citation index (assessment of the author's publication activity) has been carried out. The new indices are easy to use, process, and include the Hirsch index methodology that is already familiar to the scientific community and, at the same time, a fundamentally new methodology for a more accurate assessment of a scientist's publication activity.

Keywords: bibliometrics, scientometric index, Hirsch-Mironov index, weighted M - index, new multidimensional citation indices, BLM index solution program.

Индекс Хирша (или h-индекс) – наукометрический числовой показатель [предложенный в 2005 г. американским физиком аргентинского происхождения Хорхе Хиршем (Hirsch, J. E.) из Калифорнийского университета (Сан Диего, США)] для оценки публикационной активности физиков [1]. Идея Хирша получила качественное развитие в работах проф. Миронова В. В. из Рязанского радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина [2 - 3], в которых изложена процедура информатизации оценки публикационной активности ученого, которая, в свою очередь, базируется на более общих принципах всего процесса информатизации науки и образования [4 - 8].

Принципы, на которых основана программная реализация М-индекса цитирования

Для общего понимания сути индекса введем некоторые определения и прокомментируем их.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. М-индекс публикационной активности ученого является совокупностью трех упорядоченных коэффициентов, рассчитанных определенным образом:

$$M = (h, p, q). \quad (1)$$

Здесь h – непосредственно индекс Хирша; a , p , q – новые коэффициенты, принципиальный смысл которых раскрыт ниже.

Сам М-индекс является главной сравнительной характеристикой активности ученых. Именно его расчет является целью нашей работы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2. Взвешенный М-индекс – это М-индекс, в котором учитываются квартили журналов и количество авторов статьи

$$M^* = (h^*, p^*, q^*). \quad (2)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 3. Все данные о ссылках на статьи ученого удобно разместить в Р-таблице, которая состоит из двух столбцов. В первом содержатся номера статей, пронумерованные в диапазоне значений $\overline{1, n}$, где n – количество статей, а во втором количество цитирований этих статей. При этом статьи расположены сверху вниз по мере убывания числа ссылок на них. Статьи с одинаковым числом цитирований располагаются в произвольном порядке. Данные о цитированиях находятся в библиографических базах данных, таких как Scopus или же WebofScience, также эту информацию можно найти в Перечне ВАК.

Для более тонкой оценки активности ученого может потребоваться учет квартилей журналов, в которых опубликованы статьи, и количества авторов статей. Учет квартилей будет отражать уровень цитируемости журнала и, как следствие, востребованность его научным сообществом, а учет количества авторов покажет примерный вклад ученого в научную работу. В таком случае Р-таблица будет расширена на один, если необходимо учитывать только квартиль или количество авторов, или два столбца, в которых будут находиться соответствующие статьям данные о них.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 4. «Рубеж цитирования» – это число μ , определяющее максимально возможное количество цитирований, которое учитывается в подсчете М-индекса. Оно определяется в соответствии со значением индекса Хирша. Возможно всего два случая:

если $h \leq 50$, то фиксированный рубеж цитирования $\mu = 100$;

если $h > 50$, то рубеж цитирования является динамическим и вычисляется по формуле $\mu = 2h$.

Введение рубежа цитирований можно считать обоснованным, если рассматривать М-индекс с точки зрения максимальной объективности, к которой он стремится по своей основной идее. Допустим автор ММ возымел успех с одной статьей и стал очень популярным. Логично предположить, что количество цитирований в таком случае будет очень большим, потому что ссылаться на данную статью будет «модным». Именно этот субъективный фактор и стремится снизить рубеж цитирования. Однако необходимо заметить, что существуют колоссальные по своему влиянию ученые, ограничение количества цитирований работ которых будет ограничивать и их влияние. Получить максимально возможный баланс в данном вопросе позволяют условия установления рубежа цитирований, описанные выше.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 5. «Хвост цитирований» – представляет собой сумму разностей количества цитирований статей и значения индекса Хирша:

$$S_1 = \sum_{i=1}^h (x_i - h), \quad (3)$$

где x_i – количество цитирований i -той статьи.

По факту, это количество цитирований, которое не вошло в расчет индекса Хирша.

Коэффициент p отражает именно значение хвоста цитирований и вычисляется по формуле:

$$p = [\sqrt{S_1}], \quad (4)$$

где [...] – операция взятия целой части числа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 6. «Подвал цитирований» – это сумма цитирований статей, количество цитирований которых совпадает со значением индекса Хирша.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 7. «Рубеж подвала» – это число учитываемых в подвале статей. Он равен значению индекса Хирша. То есть, если таких статей в подвале цитирований больше, чем значение индекса Хирша, то учитывается только такое количество статей, которое равно значению индекса Хирша.

Формула расчета подвала цитирований выглядит следующим образом:

$$S_2 = hu, \quad (5)$$

где u – количество статей, составляющих подвал.

Тогда коэффициент q отражает значение подвала цитирований и вычисляется по формуле:

$$q = [\sqrt{S_2}], \quad (6)$$

где [...] – операция взятия целой части числа.

Стоит сказать о том, как реализуются квартили и количество авторов. По сути, они являются характеристиками для каждой статьи. Они влияют на значения самого индекса Хирша, хвоста и подвала.

Вычисление происходит по следующим формулам:

Индекс Хирша

$$S_0 = \sum_{i=1}^h (hk_i), \quad (7)$$

где h – значение индекса Хирша без учета квартилей и количества авторов,

а [...] – операция взятия целой части числа.

Новый индекс h^* будет вычисляться по формуле:

$$h^* = [\sqrt{S_0}]; \quad (8)$$

хвост цитирований

$$S_1 = \sum_{i=1}^h (x_i - h)k_i, \quad (9)$$

Новый коэффициент p^* будет вычисляться точно так же, как по формуле (3);
подвал цитирований

$$S_2 = \sum_{i=1}^u (hk_i), \quad (10)$$

где u – количество статей, составляющих подвал.

Новый коэффициент q^* будет вычисляться точно так же, как по формуле (5).

В формулах (7), (9), (10) присутствует коэффициент k_i , который вычисляется следующим образом

$$k_i = \frac{1}{m_i v_i}, \quad (11)$$

где m_i – номер квартиля журнала, в котором опубликована i -тая статьи, а v_i – количество авторов i -той статьи, если какая-то из этих характеристик не учитывается, то соответствующий ей коэффициент (m_i или v_i) становится равным единице.

Алгоритм вычисления M -индекса и взвешенного M -индекса

Приведем алгоритм вычисления M -индекса, давая при необходимости пояснения к его шагам.

1. Осуществить ввод данных в P -таблицу: номер статьи, количество ссылок на нее и при необходимости, номер квартиля, количество авторов.
2. Расположить статьи в P -таблицу сверху вниз по мере убывания числа ссылок на них.
3. Вычисляем значение индекса Хирша h : находим максимальное число, для которого выполняются условие $nb_i \geq i$, где nb_i – количество цитирований i -той по счету от начала статьи.
4. Установление границ цитирования согласно рубежу цитирования.
5. Вычисление значений коэффициентов p и q для M -индекса по формулам (4) и (6); в случае, когда нужно вычислить взвешенный M -индекс, вычисляются коэффициенты h^* , p^* , q^* соответственно по формулам (8), (4), (6), при этом S_1 и S_2 для p^* , q^* вычисляются по формулам (9), (10).
6. Для удобства сравнения публикационной активности нескольких авторов введем еще один индекс δ или же просто «Дельта», который для M -индекса вычисляется по формуле:

$$\delta = [|M|] = \sqrt{h^2 + p^2 + q^2}, \quad (12)$$

а для взвешенного M -индекса:

$$\delta^* = [|M^*|] = \sqrt{(h^*)^2 + (p^*)^2 + (q^*)^2}. \quad (13)$$

7. Вывод полученных значений.

Примеры

ПРИМЕР 1. Автор NN_1 опубликовал 1 работу, которая имеет 1 цитирование. Из определений вытекает, что $M = (1, 0, 0)$, $\delta = 1$.

ПРИМЕР 2. Автор NN_2 опубликовал 1 работу, которая имеет 100 цитирований. Из определений вытекает, что $M = (1, 9, 0)$, $\delta = 9$.

ПРИМЕР 3. Автор NN_3 опубликовал 10 работ, из которых первая работа в списке, имеет 100 цитирований, 2-я работа – 90 цитирований, 3-я работа – 80 цитирований и т.д. и 10-я, «последняя» в списке работ имеет 10 цитирований. Из определений вытекает, что $M = (10, 21, 0)$, $\delta = 23$.

ПРИМЕР 4. Автор NN_4 опубликовал 10 работ. Запишем эти статьи следующим набором чисел (1,13,2,1); (2,16,3,2); (3,72,1,6); (4,84,2,5); (5,100,2,10); (6,3,3,1); (7,8,4,1); (8,9,2,1); (9,11,2,4); (10,20,2,3), где на первом месте стоит номер статьи, на втором количество цитирований, на третьем квартиль, на четвертом количество авторов.

Тогда без учета квартилей и авторов: $M = (8, 16, 2)$, $\delta = 18$.

С учетом только квартиля: $M = (5, 12, 1)$, $\delta = 13$.

С учетом количества авторов: $M = (5, 7, 2)$, $\delta = 8$.

С учетом и количества авторов и квартиля: $M = (3, 5, 1)$, $\delta = 5$.

BLMIndexSolution

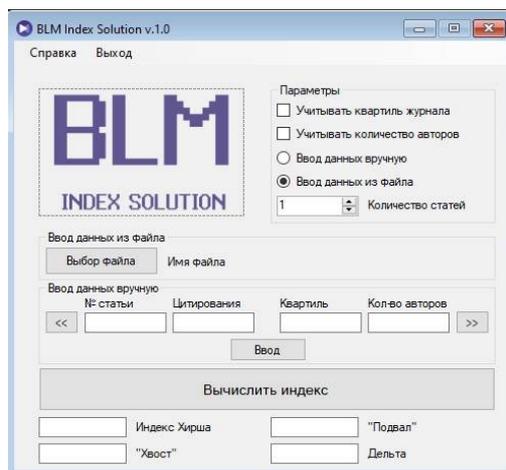


Рис. 1. Интерфейс программы

На рисунке 1 можно видеть интерфейс программы, и какие режимы работы она поддерживает.

Доступно два режима ввода:

- 1) ручной;
- 2) из файла (был добавлен для удобства ввода).

Информация о том, как заполнять текстовый файл для ввода данных в программу, содержится во вкладке «Справка», также там содержится информация об авторах данной статьи и проекта.

Программа может вычислять как M -индекс, так и взвешенный M -индекс.

Минимализм интерфейса обеспечивает интуитивную понятность для всех пользователей, которые захотят рассчитать индекс публикационной активности ученого.

Библиографический список

1. Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America — 2005. — Vol. 102. - № 46. — P. 16569—16572.
2. Mironov V.V. Processing data on the publication activity of the author as part of the team of authors, taking into account quartiles of journals // Scientific and technical information processing. Series 2. Information processes and systems, Allerton Press, Inc. 2020, No. 6, P. 15 – 21.
3. Mironov V.V. New Indices of Publication Activity // Herald of the Russian Academy of Sciences, 2020, No 5, P. 618 – 624.
4. Миронов В.В. Информатизация образования: достижения и проблемы // Информатизация образования и науки. – 2017.- № 4 (36). – С. 3-18.
5. Миронов В.В., Латыпов С.Н. Всеобщая информатизация образования: внутри и вне процесса // Cloud of Science. 2017. Т.4. № 2. С. 126-146.
6. Миронов В.В. Педагогические инновационные технологии в высшей школе: не абсурд ли? / Региональная метод. конференция «Педагогич. инновационные технологии в высшей школе»: Рязань, 1995. С 15 - 19.
7. Valentin V. Mironov, Specificity of communication teacher-student in informational and technological era // SHS Web of Science Conferences, 9, 02028 (2016) DOI: 10.1051 /shsconf/ 2016 EEIA, 2016 2 2902028/
8. Миронов* В.В., Заволокин А.И., Заволокина О.В., Розанов А.К. Введение в системное обеспечение компьютерного анализа текстов (технические интеллектуальные системы). Учебник. / Под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Миронова В.В. - Рязань: «BookJet», 2018. – 298 с.

УДК 629.785; ГРНТИ89.15.15

ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ И НАБЛЮДАЕМОСТИ В ПРИЛОЖЕНИИ К АНАЛИЗУ ДВИЖЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д.А. Девяткова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, devyatkova_2001@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы управляемости МКА и их наблюдаемости в различных условиях и сопутствующие этому процессу задачи. В ходе работы получены новые модели движения объектов относительно БКА и модели управления и наблюдения объектов «в малом».

Ключевые слова: малые космические аппараты (МКА), субспутник (СС), базовый космический аппарат (БКА), космическая цель (КЦ), окрестности управления космической целью (ОКЦ).

OVERVIEW OF THE PROBLEM OF CONTROLLABILITY AND OBSERVABILITY IN THE APPLICATION TO THE ANALYSIS OF THE MOTION OF A SMALL SPACECRAFT

D.A. Devyatkova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, devyatkova_2001@mail.ru*

The summary. The paper deals with the issues of the controllability of MCAS and their observability under various conditions and the problems associated with this process. In the course of the work, new models of the movement of objects relative to the BKA and models of control and observation of objects "in small" were obtained.

Keywords: small spacecraft (MCA), subsatellite (C), base spacecraft (BCA), space target (SC), space target control area (OCC).

Одной из современных тенденций развития космической техники являются создание и эксплуатация малых космических аппаратов (МКА). Относительно небольшая стоимость отдельного МКА позволяет значительно снизить стоимость реализации космических проектов без ущерба для их качества. Так, стало возможным, находясь в рамках ограниченного финансирования, с меньшими затратами создавать и выводить на орбиту вместо одного большого (тяжелого) КА целую группировку МКА, предназначенных для решения общей задачи. Ныне к таким основным задачам МКА относятся: дистанционное зондирование Земли в оптическом и радиодиапазонах, космическая связь, глобальная навигация, астрономические наблюдения, космология, обслуживание базовых космических аппаратов и космических станций, космические роботы и др.

В основу обзора положены монографии [1 - 3] и другие работы лаборатории системного анализа, возглавляемой проф. Мироновым В.В. [4 - 10]. В этих работах рассматриваются МКА типа субспутников (СС) с управлением, т.е. такие МКА, которые стартуют с базового космического аппарата (БКА) и в режиме ограниченного управления достигают космической цели (КЦ). Спутник-инспектор способен с помощью специальной аппаратуры диагностировать техническое состояние отечественных спутников с минимально возможным расстоянием.

Изучаемые задачи могут лежать в следующих плоскостях:

- инспекция;
- орбитальное обслуживание на орбите КА;
- поддержка внекорабельной деятельности космонавтов и т.д.

К основным и актуальным задачам эксплуатации МКА, несомненно, относятся вопросы управляемости такими аппаратами и их наблюдаемости в различных условиях и сопутствующие этому процессу задачи. При этом классическая теория управления нуждается в мо-

дернизации, введении дополнительных ограничений ввиду ограниченных возможностей МКА.

В работах решены актуальные задачи:

- 1) аналитическое моделирование движения МКА относительно БКА в направлении рассчитанной окрестности управления космической целью (ОКЦ);
- 2) численно-аналитическое моделирование управления МКА при его перелете из точки ОКЦ до космической цели, не выходя за пределы наперед заданной пространственной окрестности КЦ;
- 3) численное восстановление состояния движения МКА на протяжении всего процесса достижения КЦ;
- 4) собственно расчет окрестности управления КЦ;
- 5) создание программного комплекса решения всех поставленных задач по анализу движения МКА.

Условие ограниченности пространства для маневра СС и времени движения породило новый подход в теории управления и наблюдения, выражаемый термином «в малом».

Идеи, реализованные в монографии, имеют существенное значение для космической отрасли и одновременно могут быть применены в других технических проектах при управлении объектами в ограниченных условиях.

Целями данной работы являются:

- 1) разработка модели управления СС «в малом» для эффективного достижения цели по критерию минимальности времени;
- 2) разработка модели наблюдения СС «в малом» в процессе достижения цели для контроля движения СС;
- 3) реализация разработанных методов численно-аналитически и алгоритмически для построения программного комплекса автоматического решения задач;
- 4) создание программного комплекса для автоматического решения поставленных задач.

Актуальность исследования и цели работы конкретизированы в задачах исследования:

- 1) создать упрощенную математическую модель движения СС относительно БКА, позволяющую управлять СС в автоматическом режиме для достижения цели за минимальное время;
- 2) модернизировать численный метод и алгоритм определения области достижимости для СС с целью определения моментов переключения управлений;
- 3) реализовать численно-аналитическое решение задачи об устойчивом движении СС к цели для гарантированного попадания СС в зону управляемости;
- 4) реализовать методы и алгоритмы управления и наблюдения СС «в малом» для достижения цели при оптимальности движения по времени в программном комплексе для целей исследования;
- 5) решить сопутствующие задачи (управляемость «в малом» в особой точке траектории; управляемость при предначальных условиях) для управления СС в нестандартных ситуациях.

Основные идеи и результаты предлагаемой работы:

- 1) создание упрощенной нелинейной модели движения и управления «в малом» до линейной модели движения субспутника за счет программы работы двигателей коррекции МКА в окрестности БКА и модели управления «в малом» таким субспутником;
- 2) модернизация метода обратного времени для численного расчета области достижимости СС «в малом». Постановка и решение задачи о моделировании управляемости СС «в малом» и задачи о наблюдаемости СС «в малом» в случае неавтономного движения СС на основе упрощения модели движения СС;

- 3) установление связи между управляемостью и наблюдаемостью «в малом» (новый принцип двойственности «в малом»). Применение принципа двойственности «в малом» к анализу движения СС;
- 4) метод решения задачи об управляемости и наблюдаемости «в малом» в особой точке траектории СС. Обоснование задачи об управляемости «в малом» СС при предначальных условиях на примере линейного управления;
- 5) построение программного комплекса анализа движения СС «в малом» (область достижимости, устойчивость, управляемость и наблюдаемость).

Практическая значимость данной работы состоит в том, что были получены новые модели движения объектов относительно БКА и модели управления и наблюдения объектов «в малом»; созданы программы, решающие новые задачи управляемости и наблюдаемости «в малом» объектов, в частности, МКА, в случае линейных неавтономных моделей для достижения объектом (МКА) заданной цели. Также был предложен численный метод восстановления области управляемости «в малом» МКА. В инженерном плане реализованы две практические задачи: управление «в малом» объектами, в частности, МКА, в особых точках фазовой траектории; восстановление состояния МКА при предначальных условиях для достижения заданной цели. Доказано, что новые методы эффективнее классических методов теории управления в 1,3 – 2,7 раза (в зависимости от конкретных ситуаций).

Основные результаты работы:

- 1) создание динамической модели движения субспутника (СС), позволяющей управлять СС «в малом» в автоматическом режиме для достижения цели за минимальное время. Модернизация численного метода и создание алгоритма определения области достижимости для СС. Численное нахождение момента переключения управления СС для достижения цели в автоматическом режиме за минимальное время;
- 2) создание модели управляемости и наблюдаемости СС «в малом» и метода решения задачи наблюдаемости СС «в малом» в случае линейных неавтономных моделей плоского и пространственного движения. Разработка модели связи между управляемостью и наблюдаемостью «в малом» в системе СС-БКА (аналог принципа двойственности Калмана) для контроля движения СС. Применение модели связи между управляемостью и наблюдаемостью «в малом» к анализу движения СС;
- 3) создание численного метода решения задачи об управляемости «в малом» в особой точке фазовой траектории для управления СС в нештатных ситуациях. Численно-аналитическое исследование вопроса о предначальных условиях движения субспутника;
- 4) построение программного комплекса анализа движения БКА-СС (управляемость и наблюдаемость, восстановление области достижимости, устойчивость) «в малом» для автоматического решения поставленных задач.

Библиографический список

1. Ву, К. М., Миронов В. В. Проблема управляемости и наблюдаемости «в малом» неавтономных линейных систем и ее приложение к анализу движения субспутника в окрестности базового космического аппарата: монография. Рязань: Book Jet, 2019. 150 с.
2. Миронов В.В., Северцев Н.А. Методы анализа устойчивости систем и управляемости движением. Монография. / ВЦ РАН им. А.А. Дородницына.- М.: Изд-во РУДН, 2002. 165 с.
3. Миронов В.В., Муртазов А.К. Методы контроля ближнего космоса. - Рязань: Book Jet, 2017. – 126 с. (формат А4).
4. Ву, К. М., В. В. Миронов. Принцип двойственности «в малом» для линейных систем и его приложение к анализу движения субспутника в окрестности базового космического аппарата // Информатизация образования и науки. – 2019. – № 43. – С. 100-109.

5. К. М. Ву., В. В. Миронов. Изучение области достижимости для систем оптимального регулирования третьего порядка // Современные технологии в науке и образовании. Вычислительная техника и автоматизированные системы – СТНО-2019: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019. – С. 136-139.

6. К. М. Ву., В. В. Миронов. Наблюдаемость «в малом» малых космических аппаратов для радиотехнических систем // Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и электроника – СТНО-2019: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019. – С. 133-135.

7. Ву, К. М., Миронов В. В. Программный комплекс по управлению и наблюдению «в малом» малых космических аппаратов для плоского автономного случая – М.: Роспатент.- Свидетельство № 20196153212 от 12.04.2019.

8. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Технологический подход к исследованию устойчивости динамических систем: системный анализ динамических процессов // Вестник РГРТУ. 2017. № 11 (Вып. 59). С. 114 – 126.

9. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Технологический подход к исследованию устойчивости динамических систем: прикладные вопросы // Вестник РГРТУ. 2017. № 11 (Вып. 59). С. 127 – 135.

10. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Глобальная устойчивость технических систем с переменной структурой. //Космонавтика и ракетостроение. 2001. Вып. 24. С.75-82.

11. Миронов В.В. Определение параметров движения искусственных спутников Земли по новой схеме метода наименьших модулей //Космонавтика и ракетостроение. 2001. Вып. 24. С. 83-90.

УДК 519.688; ГРНТИ 27.41.77

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ТОЖДЕСТВ МНОГООБРАЗИЙ АЛГЕБР

В.В. Ермилов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
Российская Федерация, Рязань, Россия, vitalik.ermilov1@gmail.com*

Аннотация. Предлагается алгоритм, позволяющий за полиномиальное время с высокой вероятностью распознать принадлежность тождества заданной свободной (ассоциативной или не ассоциативной) PI-алгебре. Дана оценка сложности алгоритма. Моделирование проведено на тождестве Михеева для правоальтернативных алгебр.

Ключевые слова: тождество алгебры, распознавание тождеств, сложность распознавания.

ALGORITHM AND SOFTWARE IMPLEMENTATION RECOGNITION OF IDENTITIES OF VARIETIES OF ALGEBRAS

V.V. Ermilov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, vitalik.ermilov1@gmail.com*

Annotation. An algorithm is proposed that makes it possible to recognize the identity belonging to a given free (associative or non-associative) PI-algebra with a high probability in polynomial time. The complexity of the algorithm is estimated. The simulation is carried out on the Mikheev identity for right-alternative algebras.

Keywords: algebra identity, identity recognition, recognition complexity.

Введение

Проблема распознавания тождеств многообразий алгебр, в принципе решенная в классе NP -задач [1], в классе P -задач не решена и вряд ли когда будет решена, скорее всего – это алгоритмически неразрешимая в классе P проблема. В тоже время частные случаи продолжает привлекать внимание специалистов (см., к примеру, [2]).

Прямой методической основой для данной работы послужили статьи [3, 4]. Одновременно косвенно продвигаемые идеи изложены в работах [5 - 12].

В работе приведены самые необходимые определения и результаты. Формально недостающие определения и результаты можно найти в монографиях [13, 14].

Всякая алгебра обладает теми или иными свойствами, которые, в частности, могут описываться с помощью тождеств. Под тождеством понимается равенство двух многочленов от нескольких переменных, которое становится истинным при любой подстановке в него любых элементов алгебры. В этом смысле тождество можно рассматривать как полиномиальный предикат на алгебре.

Возникает естественный вопрос: если некоторая алгебра A удовлетворяет (возможно бесконечной) системе тождеств $I = \{f_1 = 0, \dots, f_n = 0, \dots\}$, то, как распознать, будет ли она удовлетворять тождеству $g = 0$ степени $\deg g = N$ (в запись g какие-то переменные входят ровно N раз с учетом их кратности). Другими словами, тождество g является ли следствием системы тождеств I ? (Для удобства изложения тождество $g = 0$ может записываться просто как многочлен g).

Описанный в работе [1] алгоритм распознавания чрезвычайно сложен и имеет порядок, более высокий, чем $O(N!)$, что делает его неприемлемым при больших значениях N (под сложностью алгоритма понимается его арифметическая сложность, то есть число арифметических операций: сложение, вычитание, умножение, деление, сравнение двух чисел).

В работе [4] предложен более простой алгоритм, позволяющий ответить на вопрос о принадлежности *полиномиального* тождества к системе тождеств данной *конечнобазированной* алгебре с достоверностью (вероятностью) единица или сколь угодно близкой к единице. Приведена оценка сложности алгоритма. Алгоритм апробирован на конкретных моделях алгебр.

Однако, вопрос о *неполиномиальных* тождествах и о *бесконечнобазированных* многообразиях остался открытым. Столь же открыт и вопрос о программной реализации алгоритма.

Если учесть, что проблема распознавания и проблема сложности алгоритмов являются центральными для всей современной математики [10], то это делает данную работу актуальной. Заметим в этой связи, что вопрос об алгоритмическом распознавании пространств не решен до сих пор, в частности, даже для сферы S^3 (описание проблемы можно найти в работе [15]).

Использование в работе сведений, не выходящих за университетский курс алгебры, и начальных знаний по написанию компьютерных программ позволяет адаптировать работу в процессе обучения студентов, в частности, по специальности 10.05.01 «Компьютерная безопасность» (уровень специалитета), ООП (профиль) «Компьютерная безопасность».

Если утверждения приведены без доказательств, то их доказательства приведены в библиографических ссылках.

1. Основные определения и свойства.

Алгебра называется *ассоциативной*, если она удовлетворяет тождеству $(xy)z = x(yz)$ или $(xy)z - x(yz) = 0$, или $(x, y, z) = 0$, что позволяет не расставлять скобки в записи произведений элементов этой алгебры, а также в ее тождествах, в противном случае алгебра *неассоциативная*. Алгебра называется *нулевой*, если она содержит только один элемент – нуль.

Многообразием алгебр, определяемым системой тождеств $f_1 = 0, \dots, f_n = 0$, называется множество (класс) всех алгебр, каждая из которых удовлетворяет всем определяющим тождествам. Многообразие называется *нетривиальным*, если оно содержит, хотя бы одну алгебру, отличную от нулевой.

Алгебра $F_M(Y)$ с (конечным или бесконечным) множеством порождающих $Y = \{y_1, \dots, y_n, \dots\}$ из (нетривиального) многообразия M называется *свободной* в многообра-

зии M , если всякое отображение множества Y в любую алгебру A из M однозначно продолжится до гомоморфизма $F_M(Y)$ в A .

В качестве скаляров (что удобно для данной темы) будем рассматривать поле действительных чисел \mathbf{R} .

Обозначим через $\mathbf{R}[X]$ свободную \mathbf{R} -алгебру от счетного числа порождающих элементов (переменных) $X = \{x_1, \square, x_n, \square\}$, через $I^*(\mathbf{R}[X])$ – идеал этой алгебры, порожденный всеми тождествами $f_1 = 0, \square, f_n = 0$, определяющими многообразие алгебр M , а через $F_M(X)$ свободную алгебру этого многообразия.

Лемма 1. Множество всех тождеств свободной алгебры $F_M(X)$ образует идеал свободной алгебры $\mathbf{R}[X]$.

Идеал тождеств свободной алгебры $F_M(X)$ обозначим $T(F_M)$.

ТЕОРЕМА 1. Пусть M – это (нетривиальное) многообразие алгебр с определяющей системой тождеств I . Тогда фактор-алгебра $\mathbf{R}[X] / I^*(\mathbf{R}[X])$ является свободной в многообразии M . Кроме того, любые две свободные алгебры с равномошными множествами порождающих изоморфны между собой.

ТЕОРЕМА 2. Идеал тождеств $T(F_M) = I^*(\mathbf{R}[X])$.

2. Основные результаты. Полагаем по определению, что поле операторов многообразия алгебр «хорошее» и над ним возможна линейаризация тождеств. Тогда можно считать, без ограничения общности рассматриваемого вопроса, что достаточно ограничиться случаем полиномиального однородного исследуемого тождества g порядка 1 (каждая переменная входит в запись каждого одночлена многочлена g в первой степени).

Из теоремы 2 следует, что тождество $g = 0$ степени N является следствием конечной системы тождеств $f_1 = 0, \square, f_n = 0$, определяющих свободную ассоциативную алгебру F тогда и только тогда, когда достигается равенство

$$g(X) = \sum_i \alpha_i G_i(X), \quad (1)$$

где индекс i пробегает некоторое конечное множество значений (порядка, более высокого, чем $N!$), α_i – действительные коэффициенты, для каждого i G_i – это многочлен степени n , для которого равенство $G_i = 0$ является следствием какого-то из тождеств $f_1 = 0, \square, f_n = 0$. Из строения идеала $T(F_M) = I^*(\mathbf{R}[X])$ следует, что каждый многочлен G_i получен из некоторого многочлена f_j , если в последнем вместо переменных вставить некоторые одночлены, а затем умножить справа или слева на «недостающие» одночлены.

В данной работе истинность равенства (1) проверяется на вероятностных конечномерных алгебрах их многообразия алгебр M , определяемого тождествами $f_1 = 0, \square, f_n = 0$.

Определим вероятностную конечномерную алгебру многообразия M . Зададим систему элементов (векторов) $E = \{e_1, \square, e_k\}$, $k \leq m$, где m – это наивысшая из степеней многочленов f_i . Естественным образом определим линейное (векторное) \mathbf{R} -пространство L , натянутое на E :

$L = \text{Esp} \{E\} = \left\{ \sum_{i=1}^k \beta_i e_i \mid \beta_i \in \mathbf{R} \right\}$. Определим на пространстве L операцию умно-

жения, превратив его в алгебру A : если вектор $a = \sum_{i=1}^k \beta_i e_i$, вектор $b = \sum_{j=1}^k \gamma_j e_j$, то произведе-

ние $c = ab = \sum_{i,j=1}^k \beta_i \gamma_j e_i e_j$. Перестроим алгебру A в случайную k -мерную алгебру A_k с базисом E , положив по определению, что на базисных элементах задано умножение: $e_i e_j = e_p$, где элементы e_p выбираются из базиса E случайным образом и распределены равномерно на всем множестве значений.

Пусть A - это некоторая конечномерная алгебра с базисом E . Определим случайным образом отображение $\varphi: X \rightarrow E; x_i \mapsto e_j$ и продолжим его естественным образом до гомоморфизма алгебры $\mathbf{R}[X]$ на алгебру A , полагая по определению, что $\varphi(f(x_1, \dots, x_n)) = f(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}) = f(E)$ при условии $e_{i_1}, \dots, e_{i_p} \in E$. Если положить далее, что все многочлены f_i и многочлен ассоциативности $(x_1 x_2) x_3 - x_1 (x_2 x_3)$ равны нулю на алгебре A_k , то эта новая конечномерная алгебра L , очевидно, будет принадлежать ассоциативному многообразию алгебр M .

Многообразие алгебр назовем *допустимым*, если оно содержит (допускает существование) некоторую конечномерную алгебру. В противном случае многообразие называется *полным* (недопустимым). В работе изучаются только допустимые многообразия.

Нулевой идеал алгебры L будет ненулевым идеалом алгебры A_k и одновременно линейным пространством $L = \text{Esp}(B)$, натянутым на систему векторов $B = \{G_j(E)\}$, где элементы $G_j(E)$ есть образы всех полилинейных многочленов $f_i, x_1 f_i, f_i x_1, x_1 f_i x_2$ при гомоморфизме φ . Другими словами порождающее множество B состоит ровно из всех элементов вида $f_i(E), e_i f_j(E), f_i(E) e_j, e_i f_j(E) e_p$.

Лемма 2. Алгебра L с вероятностью $\mathbf{P} = 1$ не является вырожденной и ее размерность $1 \leq \dim L < k$.

Доказательство. Алгебра L является подалгеброй алгебры A_k и, следовательно, ее размерность не превосходит k . Если бы $\dim L = k$, то в L среди $\{G_j(E)\}$ нашлись бы линейно независимые векторы g_1, \dots, g_k . Тогда из системы уравнений $\{g_i = 0, i = 1, \dots, k$ следовало бы, что $\{e_i = 0, i = 1, \dots, k$. Следовательно, алгебра L являлась бы вырожденной. Но алгебра L является случайной алгеброй, с равномерно распределенным законом умножения и случайным гомоморфизмом φ . Учитывая меры (количество) вырожденных и невырожденных алгебр допустимого многообразия, последнее означает, что многообразие M с вероятностью $\mathbf{P} = 1$ являлось бы полным (недопустимым), что невозможно по условию. *Лемма доказана.*

ТЕОРЕМА 3. Если полиномиальный многочлен g является тождеством свободной алгебры F , то многочлен (вектор) $g(E)$ разлагается по базису пространства $L(B)$ с вероятностью $\mathbf{P} = 1$.

Доказательство. Многочлен $g(X)$, как доказано выше, равенство (1), является тождественной линейной комбинацией элементов $G_i(X)$: $g(X) = \sum_i \alpha_i G_i(X)$. Следовательно, равенство (1) сохранится и на элементах алгебры A_k :

$$g(E) = \sum_i \alpha_i G_i(E) \quad (2)$$

Если привести в равенстве (2) подобные члены, учесть лемму 2 и строение порождающего множества B , то ввиду случайного характера отображения с вероятностью 1 значение $g(E) \neq 0$ в алгебре L . Ввиду допустимости многообразия M , соответствующие слагаемые G_j в правой части (2) (после приведения подробных членов) входят в базис пространства $L(B)$. Следовательно, многочлен $g(E)$ разлагается по базису пространства $L(B)$ с вероятностью $\mathbf{P} = 1$. *Теорема доказана.*

ТЕОРЕМА 4. Если полиномиальный многочлен g не является тождеством свободной алгебры F , то многочлен (вектор) $g(E)$ не разлагается по базису пространства $L(B)$ с вероятностью $\mathbf{P} = 1$.

Доказательство. Если многочлен $g(X)$ не является тождеством свободной алгебры F , то равенство (1) не выполняется (как тождество) ни для каких линейных комбинаций элементов $G_i(X)$:

$$g(X) \neq \sum_i \alpha_i G_i(X) \quad (3)$$

$$g(X) = \sum_i \alpha_i G_i(X)$$

Следовательно, равенство опишет в n -мерном аффинном пространстве A^N (где N , напомним, - число переменных, входящих в запись $g(X)$) некоторую гиперповерхность Φ . С другой стороны, в силу допустимости многообразия M , векторы $G_j(E)$ входят в базис пространства $L(B)$. Учитывая случайный характер алгебры L , случайный характер отображения Φ , соотношение мер гиперповерхности Φ и пространства A^N можно утверждать, что с вероятностью $\mathbf{P} = 1$ вектор $g(E)$ не принадлежит пространству $L(B)$ и, значит, неравенство (3) сохранится и на элементах алгебры A_k : $g(E) \neq \sum_i \alpha_i G_i(E)$ для любых коэффициентов α_i . Следовательно, многочлен $g(E)$ не разлагается по базису пространства $L(B)$ с вероятностью $\mathbf{P} = 1$. *Теорема доказана.*

3. Алгоритм. Поведенный анализ позволяет в явном виде выписать алгоритм (структурную последовательность шагов) распознавания тождеств свободных ассоциативных алгебр.

1. Проведем линейризацию тождества g .
2. Среди базисных тождеств алгебры выберем те, степень которых на превосходит степени g .
3. Выпишем соответствующие базисные многочлены $f_i(X)$ и многочлен $g(X)$.
4. Построим случайную конечномерную алгебру A_k .

5. Построим алгебру L и убедиться, что она невырожденная. Если она случайно вырожденная, то повторим процедуру неоднократно. С вероятностью сколь угодно близкой к единице, невырожденная алгебра будет построена.
 6. Построим порождающее множество $B = \{G_j(E)\}$.
 7. Найдем базис множества B .
 8. Зададим случайное отображение Φ .
 9. Разложим вектор $g(E)$ по базису множества B .
 10. В зависимости от выполнимости пункта 9 сделать вывод о принадлежности тождества $g(X)$ свободной ассоциативной алгебре с системой тождеств $I = \{f_i\}$.
- Приведем без доказательства следующую теорему.

ТЕОРЕМА 5. Алгоритма распознавания имеет сложность порядка $O(kmn(m+2)^k)$.

Если учесть, что сложность алгоритма не зависит от параметра N , а параметры k , m , n строго меньше N , то становится очевидным, что при больших значениях N предложенный алгоритм имеет существенно меньшую сложность по сравнению с алгоритмом из работы [4].

Библиографический список

1. Миронов В.В. Тождества в многообразиях алгебр/ Деп. ВИНТИ АН СССР, 1986. № 1016-B86. 5 С.
2. Латышев В. Н. Алгоритмическое распознавание полиномиальных тождеств //Математические вопросы кибернетики. Вып. 11. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. — С. 5–14.
3. Миронов В.В. Отсутствие конечного базиса тождеств свободных 2-ступенно разрешимых алгебр конечной степени свободы // Математические заметки. 1988. Т.43. №3. С. 320-326.
4. Миронова К.В. Вероятностный алгоритм распознавания тождеств свободных ассоциативных алгебр/ Межвуз. сб. науч. трудов «Математические методы в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ. 2010. С. 61 – 69.
5. Миронов В.В. Объединение одночленных многообразий алгебр // Математические заметки. 1984. Т. 35. № 6. С. 789-794.
6. Миронов В.В. Один пример почти ассоциативной алгебры с бесконечной системой образующих тождеств /Сборник трудов III межд. науч.-техн. и науч. метод. конф. – Рязань, BookJet, 2018. Т. 5. С. 49 – 56.
7. Миронов В.В. Об одном свойстве многообразия коммутативных алгебр// Деп. ВИНТИ АН СССР, 1985. № 965-85. 6 С.
8. Миронов В.В. Свойство вложимости свободных алгебр v -многообразий и многообразия разрешимых алгебр/ Деп. ВИНТИ АН СССР, 1986. № 1014-B86. 9 С.
9. Миронов В.В. Вложение свободной достижимой алгебры от счетного числа свободных порождающих в свободную достижимую алгебру от двух свободных порождающих// Сибирский математический журнал. 1988. № 2. С. 215.
- 10.Миронов В.В. Фундаментальные математические проблемы. Комментарии. (Рукописная монография) Рязань: РГРТУ, 2012. кафедра ВМ. Регистр. № М_01/12. 232 с.
- 11.Миронов В.В., Ситников В.Д., Защинин М.С. Новое доказательство основной теоремы алгебры многочленов // Современные технологии в науке и образовании. Математические методы в научных исследованиях – СТНО-2019: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2019. – Т.10 – С. 100-105.
- 12.Миронов В.В., Ключко В.К., Новиков А.И. и др. Сборник трудов к юбилею профессора Чуракова Е.П. /под науч. ред. проф. Миронова В.В. - Рязань: Book Jet. 2018. 136 с. (формат А4).
13. Мальцев А.И. Алгебраические системы. М.: Наука, 1970.
14. Жевлаков К.А. и др. Кольца, близкие к ассоциативным. М.: Наука, 1978.
15. Математическая энциклопедия. М.: Изд. АН СССР, 1969. Т. 12

УДК 51.007; ГРНТИ 27.01.09

ВКЛАД РОССИЙСКИХ МАТЕМАТИКОВ В РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ГИЛЬБЕРТА И НЕКОТОРЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ

Н.В. Киселев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
Рязань, Россия, nik326.com@yandex.ru*

Аннотация. Проведено исследование вопроса о вкладе российских математиков в решение проблем Д. Гильберта. Приведен список некоторых актуальных вопросов от проф. Миронова В.В.

Ключевые слова: список Гильберта, нерешенные математические проблемы.

На Парижском математическом конгрессе в 1900 г. на секции преподавания и методологии математики выступил с докладом 38-летний **Давид Гильберт** [1, 2].

Давид Гильберт (David Hilbert) (1862-1943). Родился 23.1.1862 в Велау, близ Кёнигсберга, Пруссия (ныне – г. Калининград, Россия).



Величайший немецкий математик-универсал внес выдающийся вклад в развитие многих математических разделов и направлений: теория инвариантов, теория алгебраических чисел, основания геометрии, вариационное исчисление и дифференциальные уравнения, теория интегральных уравнений, теория чисел, основы математической физики, логические основы математики.

В своем докладе **Гильберт** сформулировал 23 математические проблемы (по некоторым данным в докладе было сформулировано больше проблем, но в окончательный текст доклада Гильберт включил именно 23 задачи), которые, на его взгляд, являлись наиболее значимыми для математики начинающегося и весьма обнадеживающего (*какая глубина трагизма!*) XX века.

Поясняя свой выбор проблем, **Д. Гильберт** приводил слова одного известного французского математика: "Математическую теорию можно считать совершенной только тогда, когда ты сделал ее настолько ясной, что берешься изложить ее содержание первому встречному". Гильберт говорил, что поставленная перед математическим сообществом задача должна быть: а) понятной; б) достаточно трудной, чтобы вызывать интерес; в) не настолько трудной, чтобы ее невозможно было решить.

Основные проблемы, о которых говорил Д. Гильберт на Парижском конгрессе, таковы:

Проблема 1. Проблема **Кантора** о мощности континуума.

Проблема 2. Непротиворечивость арифметических аксиом.

Проблема 3. Равенство двух тетраэдров с равновеликими основаниями и равными высотами.

Проблема 4. Проблема о прямой линии, как кратчайшем соединении двух точек.

Проблема 5. Понятие непрерывной группы преобразований **Ли**, без предположения о дифференцируемости функций, определяющих группу.

Проблема 6. Математическое изложение аксиом физики.

Проблема 7. Иррациональность и трансцендентность некоторых чисел.

Проблема 8. Проблема простых чисел.

Проблема 9. Доказательство наиболее общего закона взаимности в любом числовом поле.

Проблема 10. Задача о разрешимости Диофантова уравнения.

Проблема 11. Квадратичные формы с произвольными алгебраическими числовыми коэффициентами.

Проблема 12. Распространение теоремы **Кронекера** об **Абелевых** полях на произвольную алгебраическую область рациональности.

Проблема 13. Невозможность решения общего уравнения седьмой степени с помощью функции, зависящей только от двух переменных.

Проблема 14. Доказательство конечности некоторой полной системы функций.

Проблема 15. Строгое обоснование исчислительной геометрии **Шуберта**.

Проблема 16. Проблема топологии алгебраических кривых и поверхностей.

Проблема 17. Представление определенных форм в виде суммы квадратов.

Проблема 18. Построение пространства из конгруэнтных многогранников.

Проблема 19. Являются ли решения регулярной вариационной задачи необходимо аналитическими?

Проблема 20. Общая задача о граничных условиях.

Проблема 21. Доказательство существования линейных дифференциальных уравнений с заданной группой монодромии.

Проблема 22. Униформизация аналитических зависимостей с помощью автоморфных функций.

Проблема 23. Развитие методов вариационного исчисления

Некоторые из названных проблем были известны и до **Гильберта**. Так, первая проблема – проблема континуума – поставлена **Г. Кантором** в 1878 г. Третья проблема обсуждалась в письме **К. Гаусса** к **Герлингу**, восьмая проблема – о нулях дзета-функции – поставлена **Б. Риманом** в 1859 г., к восьмой же проблеме относится гипотеза петербургского академика **Х. Гольдбаха**, поставленная им в письме к **Л. Эйлеру** в 1742 г., двадцать первая проблема выдвинута **Б. Риманом** в 1857г.

Вскоре после того, как эти проблемы были сформулированы (и даже сразу после доклада, во время обсуждения), выяснилось, что некоторые из них либо практически решены, либо близки к решению. Однако другие потребовали для своего решения нескольких десятков лет и усилий многих выдающихся математиков, а две из них до сих пор не решены: проблема № 8 о нулях дзета-функции Римана и проблема № 16 о предельных циклах (сообщения об их решении на сегодня не получили официальных подтверждений).

Вклад российских математиков в решение проблем Гильберта. Русская делегация на Парижском конгрессе 1900 г. была весьма небольшой – всего 9 чел. (для сравнения от Франции – 80, от Германии – 25), а выступил вообще один – **М.А. Тихомандрицкий** с докладом «О нулях функции нескольких переменных» (в современной терминологии).

Оглядываясь ныне назад, можно утверждать, что российские математики внесли *выдающийся вклад* в решение проблем **Гильберта**. Исторически первым на этом пути был **В.Ф. Каган**, который в 1903 г. дал относительно простое положительное решение 3-ей проблемы, в отличие от несколько более раннего и сложного решения **М. Дена**.

В 1904 г. **С.Н. Бернштейн** дал решение 19-ой проблемы Гильберта.

С.Н. Бернштейн же в 1908-1909 г.г. получил важные результаты, относящиеся к 20-й проблеме Гильберта, но не решил ее окончательно.

Крупные результаты, примыкающие к 19-й проблеме, были получены **И.Г.Петровским** в 1937 г.

Петровский же в 1949 г. (в соавторстве с **О.А. Олейник**) получил ряд крупных результатов, относящихся к 16-ой проблеме. В 1960 г. **О.А. Ладыженская** и **Н.Н. Уралцева** получили «смыкание» результатов по 19-ой и 20-ой проблемам.

Первое решение 6-й проблемы (по аксиоматизации теории вероятности, как ни странно, в рамках физики) было получено снова **С.Н.Бернштейном** в 1917 г.

В 1936 г. **А.Н. Колмогоров** предложил другую аксиоматизацию, основанную на теории меры, получившую впоследствии всеобщее признание. Эта плодотворная идея соедини-

ла достижения московской школы теории функций действительной переменной, основанной **Д.Ф.Егоровым** и **Н.Н. Лузиным**, и петербургской школы **П.Л.Чебышёва**.

Седьмая проблема Гильберта о некотором классе (или о виде) трансцендентных чисел технически оказалась чрезвычайно трудной. Напомним, что 1851 г. **Ж. Лиувилль** доказал только существование трансцендентных чисел, лишь в 1873 г. **Ш. Эрмит** нашел первое трансцендентное число – число e , вскоре **Ф. Линдеман** доказал трансцендентность числа π , решив тем самым знаменитую проблему квадратуры круга, в 1874 г. **Г. Кантор** доказал континуальность множества трансцендентных чисел. В 1929 г. на основе достижений петербургской теоретико-числовой школы **П.Л.Чебышёва** московский математик **А.О. Гельфонд** дал частичное решение седьмой проблемы Гильберта о трансцендентных числах. В 1930 г. **Р.О. Кузьмин** на основе метода Гельфонда расширил результат последнего. Только в 1934 г. **А.О. Гельфонд** дал окончательное решение седьмой проблемы, подтвердив догадку Гильберта.

Восьмая проблема Гильберта состоит из нескольких задач, относящихся к теории простых чисел (в которой остались, судя по всему, только чрезвычайно трудные задачи). Одна из них – это проблема **Гольдбаха**, которая оказалась настолько трудной, что известный немецкий математик **Э. Ландау** на Международном математическом конгрессе 1912 г. высказался весьма пессимистично вообще о перспективах ее решения в обозримом будущем. Однако в 1937 г. академик **И.М. Виноградов** частично решил проблему Гольдбаха, а именно для нечетных чисел. Результат И.М. Виноградова оказался весьма плодотворным и в плане осмысления методологии решения подобных проблем. В 1946 г. академик **Ю.В. Линник** дал другое доказательство теоремы Виноградова, основанное на теории функций комплексного переменного. Важным вкладом в решение числовых проблем Гильберта стал общий закон взаимности, полученный в 1948 г. **И.Р. Шафаревичем**. На этом же пути стоят работы **К.Ф. Гаусса**, **Г. Эйзенштейна**, **Э. Куммера**, **Д.Гильберта**, **Э. Артина**, **Г. Хассе**.

Вторая проблема Гильберта говорила о непротиворечивости арифметики. Сам Гильберт и его ученики ошибочно считали, что такое доказательство ими получено. При этом сам Д. Гильберт ограничивал средства доказательства. Такое ограничение получило впоследствии название «финитизм Гильберта». Но в 1931 г. **К. Гёдель** опроверг гипотезу, показав, что «доказательство в рамках финитизма Гильберта» в принципе невозможно. В 1943 г. **П.С. Новиков** получил-таки доказательство при отказе от некоторых ограничений, накладываемых «финитизмом Гильберта».

Окончательное решение пятой проблемы, относящейся к теории непрерывных групп, получено в 1952 г. американскими математиками **Д. Монтгомери** и **Л. Циппином**. Однако российские математики **Л.С.Понтрягин** в 1934 и **А.И.Мальцев** в 1946 г. получили ряд важных частных результатов по этой проблеме, способствовавших ее окончательному решению.

Тринадцатая проблема – это проблема невозможности представления функции нескольких переменных как суперпозиции функций от меньшего числа переменных. Немецкий математик **Л. Бибербах**, ошибочно «доказавший» гипотезу Гильберта, назвал тринадцатую проблему «самой несчастливой», имея ввиду не только ее номер, но и необычайную сложность. Российский математик **А.Г. Витушкин** получил некоторые результаты, косвенно подтверждавших, казалось бы, гипотезу Гильберта. Но в 1954 г. академик **А.Н. Колмогоров** при участии студента МГУ **В.И. Арнульда** опровергли гипотезу Гильберта и доказали, что всякая непрерывная функция трех переменных представляет собой сумму девяти функций, каждая из которых является однократной суперпозицией функций двух переменных. Сам А.Н. Колмогоров считал этот результат труднейшим в своей жизни.

Проблема № 10 - это вопрос об общем алгоритме решения диофантовых уравнений. В 1908 г. **А. Туэ** получил некоторый обнадеживающий промежуточный результат.

Алгоритмы для отдельных классов уравнений были получены российским математиком **Б.Н. Делоне** и немцем **К. Зигелем**. В 1930-40-е годы **А. Чёрч**, **А.Тьюринг**, **Э. Пост**, **А.А. Марков** приводят примеры алгоритмически неразрешимых проблем.

В 1952 г. **П.С.Новиков** доказывает алгоритмическую неразрешимость одной из проблем теории групп - проблемы тождества слов. В 1950-60-е американские математики **М. Девис** и др. вплотную подошли к выводу об алгоритмической неразрешимости десятой проблемы.

Последнюю точку поставил в 1970 г. **Ю.В. Матиясевич**, доказавший алгоритмическую неразрешимость десятой проблемы.

Значение проблем Гильберта. Понятно, что некоторый список проблем всегда можно составить. Такие списки можно найти и по указанной библиографии, и по другим источникам, и даже сформулировать самому. Но как сформулировать такой список проблем, решение (или попытка решения) которых определяют (или предопределяют) объективное развитие математики в будущем? На этот вопрос может ответить лишь время.

Сегодня, спустя сто с лишним лет, уже можно сказать с уверенностью, что **Д. Гильберт** хорошо составил список проблем! Они оказали самое заметное влияние на математику XX века. Думается, не стоит сбрасывать со счетов и субъективные факторы. Решить проблему, поставленную самим Гильбертом – это пропуск в элитный клуб математиков первого уровня.

Современные проблемы математики. Неизмеримо множество проблем в современной математике, и как только одна проблема решена, на ее место всплывают бесчисленные новые проблемы. Среди проблем есть очень известные и очень трудные, другие менее известны, но не менее трудны. Далее по мере изложения темы будут приведены достаточно обширные списки литературы и Интернет-сайтов, по которым можно ознакомиться с проблемами в самых разных областях математики.

Ни до, ни долгое время после **Д. Гильберта** никто из математиков уже не ставил перед собой такую титаническую задачу – осмысления математики и путей ее развития в целом, на всем пространстве естествознания. В начале XX столетия математика уже становится широко разветвленной и одновременно узко специализированной по направлениям наукой, одному человеку ныне было бы чрезвычайно трудно и даже невозможно охватить все ее разделы. В свое время **Д. Гильберту** это оказалось под силу: он отличался широким кругозором, работал практически во всех существовавших тогда областях математики и во многих из них (теория инвариантов, теория алгебраических чисел, основания математики, математическая логика, вариационное исчисление, дифференциальные и интегральные уравнения, теория чисел, математическая физика) добился выдающихся результатов!

Как известно, 2000-й год был объявлен ЮНЕСКО годом математики и прошел под этим знаменем. На рубеже нового тысячелетия попытку сформулировать список основных математических проблем предприняли представители института им. **Клэя** (США) в Париже в Колледж де Франс 24 мая 2000 г. в рамках лекции «Важность математики». Кроме того серьезную попытку сформулировать список основных математических проблем XXI века предпринял (по предложению российского академика **В.И. Арнольда**) американский математик **Стивен Смейл**.

В книге проф. **Миронова В.В.** - «Фундаментальные математические проблемы. Комментарии»: учебное пособие. Первая редакция.– Рязань: РГУ, 2021. – 410 с.- автор поставил следующие вопросы на основе работ [3 - 15].

Проблема 1. Существуют ли системы обыкновенных дифференциальных уравнений (с управлением) с неодносвязной областью устойчивости (управляемости)?

Проблема 2. Как конструктивно построить функцию Ляпунова по правой части системы:

- обыкновенных дифференциальных уравнений? - стохастических уравнений?- нечетких дифференциальных уравнений?- фрактальных уравнений?

Следующая работа дает некоторую надежду и метод на разрешение проблемы 2:

Миронов В.В., Северцев Н.А. Методы анализа устойчивости систем и управляемости движением: монография. / ВЦ РАН им. А.А. Дородницына.- М.: Изд-во РУДН, 2002. - 165 с.

Проблема 3. Как бороться с вирусами при синтезе надежных систем из ненадежных элементов в алгебре логики и ее приложениях?

Проблема 4. Каков критерий разложения многообразия алгебр в сумму многообразий?

Проблема 5. При каких условиях на определяющие тождества многообразия псевдоассоциативных алгебр [тождества принадлежат идеалу тождеств $T(Ass)$ многообразия ассоциативных алгебр] оно имеет лишь конечно-базируемые подмногообразия? (Обобщение проблемы Шпехта).

Проблема 6. Разрешим ли парадокс **Б. Рассела**, и в каком смысле? Верно ли, что всякий парадокс или хаос локально устранимы?

Проблема 7. Какова двойственная аксиома к аксиоме выбора, и каковой может быть непротиворечивая (конкретная) модель с этими двумя аксиомами?

Проблема 8. Как выглядит принцип максимума Л.С. Понтрягина для управляемости «в малом»: - для детерминированных систем,- для стохастических систем, - для фрактальных систем?

Проблема 9. Верно ли, что основная задача линейного программирования локально полиномиальна, но степени полиномиальности не ограничены сверху?

Проблема 10. Как (локально) разрешать алгоритмически неразрешимые задачи, к примеру, 10-ю проблему Гильберта?

Проблема 11. Как выглядит теорема Галуа о разрешимости в радикалах в произвольных полях?

Проблема 12. Верно ли, что обратная задача всегда сложнее прямой? Существуют ли задачи, что прямая имеет сложность P , а обратная - NP ?

Проблема 13. Каково практическое применение основной задачи небесной динамики при возможности периодической аппроксимации его решения? (**А. Пуанкаре**. Избранные труды в 3-х томах, Т. I, Новые методы небесной механики. М.: Наука, 1971. С. 34, 75)

Проблема 14. Как соотносятся друг с другом два труда: Ландау – Лифшица и Валитова?

Библиографический список

1. Проблемы Гильберта. /Под ред. П.С. Александрова. М.: Наука, 1969. (Перевод доклада Гильберта с немецкого — М. Г. Шестопаля и А. В. Дорофеевой).
2. Гильберт Д. Избранные труды. Т. 1, 2. М.: Факториал, 1998.
3. Миронов В.В. Объединение одночленных многообразий алгебр// Математические заметки. 1984. Т. 35. № 6. С. 789-794.
4. Миронов В.В. Вложение свободной достижимой алгебры от счетного числа свободных порождающих в свободную достижимую алгебру от двух свободных порождающих// Сибирский математический журнал. 1988. № 2. С. 215.
5. Миронов В.В. Отсутствие конечного базиса тождеств свободных 2-ступенно разрешимых алгебр конечной степени свободы // Математические заметки. 1988.Т.43.№3. С. 320-326.
6. Миронов В.В. Обработка последовательностей спектров с гарантированной точностью при произвольной корреляции шумов// Автотметрия.1993. № 1. С. 110-116.
7. Миронов В.В. Единый конструктивный подход к построению функций ляпуновского типа //Известия РАЕН. Дифференц. уравнения. 2001.№ 4. С. 52-64.
8. Миронов В.В. Исследование устойчивости решений разностных уравнений Вольтерра // Известия РАЕН. Дифференц. уравнения. 2001. № 5. С. 112-113.

9. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Конструктивное исследование устойчивости решений разностных систем уравнений // Известия РАЕН. Дифференц. уравнения. 2001. № 5. С. 114-115.
10. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Глобальная устойчивость технических систем с переменной структурой. // Космонавтика и ракетостроение. 2001. Вып. 24. С.75-82.
11. Миронов В.В., Н. К. Тхыонг. Методика построения функций Ляпунова // Научно-технические технологии. 2008. Т. 9. № 1. С. 56 – 65.
12. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Технологический подход к исследованию устойчивости динамических систем: системный анализ динамических процессов // Вестник РГРТУ. 2017. № 11 (Вып. 59). С. 114 – 126.
13. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Технологический подход к исследованию устойчивости динамических систем: прикладные вопросы // Вестник РГРТУ. 2017. № 11 (Вып. 59). С. 127 – 135.
14. Миронов В.В. Сильнополиномиальный алгоритм решения общей задачи наименьших модулей // Сибирский журнал вычислительной математики. 2010. Т. 13. №2. Часть I, С.161-174.
15. Миронов В.В. Сильнополиномиальный алгоритм решения общей задачи наименьших модулей // Сибирский журнал вычислительной математики. 2010. Т. 13. №2 Часть II, С.174-181.

УДК: 519.254: 519.233; ГРНТИ 89

ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ «ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ГАРАНТИРОВАННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

П.Д. Прибылов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, pavelpribylov01@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматриваются учебник В.В. Миронова и темы, которые затрагиваются в данном учебном пособии.

Ключевые слова: теория гарантированного оценивания, математическое обеспечение исследований, алгоритмическое и программное обеспечение исследований.

PROBLEM OVERVIEW «DATA PROCESSING AND GUARANTEED EVALUATION OF SPACE SYSTEMS PARAMETERS»

P.D. Pribilov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, pavelpribylov01@gmail.com*

Annotation. The work deals with the textbook of V.V. Mironov and the topics covered in this tutorial.

Key words: theory of guaranteed estimation, mathematical support of research, algorithmic and software support of research.

На современном этапе развития вычислительных комплексов, обеспечивающих технические эксперименты и обработку космической информации, предметом интенсивных теоретических исследований и активной программной реализации является создание процедур, гарантированно обеспечивающих результат при любых сопутствующих условиях. В силу этой тенденции «гарантированности» происходит модернизация математического и программного обеспечения ЭВМ и вычислительных комплексов.

Обзор проблемы проводится по учебнику В.В. Миронов. ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ГАРАНТИРОВАННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ– Рязань: «BookJet», 2018. – 120 с. (формат А4).

Данный учебник, предназначенный, в первую очередь, для студентов и аспирантов, написан «простым» языком и посвящен вводу молодых будущих специалистов в проблему создания и модернизации процедур и программ гарантированной (в другой терминологии – гарантирующей) обработки данных и оценивания параметров в технических системах

Автор - Миронов Валентин Васильевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, директор лаборатории системного анализа, Рязанский государственный радиотехнический университет (РГРТУ).

Опыт обучения студентов и аспирантов в Рязанском государственном радиотехническом университете (РГРТУ) и потенциальные интересы технических кафедр РГРТУ, в особенности, *кафедры космических технологий* и *кафедры компьютерной безопасности*, диктуют введение в процесс обучения студентов и аспирантов новых современных методов обработки данных и новых методов оценивания параметров технических систем, порою в самых неблагоприятных условиях, иногда при противодействии «другой» стороны.

Одновременно на современном этапе развития вычислительных комплексов, обеспечивающих функционирование технических систем и обработку снимаемой информации, предметом интенсивных теоретических исследований и активной программной реализации является создание процедур, гарантированно обеспечивающих результат при любых сопутствующих условиях. В силу этой тенденции «гарантированности» в одной из ветвей направления обработки данных в прикладных областях науки происходит серьезная модернизация математического и программного обеспечения ЭВМ и вычислительных комплексов.

В этой связи логично скорректировать и процесс обучения студентов и аспирантов, вводя в курс лекций, в той или иной мере, информацию об этих новых тенденциях, новых методах и процедурах их реализации.

Представленный учебник как раз и посвящен изложению теоретических основ и описанию процедур гарантированного (в другой терминологии - гарантирующего) оценивания параметров технических систем.

Основой для написания учебника явились два учебных пособия автора [1, 2], научные основы которых опубликованы, в частности, в работах [3 – 14].

Цели учебника – это введение студентов и аспирантов в современные методы оценивания параметров в наиболее неблагоприятных условиях в приложении к космическим экспериментам.

Традиционно в классических процедурах по оцениванию параметров моделей погрешности измерений считаются случайными величинами с заданными вероятностными характеристиками. Это наиболее проработанное направление прикладной математики. Однако в целом ряде прикладных задач такое допущение об ошибках не соответствует реальным экспериментам и при использовании стандартного программного обеспечения приводит к неоправданному оптимизму в оценке точности проводимых расчетов.

Выход из этой парадоксальной ситуации был найден математиками России и США в 60-е годы (М.Л. Лидов, Н.Н. Красовский, П.Е.Эльясберг, Л.Ю. Белоусов, Хьюбер П.Д., Хэмпел Ф.Р.). Новизна идеи состоит в том, что считается заданным множество возможных значений ошибок исходных данных или характеристик их распределения. В этих условиях решаются задачи оценивания параметров моделей и систем и вычисления надежных значений характеристик точности. Получаемые при гарантированном оценивании менее оптимистические (по сравнению с классическим вариантом) оценки точности в целом ряде задач являются предпочтительными.

Теория гарантированного оценивания разделяется на несколько направлений со своими (порой весьма консервативными) традициями. Представленный учебник развивает традиции московской школы, основоположниками которой и являются Л.Ю. Белоусов, Б.Ц. Бахшиян, Р.Р. Назиров, А.И. Матасов, В.Н. Соловьев.

Гарантированное оценивание, как повышенное требование к надежности расчетов, имеет две ярко выраженные концептуальные задачи.

Пусть заданы множества: $\{X\}$ - возможных стратегий оценивания и G - возможных значений ошибок исходных данных или характеристик их распределения; $\gamma \in G$, где γ - сово-

купность ошибок измерений и модели. Пусть δl - некоторая скалярная характеристика, зависящая от X и γ и используемая при оценке точности определения некоторого параметра l .

Прямая задача гарантированного оценивания состоит в определении стратегии оценивания X и вычислении гарантированного значения

$$\delta l_G = \min_{\{X\}} \max_{\gamma \in G} \delta l$$

для минимизируемой характеристики δl .

Обратная задача гарантированного оценивания состоит в определении множества G (или, по крайней мере, его мощности) при заданной стратегии X и гарантированном значении δl_G .

Динамично развиваясь, теория гарантированного оценивания имеет целый ряд нерешенных вопросов. Остановимся лишь на нескольких:

1. Созданные программные продукты на основе линейного программирования не свободны от заикливания и бесполезных (не приводящих к уменьшению целевой функции) итераций - тех проблем, которые наиболее характерны (как доказали Л.Ю. Белоусов и Б.Ц. Бахшиян) для рассматриваемых задач гарантированного оценивания;

2. Потребности практики диктуют распространение результатов гарантированного оценивания на нелинейные параметры и нелинейные модели;

3. Остается актуальной задача об априорной оценке точности при возможных сбоях в измерениях (выход ошибки измерения за границы заданного интервала), доля которых в космических экспериментах доходит (по оценкам специалистов ЦНИИМАШ, г. Королев, Московской области) до 50-70%;

4. Решаемые практические вопросы при отсутствии сведений об ошибках измерений и, как следствие, необходимости более осторожной (по сравнению с классической) стратегии оценивания зачастую не вбирают в себя ни идей, ни методов теории гарантированного оценивания, ни, тем более, соответствующих программных продуктов.

Решение двух фундаментальных задач, объединенных идеологией гарантированного оценивания, освещено в данной книге.

I. (Прямая задача.) Создание новых процедур обработки данных в ЭВМ для гарантированной оценки точности определения положения КА вдоль его траектории в случае, когда ошибки измерений и модели ограничены известной детерминированной функцией, и расчета оптимальной линейной импульсной коррекции движения КА с помощью трех двигателей коррекции.

II. (Обратная задача.) Выявление средствами математического и программного моделирования гарантированной мощности множества частиц и осколков естественной и техногенной природы при восстановлении информации об их воздействии на КА с помощью систем контактных датчиков (СКД) и активных датчиков (САД) при заданной гарантированной относительной точности отклонения от идеальной системы контактно-активных датчиков (СКАД) со стороны систем СКД и САД (оценок системы СКАД).

Математическое обеспечение исследований.

1. Создание численной процедуры для решения задачи оценивания точности в определении параметров линейных моделей. Аналитическое решение задачи оценивания точности, свободное от заикливания и бесполезных итераций. Обобщение теоремы об оценке точности на нелинейные параметры и модели при неклассических ограничениях на аддитивные ошибки измерений. Создание и тестирование процедуры планирования моментов измерений с целью увеличения точности оценивания. Распространение идеи гарантированного оценивания точности на модели с мультипликативными помехами (глава 1).

2. Статистическое сравнение на основе созданных программных средств точности оценивания параметров одним из вариантов предложенной методики и классическим методом наименьших квадратов (МНК) (глава 1).

Алгоритмическое и программное обеспечение исследований.

3. Создание модернизированной процедуры решения задачи оптимальной линейной импульсной коррекции движения КА (глава 2).

4. Адаптация новой процедуры оценивания параметров к задачам спектрального анализа образцов, доставляемых с борта КА (глава 3).

5. Разработка процедуры оценивания точности определения параметров при сбоях в измерениях (глава 3).

6. Модернизация на основе новых результатов процедуры оценивания точности определения положения КА вдоль его траектории (глава 4).

7. Разработка математической модели, построение комплекса программ и компьютерный анализ работы систем регистраций и оценивания внешнего воздействия частиц и осколков естественной и техногенной природы на КА (глава 4). Цель - выявление гарантированной мощности множества частиц и осколков с помощью систем СКД и САД при заданной относительной точности отклонения систем СКД и САД от идеальной системы СКАД.

Читатель найдет, что в материалах учебника содержатся следующие результаты

1. Получены обобщения теоремы о гарантированной оценке точности на нелинейные параметры от вектора состояния и квазилинейные модели.

2. Предложены модифицированный симплекс-метод и его программная реализация для решения задачи оценивания точности.

3. Получено аналитическое решение задачи оценивания точности, свободное от заикливания и бесполезных итераций.

4. Создана процедура решения задачи оптимальной линейной импульсной коррекции КА за конечное число шагов с помощью 3-х бортовых двигателей.

5. Построена процедура оценивания точности при сбоях в измерениях.

6. Созданы математическая модель и диалоговый комплекс программ по выявлению зон гарантированного превосходства системы контактных датчиков СКД над системой активных датчиков САД, а также САД над СКД. Проведено испытание комплекса на удобство ввода-вывода данных, понижение трудоемкости загрузки начальных данных, надежность его эксплуатации. Разработан программный способ организации множества т.н. мини-датчиков при описании физической «гибкости» системы датчиков регистрации на КА.

Библиографический список

1. Миронов В.В. Гарантирующее оценивание параметров. Учебное пособие. – Рязань, Изд-во РГРТУ. 2000.
16. Миронов В.В. Приложение математического программирования к задачам оценивания. Учебное пособие. – Рязань, Изд-во РГРТУ. 2002.
17. Миронов В.В. Обработка последовательностей спектров с гарантированной точностью при произвольной корреляции шумов // Автометрия. 1993. № 1. С. 110-116.
18. Mironov V.V. A Comparison of Systems for Recording Space Debris // Cosmic Research, 1996. V.34. № 4. P. 382-386. (англ).
19. Миронов В.В., Чураков Е.П. Гарантированная обработка дискретных измерений при слабом контроле помех // Вестник РГРТА. Рязань, 1999. Вып. 6. С. 3-8.
20. Mironov V.V. A technique for estimating the space debris density from the data of onboard recording systems // Cosmic Research. 2003. Т. 41. № 2. С. 204-208.
21. Миронов В.В., Мухин А.В. Методика оценки плотности космического мусора по малой выборке. // Труды ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2008. Т. 32(2). С. 234-237.
22. Миронов В.В., Миронова К.В., Новикова М.Ю., Терехин В.И. Математическое моделирование развития ракетно-космической техники // Глобальный научный потенциал. 2013. №1 (22). С.69-75.

23. Миронов В.В. Датчики, системы контроля и диагностики воздействия космического мусора на космические аппараты // Датчики и системы. ИПУ РАН. 2014, № 9. С. 2-9.

24. Миронов В.В., Кащеев А.А. Повышение точности оценки длительности сеансов связи космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с наземными пунктами приема информации для надежных высокоскоростных радиолиний // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2108. Т. 15. №6. С. 235-244.

25. Mironov V.V., Usovik I.V. Retrospective of the Debris Problem. Part 1. Technogenic Clogging of Space and Means of Its Control // Cosmic Research, 2020, Vol. 58, No 2, P. 92 – 104.

26. Mironov, V.V., Murtazov, A.K. Retrospective of the Problem of Space Debris. Part 2. Monitoring of Space Debris of Natural Origin in Near-Earth Space Using Optical Methods of Meteor Astronomy // Cosmic Research, 2021, Vol. 59, No 1, pp. 36 – 45.

27. Миронов В.В., Муртазов А.К., Усовик И.В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. Монография. Изд. 2-е исправленное и дополненное / под науч. ред. проф. Миронова В.В. - Рязань: BookJet. 2018. 313 с. (формат А4).

28. Миронов В.В. Модифицированный симплекс-метод решения задачи гарантирующего оценивания параметров. Программа PR_GIP // Национальный библиотечно-информационный фонд РФ. Москва, ВНИИЦ, 2000. № 50200000020.

СЕКЦИЯ «ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

УДК 658.5; ГРНТИ 82.33.13

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ IDEF0 ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫПУСКА ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

И.А. Соловьева*, Д.С. Соловьев**

**Тамбовский государственный технический университет,
Россия, Тамбов, good.win32@yandex.ru,*

***Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,
Россия, Тамбов, solovjevdenis@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается использование методологии функционального моделирования IDEF0 для формализации процесса планирования выпуска готовой продукции. Для рассматриваемого процесса построена диаграмма верхнего уровня, которая декомпозирована на 4 блока. Для составленных диаграмм описаны входные, выходные, управляющие и сигналы механизмов.

Ключевые слова: IDEF0, бизнес-процесс, планирование выпуска готовой продукции.

IDEF0 FUNCTIONAL MODELING METHODOLOGY FOR FORMALIZING THE PLANNING PROCESS OF FINISHED PRODUCT RELEASE

I.A. Solovjeva*, D.S. Solovjev**

**Tambov State Technical University,
Russia, Tambov, good.win32@yandex.ru,*

***Tambov State University named after G.R. Derzhavin,
Russia, Tambov, solovjevdenis@mail.ru*

Abstract. The paper discusses the use of the IDEF0 functional modeling methodology for formalizing the planning process of finished product release. The top-level diagram, which is decomposed into 4 blocks, was built for the process under consideration. Input, output, control and signals of the mechanisms are described for the drawn diagrams.

Keywords: IDEF0, business process, finished product planning.

Планирование выпуска готовой продукции – одна из основных задач управления предприятием и анализа его деятельности [1]. Особенно это актуально для многоассортиментных химических производств, у которых номенклатура выпускаемой продукции достигает нескольких тысяч. В существующих условиях невозможно разработать план выпуска готовой продукции без применения методов моделирования бизнес-процессов, одним из которых является функциональное моделирование на основе IDEF0 [2].

Диаграмма верхнего уровня функциональной модели процесса планирования выпуска готовой продукции представлена на рисунке 1.

Информация от заказчиков представляет собой общие сведения о заказчиках (наименование заказчика, адрес), данные о видах и объемах предполагаемого заказа готовой продукции на планируемый месяц, а также коэффициент привилегированности каждого заказчика.

Требования руководства представляют собой какие-либо указания об ассортименте и объеме выпускаемой продукции на планируемый месяц, которые накладывают дополнительные ограничения на процесс планирования выпуска готовой продукции. Необходимо заметить, что требования руководства могут отсутствовать.

Информация о продукции включает в себя данные об ассортименте выпускаемой продукции (наименование продукта, класс продукта, объем необходимого нормативного остатка продукта, фактический объем остатка продукта на начало текущего месяца, предполагаемый

объем выпуска продукта на конец текущего месяца, предполагаемый объем продаж продукта на конец текущего месяца) и данные о предполагаемом спросе на продукцию в планируемом периоде.

Информация о производственных мощностях содержит сведения о наличии работоспособного оборудования, фонде времени работы оборудования в планируемом месяце, времени обработки одной партии продукта.

Статистика прошлых периодов необходима для более точной оценки спроса на выпускаемую продукцию путем анализа аналогичных периодов предыдущих лет. Кроме того, статистика прошлых периодов включает в себя фактические объемы выпуска продукции за предыдущие периоды и может быть использована для план-фактного анализа.

Информация о сырье представляет собой данные о наименовании сырья, необходимого для выпуска продукции, данные о нормах расхода сырья на выпуск продукта с учетом технологических потерь, данные о необходимых объемах нормативного запаса сырья, об объемах ожидаемого остатка сырья на начало планируемого месяца, о фактическом объеме остатка сырья на начало текущего месяца, о предполагаемом объеме поступления сырья на конец текущего месяца, а также данные об объеме предполагаемого расхода продукта на конец текущего месяца.

Менеджеры, экономисты и начальники цехов непосредственно участвуют в процессе планирования выпуска готовой продукции и отвечают за результаты этого процесса.

По итогам планирования выпуска готовой продукции составляется план производства и формируются заявки на приобретение сырья.



Рис. 1. Диаграмма верхнего уровня функциональной модели процесса планирования выпуска готовой продукции

Представленную функциональную модель процесса планирования готовой продукции декомпозируем на следующие четыре блока: составление предварительного плана продаж, формирование плана производства, расчет загрузки оборудования, планирование потребности в сырье.

Блоки функциональной модели непосредственно связаны с базами данных таблиц общего пользования, склада готовой продукции, склада сырья, плана продаж и выпуска готовой продукции, технологии изготовления, базой оборудования и нормативной калькуляции. Кроме того, для внесения ограничений, уточнений и изменений предусмотрены корректирующие обратные связи между блоками. Блок составления предварительного плана

продаж позволяет сформировать предварительный план продаж готовой продукции на планируемый период, основываясь на информации о заключенных договорах и заявках на поставку продукции, информации о спросе потребителей на данную продукцию, требованиях руководства, статистических данных о выпуске продукции в прошлых периодах, ассортименте выпускаемой продукции и на информации, поступающей из таблиц общего пользования (потребители, менеджеры, продукты). Кроме того, в этом блоке происходит уточнение плана продаж на основе данных из блока формирования плана производства. Выходной информацией данного блока является заявка в производство в виде наименования продукции, которую необходимо выпустить и объемов выпуска этой продукции.

В блоке формирования плана производства происходит расчет ожидаемого остатка на начало планируемого месяца, а также составление и уточнение плана выпуска по каждой единице готовой продукции. Входными данными для этого блока служат: информация из блока составления предварительного плана продаж, блока расчета загрузки оборудования; информация из базы данных плана продаж и выпуска, из таблиц общего пользования о запасах готовой продукции и нормативных остатках, о подразделениях предприятия (цеха, склады и т. д.). Выходная информация: что и в каких количествах необходимо выпускать в планируемом периоде.

Полученная дочерняя диаграмма функциональной модели представлена на рисунке 2.

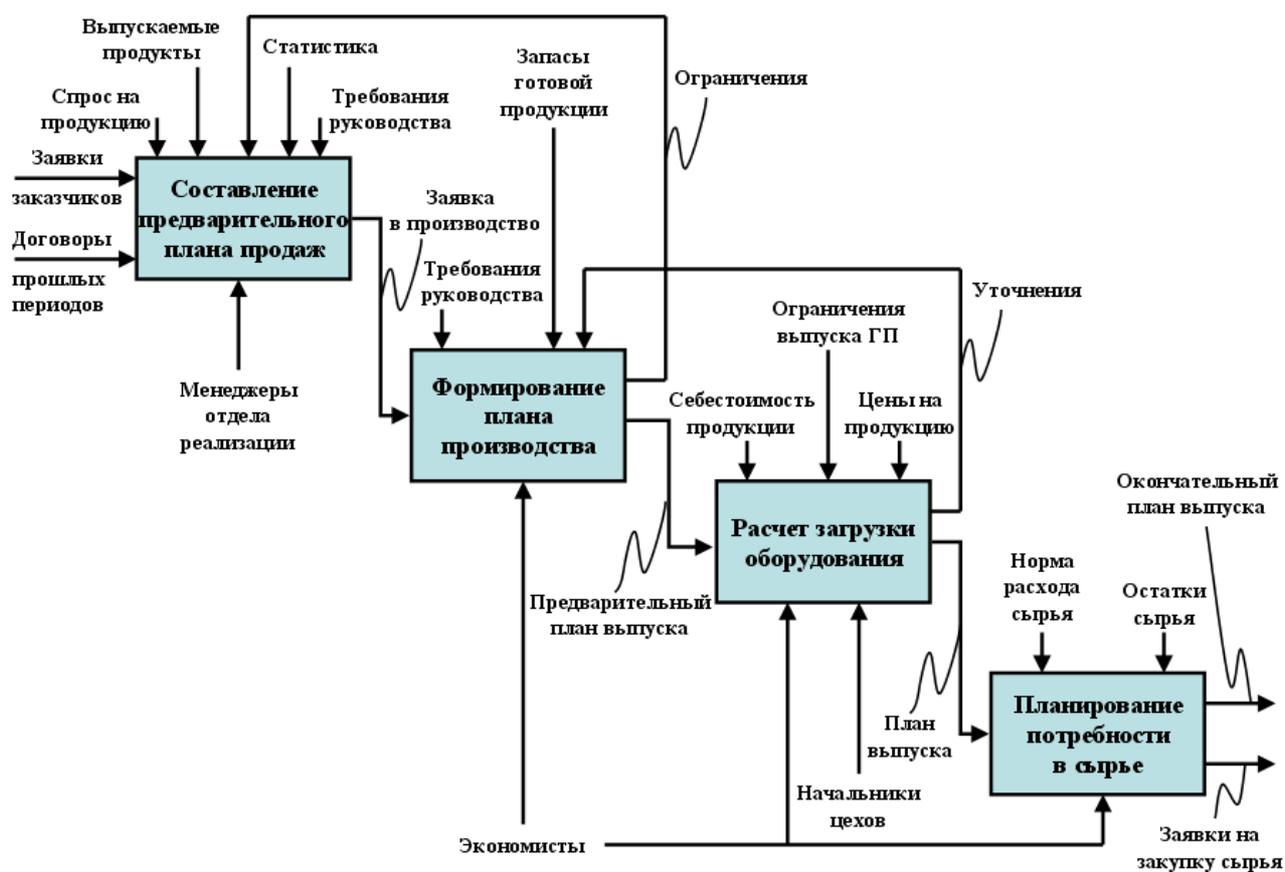


Рис.2. Дочерняя диаграмма функциональной модели процесса планирования выпуска готовой продукции

Блок расчета загрузки оборудования включает в себя нахождение максимально возможного объема выпуска готовой продукции при выполнении ограничений, связанных с имеющимся фондом времени работы оборудования. После этого происходит расчет оптимального объема выпуска готовой продукции с учетом ограничений, полученных из блока формирования плана производства. Критерием оптимальности является предполагаемая ва-

ловая маржа от продаж продукции, которая должна достигать максимально возможного значения. В качестве входных данных выступает предварительный объем выпуска по каждому виду продукции, а в качестве выходных - план выпуска готовой продукции.

В блоке планирования потребности в сырье рассчитывается потребность предприятия в сырье в натуральном и стоимостном выражении. При этом используется план выпуска продукции, информация о нормах расхода сырья и об остатках сырья на складах. Выходная информация: заявки на закупку сырья и окончательный план выпуска продукции.

Необходимо отметить, что на предприятиях химического профиля выпуск большинства видов готовой продукции осуществляется партиями определенных размеров. Это условие необходимо учитывать при заключении договоров на объемы поставки готовой продукции клиентам. Кроме того, каждая единица оборудования может работать только определенное количество часов в месяц, поэтому возникает дополнительное ограничение на объемы выпуска готовой продукции, связанные с фондом времени работы оборудования.

Библиографический список

1. Дубровин, И.А. Организация и планирование производства на предприятиях / И.А. Дубровин. – М.: КолосС, 2014. – 360 с.
2. Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ РД IDEF0-2000. – М.: Госстандарт России, 2000.– 75 с.

УДК004.85; ГРНТИ 28.23.37

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПНЕВМОНИИ

Н.А. Кузнецов

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
Российская Федерация, Казань, kn2000kuznetsov@yandex.ru*

Аннотация. В работе, на основе набора из 5000 снимков рентгена легких здоровых и больных пневмонией людей, построена модель машинного обучения с помощью ML.NetModelBuilder для прогнозирования пневмонии по рентгеновскому снимку.

Ключевые слова: модель машинного обучения, пневмония, ML.NETModelBuilder, глубинная нейронная сеть.

USING A MACHINE LEARNING MODEL TO DIAGNOSE PNEUMONIA

N.A. Kuznetsov

*Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev,
Russia, Kazan, kn2000kuznetsov@yandex.ru*

The summary. In the work was built a machine learning model, using ML.Net Model Builder, and basis on a set of 5000 X-ray images of healthy and sick people with pneumonia for predicting pneumonia from an X-ray image.

Keywords: machine learning model, pneumonia, ML.NET Model Builder, deep neural network.

Проблема распознавания болезни без участия специалиста со временем становится все более актуальной. Ее решение позволит довольно существенно оптимизировать скорость и, вполне возможно, даже качество работы медограждений. В настоящий момент очень важной проблемой для всего человечества является пандемия коронавируса. И, конечно же, распознавание этой болезни может довольно серьезно помочь в борьбе с ней. Одним из самых частых симптомов болезни является пневмония, выявление которой возможно с помощью рентгеновских снимков легких. Благодаря серьезному развитию моделей машинного обучения все более реальным становится их использование для распознавания болезней, например, пневмонии.

Данное исследование выполнено в программном обеспечении Microsoft Visual Studio 2019. Microsoft Visual Studio - полнофункциональная интегрированная среда разработки (IDE) с поддержкой популярных языков программирования, среди которых C, C++, VB.NET, C#, F#, JavaScript, Python.

Функциональность Visual Studio охватывает все этапы разработки программного обеспечения, предоставляя современные инструменты для написания кода, проектирования графических интерфейсов, сборки, отладки и тестирования приложений. Возможности Visual Studio могут быть дополнены путем подключения необходимых расширений.

Одним из таких расширений является ML.NET Model Builder. Именно в нем была построена модель машинного обучения, которая на основе набора из 5000 фотографий рентгена легких здоровых и больных (рис.1) пневмонией людей, взятого из открытого источника [1], прогнозирует наличие пневмонии по рентгеновскому снимку.

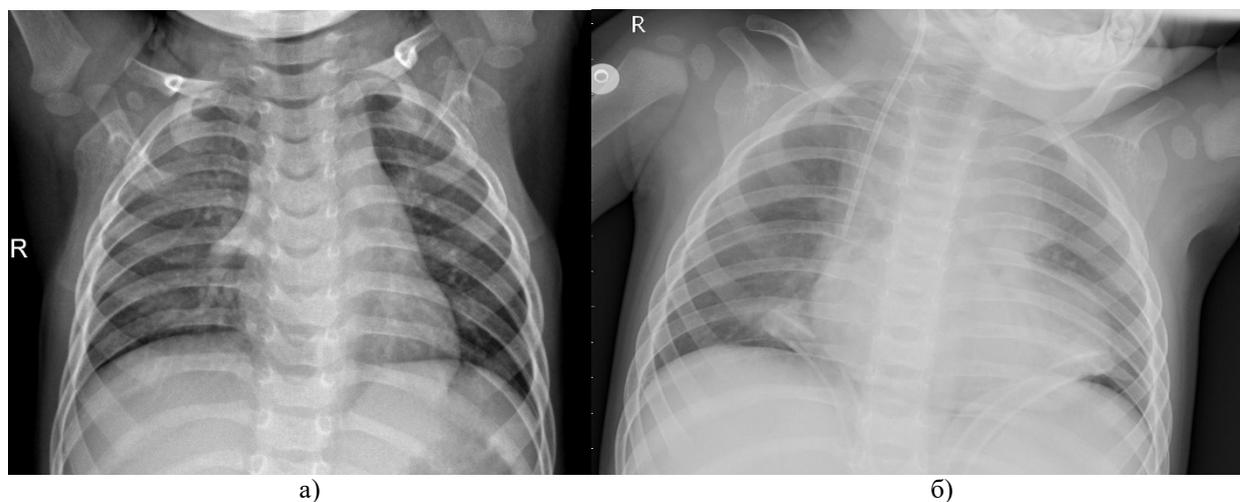


Рис. 1. Рентгеновские снимки грудной клетки: а) здорового человека ; б) человека, больного пневмонией

ML.NET Model Builder – это платформа моделей машинного обучения с открытым исходным кодом. Данная платформа предоставляет визуальный интерфейс для создания, обучения и использования пользовательских моделей машинного обучения.

С учетом того, что прогнозирования болезни пациента по снимку рентгена легких, что по сути является бинарной классификацией изображений, был произведен отбор наиболее оптимальной модели машинного из доступных в ML.NET Model Builder. Отбор проводился на основе данных, полученных в следующих исследованиях [2], [3]. Наиболее подходящей для данной задачи оказалась модель глубокой нейронной сети (DNN – DeepNeuralNetwork).

Нейронная сеть, которую также иногда называют искусственной нейронной сетью (ArtificialNeuralNetwork) это часть вычислительной системы, предназначенная для моделирования того, как человеческий мозг анализирует и обрабатывает информацию. Искусственная нейронная сеть основана на наборе соединенных единиц или узлов, называемых искусственными нейронами, которые подобны нейронам в биологическом мозге. Каждое соединение, как синапсы в биологическом мозге, может передавать сигнал другим нейронам. Нейроны объединены в слои. Разные слои могут выполнять разные преобразования на своих входах. Сигналы проходят от первого слоя (входной) к последнему (выходному). Глубинная нейронная сеть - это искусственная нейронная сеть с несколькими уровнями между входным и выходным слоями.

Одной из основных причин выбора данной модели является работа с довольно большим объемом обучающих данных. Глубинная нейронная сеть обеспечивает наиболее быстрое обучения по сравнению с другими моделями.

Благодаря наиболее оптимальному выбору и большому объему обучающих данных, была создана модель с точностью 97,04 % (рис.2). Время, затраченное на обучение модели составило всего 2 часа, что также является следствием грамотного выбора модели машинного обучения.

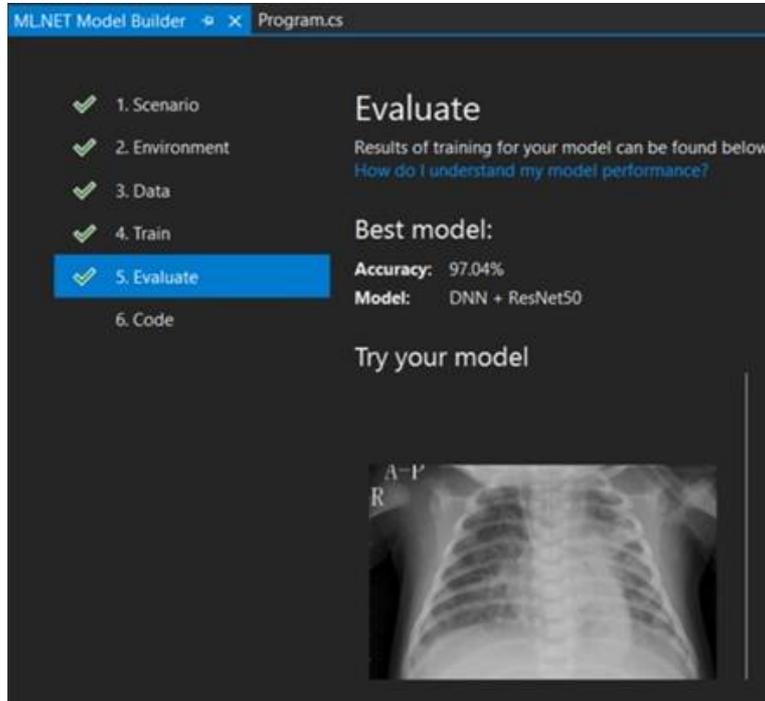


Рис. 2. олученная после обучения точность модели

Следующим этапом стало создание интерфейса для использования модели машинного обучения. Данный этап реализовывался с помощью интерфейса программирования приложений WindowsForms в Microsoft Visual Studio 2019. Была осуществлена функция выбора файла с фото (поддерживаемые форматы: jpeg, png) с устройства. Результат выводится в виде вероятностей того, что на данном рентгеновском снимке здоровый человек и, что на данном снимке человек с пневмонией. Также было добавлено окно с текстовым результатом: в зависимости от того, больше ли вероятность что человек болеет пневмонией или здоровый будут выводиться «Pneumonia» или «Normal» соответственно (рис. 3).

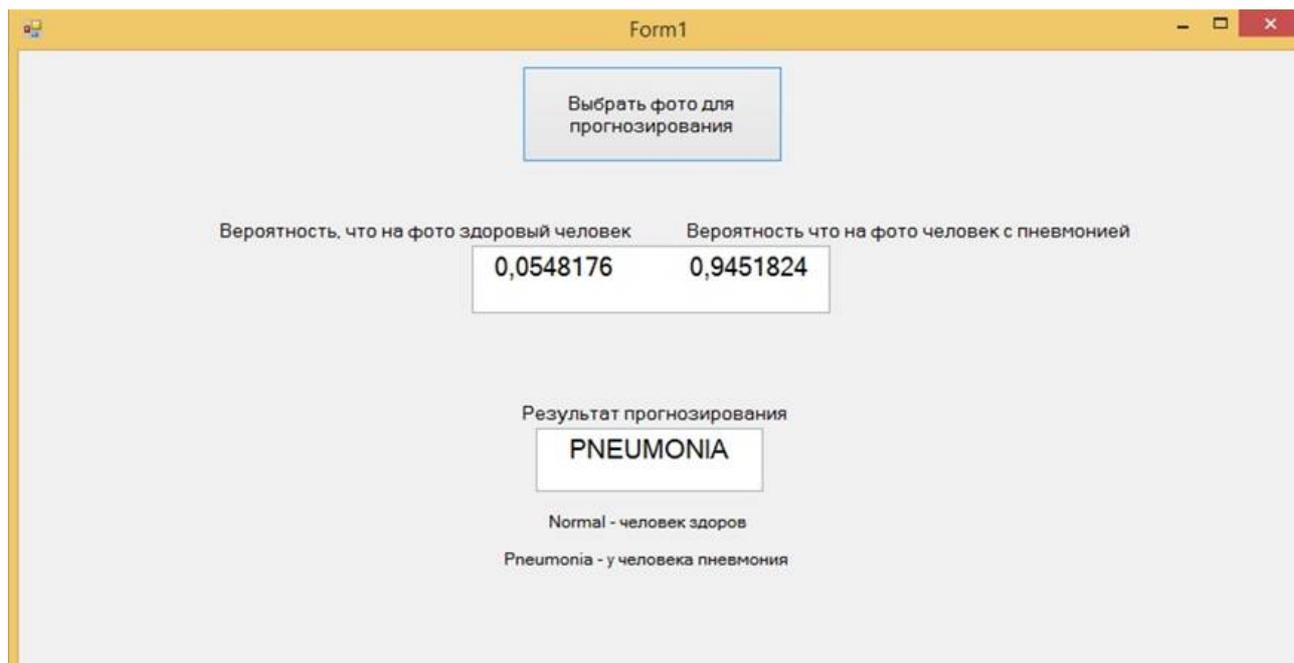


Рис. 3. Результат работы программы

Полученная программа прогнозирует наличие пневмонии с довольно хорошей точностью. Однако, для применения ее в качестве замены проверки у специалиста однозначно требуется намного большая точность, что подтверждается выводами, полученными в статье [4].

Для решения данной задачи существует несколько методов. Самый очевидный из них, это максимально возможное увеличение объема набора данных для обучения. Минусом данного метода является сложность сбора больших объемов данных и значительное увеличение временных затрат на обучение модели.

Кроме того, точность можно увеличить за счет использования модели машинного обучения, более подходящей для решения данной задачи. В данной работе была выбрана наиболее подходящая модель из доступных в ML.NET Model Builder.

Библиографический список

1. Датасет рентгеновских снимков [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kaggle.com/paultimothymooney/chest-xray-pneumonia>
2. Caggiano A. et al. Machine learning- based image processing for on- line defect recognition in additive manufacturing. CIRP Ann. 68, 451–454 (2019).
3. Scime L., Beuth J. A multi- scale convolutional neural network for autonomous anomaly detection and classification in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. Addit. Manuf. 24, 273–286 (2018).
4. Amyar, A., Modzelewski, R. Multi-task deep learning based CT imaging analysis for COVID-19 pneumonia: Classification and segmentation. Computers in Biology and Medicine, 120-135 (2020).

УДК 004.9; ГРНТИ28.29.57

АЛГОРИТМ СБОРА ИНФОРМАЦИИ О ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА УПРАВЛЯЕМОЙ БЕГОВОЙ ДОРОЖКЕ

А.Д. Обухов, Д.Л. Дедов, Е.О. Суркова, В.В. Вострикова, Д.В. Теселкин

*Тамбовский государственный технический университет,
Российская Федерация, Тамбов, obuhov.art@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматривается алгоритм сбора и обработки информации о траектории движения человека на беговой платформе. Приводятся графики траектории движения человека и скорости беговой платформы при детерминированном способе управления беговой платформой.

Ключевые слова: сбор данных, управляемая беговая платформа.

ALGORITHM FOR COLLECTING INFORMATION ABOUT THE TRAJECTORY OF A PERSON'S MOVEMENT ON A SURVEILLED TREADMILL

A.D. Obukhov, D.L. Dedov, E.O. Surkova, V.V. Vostrikova, D.V. Teselkin

*Tambov State Technical University,
Russian Federation, Tambov, obuhov.art@gmail.com*

The summary. The paper considers an algorithm for collecting and processing information about the trajectory of a person's movement on a running platform. The graphs of the trajectory of a person's movement and the speed of the running platform with a deterministic method of controlling the running platform are given.

Keywords: data collection, controlled running platform.

Введение

На сегодняшний день существует несколько подходов к перемещению в виртуальной реальности.

Самый простой из них — это перемещение с помощью ручного контроллера, а именно наведение его на точку, в которую нужно переместиться, и нажатие на кнопку. Данный метод имеет следующие недостатки: невозможность одновременной работы с виртуальными объектами и перемещения, наименьшая степень погружения в виртуальную реальность из-за неестественности процесса перемещения, в том числе, неподвижности ног. Из-за того, что человек стоит на месте, у него могут возникать такие эффекты, как тошнота и головокружение.

Следующий способ состоит в том, чтобы отслеживать движение человека с помощью датчиков или костюмов виртуальной реальности. Тогда точность движений человека будет зависеть от количества датчиков, максимальная достоверность данных возможна с применением комплексов на основе технологий MotionCapture. Проблема данного метода состоит в том, что область перемещения ограничена зоной отслеживания датчиков виртуальной реальности в пространстве.

Поэтому для реализации естественного и неограниченного перемещения с различной скоростью в ограниченном пространстве необходимо использование оборудования на основе беговых дорожек.

Основная проблема использования простых беговых дорожек для перемещения в виртуальной реальности заключается в том, что они не могут в полной мере обеспечить действительного ощущения движения [1]. Это обусловлено тем, что у пользователя нет возможности адекватно контролировать скорость беговой дорожки в зависимости от своего местоположения или скорости ходьбы. Для решения данной проблемы необходима система, которая позволит отследить изменение положения или скорости человека и на основе полученной информации отрегулировать скорость движения полотна беговой дорожки [2]. Реализация

такой системы возможна как с помощью датчиков виртуальной реальности, так и на основе ультразвуковых сенсоров или камер [3].

При разработке алгоритма управления беговой платформой возникает проблема запаздывания, т. е. система управления не успевает отреагировать на действия человека.

Существующие алгоритмы управления основаны на вычислении скорости полотна беговой платформы в зависимости от скорости движения человека. Для получения скорости пользователя используются датчики, трекеры, контроллеры, камеры, система анализирует положение пользователя относительно нулевой (стартовой) точки и в зависимости от него регулирует скорость полотна беговой дорожки, т.е. система затрачивает время не только на управление платформой, но и на получение и обработку информации о состоянии пользователя. Это и является причиной запаздывания реакции системы управления на действия человека, находящегося на беговой платформе [4].

Алгоритм сбора и обработки данных

Рассмотренные выше проблемы доказывают необходимость разработки алгоритмов, позволяющих определять положение и траекторию движения человека, для создания эффективной системы управления беговой платформой.

Разработанный алгоритм для получения и обработки информации о перемещении человека по беговой платформе можно представить в виде блок-схемы (рисунок 1):

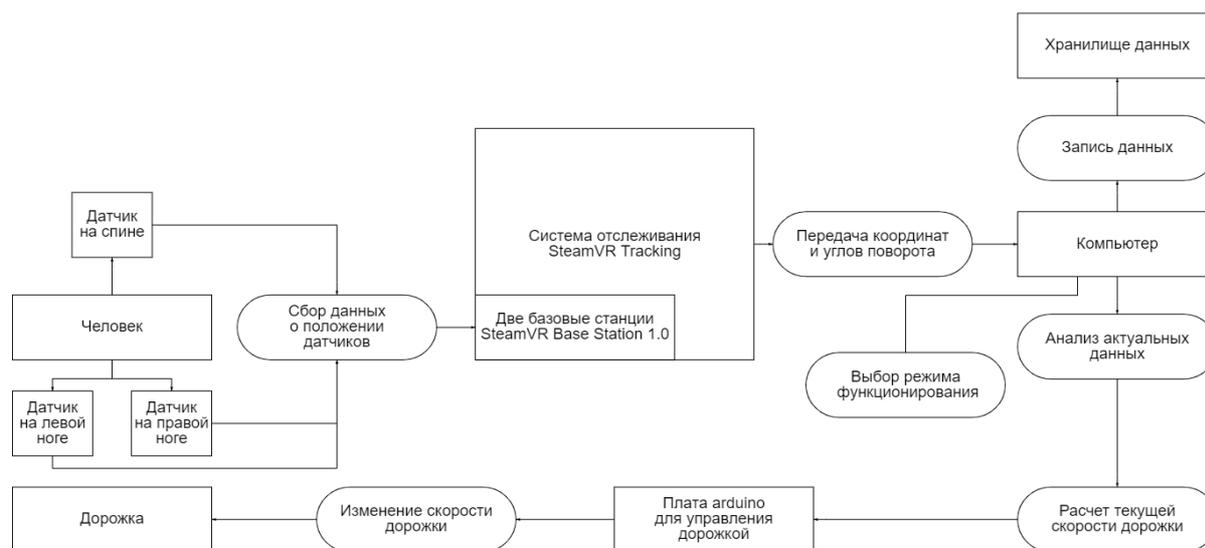


Рис. 1. Алгоритм сбора данных о перемещении на беговой дорожке

Для определения положения человека на беговой платформе используются трекеры (HTC Vive). С помощью библиотеки triad-openvr языка программирования Python данные о перемещении (координаты x, y, z , углы поворота по осям) собираются с трекеров, расположенных на спине и ногах, во время движения пользователя и сохраняются в динамическом списке. После прекращения работы с платформой сохранённые данные записываются в CSV-файл, который используется для анализа траектории движения человека по управляемой беговой платформе.

Алгоритм управления предусматривает несколько возможных вариантов движения человека по беговой платформе:

- автоматический (на основе текущего положения человека по некоторому методу управления);
- ручной (человек управляет дорожкой);

- детерминированный (скорость жестко определена программой).

Для сбора данных и обеспечения равных условий для разных испытуемых использовался детерминированный режим функционирования, в котором предусмотрены следующие этапы:

- возрастание скорости платформы пропорционально времени в течение 3 секунд;
- в течение 6 секунд скорость изменяется согласно закону синуса;
- за следующие три секунды скорость убывает до нуля;
- в течение 3 секунд платформа не движется.

Циклическое использование данного режима позволяет собрать большое количество данных о перемещении человека для эффективного анализа траектории движения человека, а также алгоритмов управления беговой платформой. График изменения скорости в детерминированном режиме представлен на рисунке 2. Так как дорожка поддерживает движение в двух направлениях, то координаты по оси Z могут меняться как в положительную, так и в отрицательную стороны. Для получения траектории движения человека из CSV-файла извлекаются положения спины и ног человека по оси Z . Чтобы получить абсолютную траекторию движения человека, из полученных координат вычитается скорость полотна дорожки. Используя библиотеку `matplotlib`, строим график для анализа полученной траектории движения человека по беговой платформе. На рисунке 2 рассмотрена ситуация, когда пользователь движется в отрицательную сторону в течение 30 секунд и проходит около 15 метров.

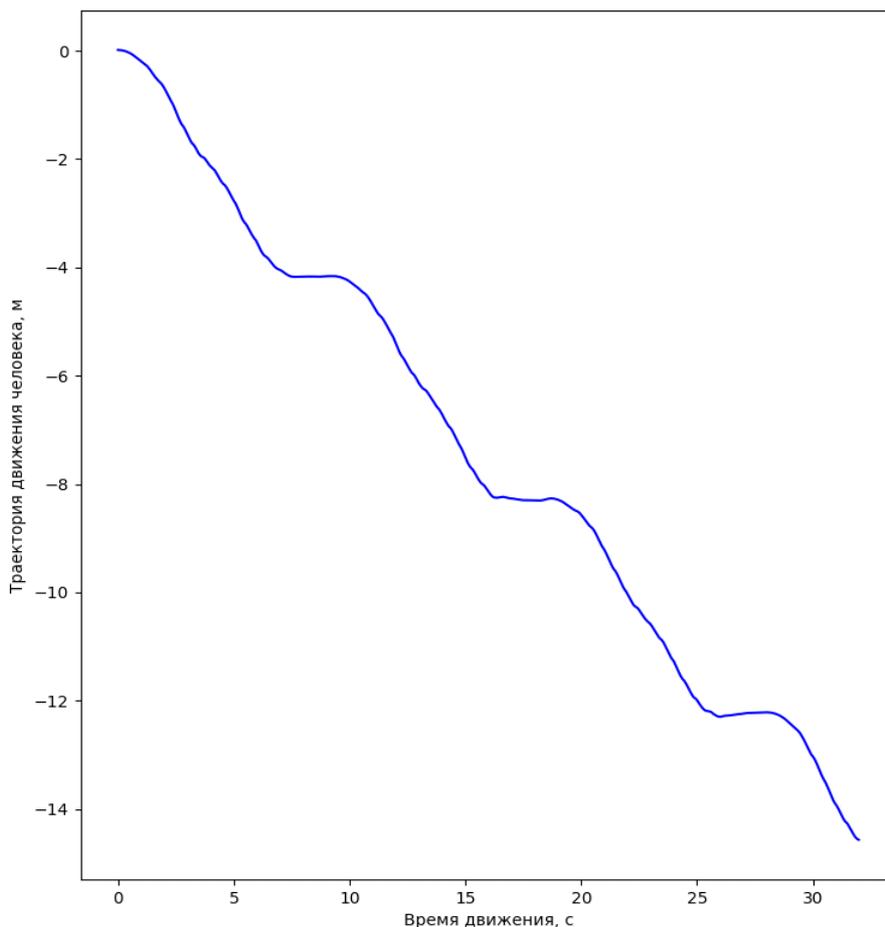


Рис. 2. Записанная траектория движения человека

Собранные данные также позволяют определить текущую скорость дорожки. Для этого текущая скорость дорожки, заданная в системе управления, преобразуется в размерность м/с путем деления на поправочный коэффициент. Скорость также может быть задана поло-

жительно или отрицательно в зависимости от направления движения человека. Скорость дорожки для записанной траектории человека представлена на рисунке 3.

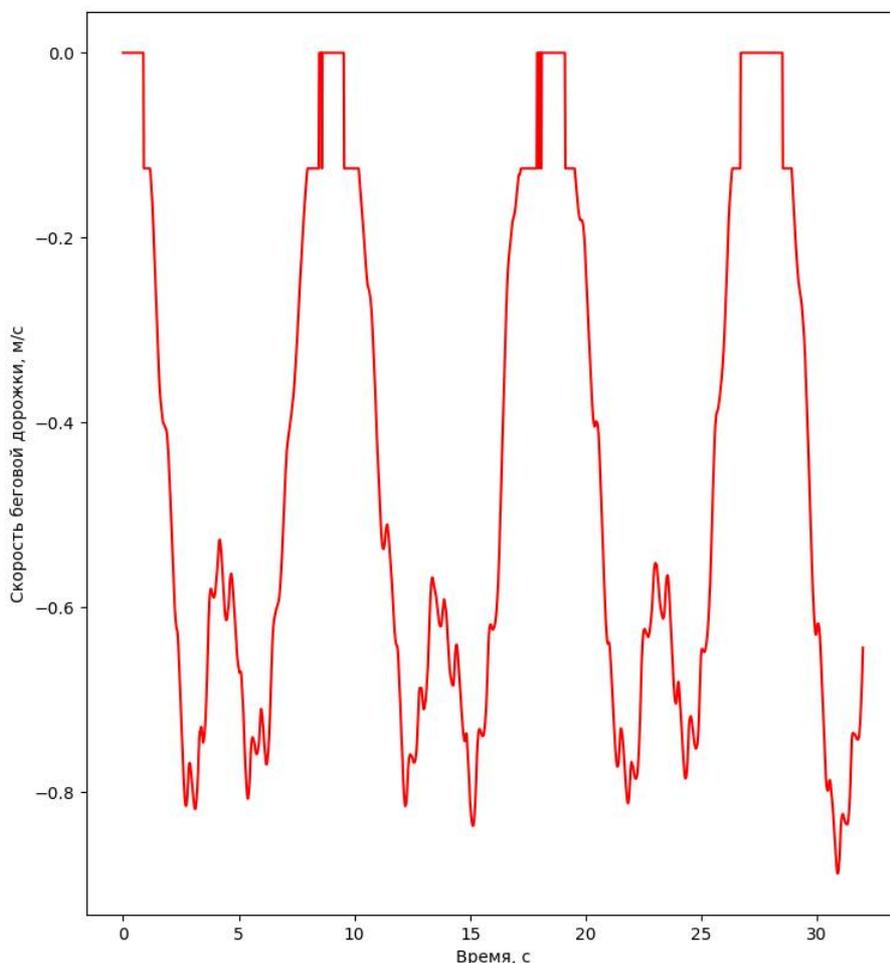


Рис. 3. Скорость беговой дорожки

В процессе создания системы управления беговой платформой разработан подход к сбору данных о перемещении человека на беговой платформе, а также выполнена обработка данных. Использование алгоритма позволило получить абсолютную траекторию движения человека по беговой платформе и определить экспериментально скорость дорожки. Эти данные можно использовать в дальнейшем для реализации различных алгоритмов управления, их тестирования, а также для анализа процесса перемещения человека.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00660.

Библиографический список

1. Souman J. L. et al. Making virtual walking real: Perceptual evaluation of a new treadmill control algorithm // ACM Transactions on Applied Perception (TAP). – 2010. – Т. 7. – №. 2. – С. 1-14.
2. Caserman P. et al. Real-time body tracking in virtual reality using a Vive tracker // Virtual Reality. – 2019. – Т. 23. – №. 2. – С. 155-168.
3. Yoon J., Manurung A., Kim G. S. Impedance control of a small treadmill with sonar sensors for automatic speed adaptation // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2014. – Т. 12. – №. 6. – С. 1323-1335.
4. Обухов А. Д., Сиухин А. А. Нейросетевой метод управления адаптивной системой имитации физических нагрузок // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Т. 28. – №. 3 (67). – С. 61-74.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЛУКАСА – КАНАДЕ

Д.В. Ловкин, С.Е. Корепанов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, demu2552@mail.ru*

Аннотация. В работе представлено описание алгоритма слежения за объектами на видео-последовательности, основанного на методе оценки оптического потока Лукаса–Канаде. Представлены результаты экспериментальных исследований алгоритма.

Ключевые слова: слежение за объектом, оптический поток, особые точки, оценка параметров.

ALGORITHM OF AUTOMATIC TRACKING OBJECT USING LUCAS – KANADE METHOD

D.V. Lovkin, S.E. Korepanov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, demu2552@mail.ru*

The summary. The paper describes an algorithm for tracking objects in a video sequence based on the Lucas–Kanade optical flow estimation method. The results of experimental research were presented.

Keywords: object tracking, optical flow, interest points, parameter estimation.

Разработка алгоритмов автоматического слежения за движущимися объектами в последовательности видеок кадров является одной из наиболее актуальных задач и представляет в настоящий момент большой практический интерес в области обработки изображений. Алгоритмы слежения за объектом являются важными компонентами многих приложений для компьютерного зрения, включая мониторинг трафика, обеспечение безопасности дорожного движения и т.п. Программы для отслеживания движущихся объектов в последовательности изображений используются многими устройствами видеонаблюдения как в повседневной жизни, так и в научной, военной, охранной и промышленной сферах.

В общем случае задача отслеживания движущегося объекта заключается в определении его местоположения на каждом кадре видеопоследовательности. Существует множество различных методов, позволяющих осуществить слежение за объектом в последовательности изображений. Один из таких методов основан на оценке оптического потока. Оптический поток — это изображение видимого движения, представляющее собой сдвиг каждой точки между двумя изображениями. По сути, он представляет собой поле скоростей (т.к. сдвиг с точностью до масштаба эквивалентен мгновенной скорости) [1-3]. Для вычисления оптического потока обычно используются локальные и глобальные дифференциальные методы [4]. Локальные методы (оценка оптического потока производится в локальной области изображения) позволяют достаточно быстро вычислить оптический поток на участке изображения. Глобальные методы (оценка оптического потока производится по всему изображению) являются более вычислительно сложными, что не позволяет их использовать в некоторых задачах реального времени. В случае слежения за объектом, ориентированном на решение задачи в реальном масштабе времени, предлагается использовать локальные методы. В настоящее время среди алгоритмов оценки оптического потока локальным методом выделяют алгоритм Лукаса – Канаде, Farneback, блочные методы и другие [5].

В данной работе ставится задача слежения за автомобилем, движущимся по автомобильной дороге в потоке других машин. Предполагается, что объект в процессе слежения может быть частично заслонен, а также подвергнут незначительным изменениям яркости.

Для решения данной задачи на высокоуровневом языке MATLAB был разработан алгоритм, основанный на оценке оптического потока.

Описание алгоритма

Разработанный алгоритм слежения за объектом состоит из следующих этапов:

1. Вычисление оптического потока.
2. Поиск особых точек.
3. Сегментация изображения.
4. Морфологическая обработка.
5. Разметка и параметризация сегментов.
6. Обнаружение объекта.
7. Обновление зоны поиска.

Перечисленные выше этапы выполняются на каждом кадре видеопоследовательности, кроме первого кадра.

На первом кадре видеопоследовательности положение объекта известно и задается соответствующими координатами его центра и размерами или целеуказанием оператора. Также формируется зона поиска на основе известного местоположения объекта.

Рассмотрим подробнее каждый из приведенных этапов работы алгоритма на последующих кадрах.

На первом этапе вычисление оптического потока на соседних кадрах происходит с помощью метода Лукаса – Канаде [6]. Особенность данного метода в том, что при определении смещения конкретного пикселя принимается во внимание только его локальная окрестность. Для вычисления смещения конкретного пикселя составляются уравнения оптического потока для данного пикселя и соседних пикселей. Решив уравнения оптического потока для пикселей в зоне поиска объекта, формируется карта скоростей векторов оптического потока (рисунок 1).



Рис. 1. Векторы оптического потока на изображении

Для вычисления оптического потока используются две зоны поиска объекта на соседних кадрах. Первая зона формируется на предыдущем кадре и ее центр соответствует найденному местоположению объекта на предыдущем кадре. На текущем кадре строится вторая зона поиска, центр которой располагается в тех же координатах, что и центр первой зоны.

На втором этапе алгоритма происходит поиск особых точек. Необходимость добавления в алгоритм особых точек объясняется тем, что, вычисляя оптический поток на каждом кадре, значения скоростей в зоне поиска объекта будут вычисляться правильно не во всех точках, т.к. часть точек может принадлежать посторонним объектам, попавшим в зону поиска, или фону. Для поиска точек, принадлежащих объекту, следует учесть локальные особенности изображения. Поскольку автомобиль содержит достаточно много углов, то для их выделения используется угловой детектор Харриса [7].

На третьем этапе осуществляется сегментация изображения зоны поиска с использованием пороговой обработки [8]. Данный этап алгоритма особенно важен, так как правильно

подобранный порог напрямую влияет на точность дальнейшего обнаружения объекта и, соответственно, на качество слежения.

Точки объекта и точки фона на изображении отличаются скоростью и направлением. Чтобы отделить точки объекта от точек фона, необходимо определить вектор скорости движения объекта (модуль скорости и направление).

Для решения данной задачи предлагается использовать только особые точки, т.к. большая их часть принадлежит объекту. Поскольку углы на изображении могут быть у других объектов или участков фона, то отфильтруем особые точки, принадлежащие к объекту слежения по направлению движения объекта. В качестве направления движения объекта будем рассматривать направление, в котором движется большая часть особых точек в зоне поиска объекта.

Таким образом, для каждой точки в зоне поиска проводится соответствие: скорость точки по модулю должна быть больше порогового значения, а направление точки – соответствовать направлению движения объекта. В алгоритме рассматривается четыре направления движения (вверх, вниз, вправо, влево).

Получаемое в результате сегментации бинарное изображение можно описать системой (1).

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } V(x, y) > k \cdot T; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где $V(x, y)$ – модуль значения векторов оптического потока в точке (x, y) ;

T – пороговая величина;

k – задаваемый положительный пороговый коэффициент. Эмпирически было установлено, что наиболее оптимальные для корректной работы алгоритма значения $k \in [0,3 \div 0,6]$.

На рисунке 2, б приведен результат сегментации изображения объекта слежения, приведенного на рисунке 2, а.

В результате пороговой обработки будут иметь место ошибки. Часть точек может ошибочно рассматриваться как объект, другая – ошибочно рассматриваться как фон. Поэтому для устранения ошибок на четвертом этапе алгоритма используется морфологическая обработка бинарного изображения. В начале применяется двумерная медианная фильтрация, которая позволяет отфильтровать незначительную «зернистость», возникшую в результате сегментации (рисунок 2, в). Размер фильтра выбран 3×3 . Далее применяется морфологическая эрозия для удаления малых шумовых сегментов и морфологическое закрытие, которое заполняет внутренние дыры и сглаживает края выделенных областей (рисунок 2, г).

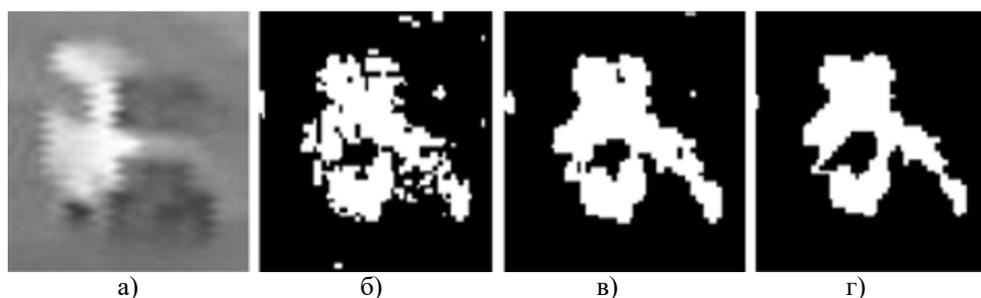


Рис. 2. Изображение объекта: а) полутоновое изображение объекта; б) бинарное изображение; в) бинарное изображение после добавления медианного фильтра; г) бинарное изображение после морфологических преобразований

На пятом этапе алгоритма производится процедура разметки и параметризации полученных после морфологических операций связных областей (сегментов) на бинарном изображении. В результате формируется список параметров сегментов (координаты и размеры в пикселях).

На шестом этапе на основе полученных сегментов осуществляется обнаружение объекта. В качестве объекта выбирается сегмент с наибольшей площадью и происходит выделение объекта прямоугольной рамкой (рисунок 3). Вычисляются координаты центра объекта (под центром понимается центр прямоугольной рамки, ограничивающей объект) на изображении.

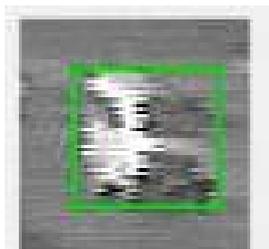


Рис. 3. Выделенный рамкой объект

Заключительным этапом алгоритма является обновление зоны поиска. После нахождения объекта в соответствии с его вычисленными координатами необходимо обновить зону поиска на текущем кадре. Центр обновленной зоны соответствует центру найденного объекта.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования алгоритма проводились на пяти натуральных видеопоследовательностях (всего более 750 кадров). На данных сюжетах производилось слежение за автомобилями, которые двигались по дороге в потоке других машин.

Целью экспериментальных исследований являлась проверка качества слежения алгоритма, а также проверка работоспособности алгоритма при наличии аддитивного нормального шума с различной дисперсией. Для оценки качества слежения использовалась ошибка среднеквадратического отклонения (СКО) измеренных координат объекта от эталонных. Эталонные координаты были предварительно сформированы с использованием специального программного обеспечения. В результате была получена зависимость СКО ошибки измерения координат объекта от СКО шума (рисунок 4). Значения СКО ошибки измерения усреднены по всем сюжетам. Значения СКО шума были выбраны в диапазоне от 0 до 0,45 с шагом 0,1.

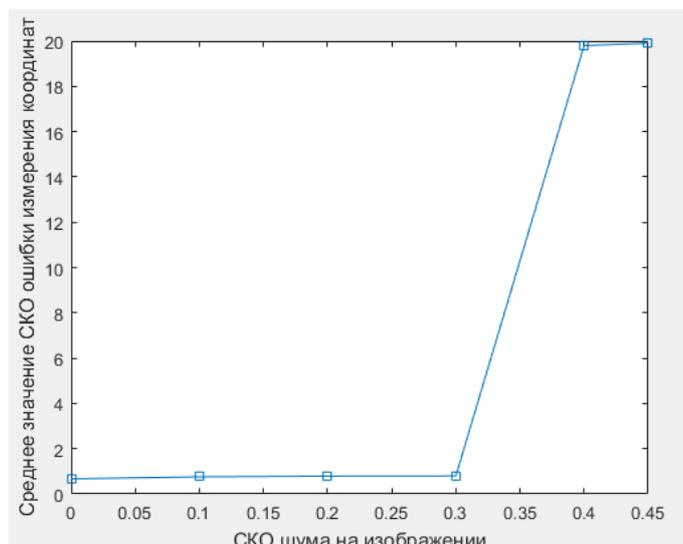


Рис. 4. Иллюстрация усредненных значений зависимости среднеквадратического отклонения ошибок от значений СКО шума для пяти видеосюжетов

График, представленный на рисунке 4, позволяет сделать вывод о том, что в среднем алгоритм работоспособен при значениях СКО шума не выше 0,3. При значениях, превышающих данную величину, происходит срыв слежения. СКО ошибки в отсутствие шума в среднем составляет 0,65.

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили работоспособность алгоритма.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов // Цифровая обработка сигналов. – 2006. - №2. – С. 45-51.
2. Казаков Б.Б. Эффективные методы выделения движения объектов в последовательности изображений / Б.Б. Казаков // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – Вып. 5. – С. 55-60.
3. Лукьяница А.А. Цифровая обработка видеоизображений / А.А. Лукьяница, А.Г. Шишкин. – М.: Ай-Эс-Си Пресс, 2009. – 518 с.
4. Enkelmann W. Obstacle detection by evaluation of optical flow fields from image sequences // Image and Vision Computing. 1991. Vol. 9, no. 3. P. 110-168.
5. Barron J.L., Fleet D.J. Beauchemin S.S. Performance of Optical Flow Techniques // International Journal of Computer Vision. 1994. No 12. P. 43-77.
6. Bruce D. Lucas, and Takeo Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // IJCAI, 1981, P. 121-130.
7. Harris C. G. et al. A combined corner and edge detector // Alvey vision conference. – 1988. – V. 15. – №. 50. – P. 73-111.
8. Ловкин Д.В., Корепанов С.Е. Слежение за объектом с использованием метода оценки оптического потока // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXV Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов / Рязанский государственный радиотехнический университет. – Рязань: РГРТУ, 2020. – С. 235-236.

УДК 004.932.4; ГРНТИ 28.23.15

ПОДХОД К ВОССТАНОВЛЕНИЮ ЦЕПОЧЕК АЛГОРИТМОВ С ЧАСТИЧНО ФИКСИРОВАННОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

В.В. Белов*, А.К. Лопатин**

* Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, vv_beloff@yandex.ru

** Государственный социально-гуманитарный университет,
Российская Федерация, Коломна, ak_lopatin@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются механизмы восстановления композиций алгоритмов основанные на вероятностных способах оценки качества систем их использующих. Предлагается обобщение изложенной ранее методики для формирования и ведения композиции алгоритмов обработки изображений.

Ключевые слова: обработка изображений, композиции алгоритмов,.

AN APPROACH TO RECONSTRUCTING ALGORITHM CHAINS WITH A PARTIALLY-FIXED FUNCTIONAL STRUCTURE

A.K. Lopatin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, vv_beloff@yandex.ru

**State Univirsity of Humanities and Social Studies.,
Russia, Kolomna, ak_lopatin@mail.ru

The summary. The paper examines mechanisms for restoring the compositions of algorithms based on probabilistic ways to assess the quality of the systems they use. It is proposed to generalize the methods outlined earlier for the formation and composition of image processing algorithms.

Keywords: image processing, chains of algorithms.

При разработке систем обработки изображений постоянно возникает проблема преобразования изображения к «нужному» виду. При этом формируемые критерии носят только частично чёткий характер. Часто в качестве таких критериев могут выступать следующие: цветность (требования к палитре), «степень зашумлённости», геометрические размеры, количество компонент связности на изображении и др. Решение отдельных задач является достаточно тривиальным и описано в многочисленных источниках [1 – 4]. С другой стороны, практикоориентированные задачи носят комплексный характер, требующий применения комбинации алгоритмов, генерируемых и синтезируемых либо привлечённым экспертом, либо автоматизированно, посредством эвристических алгоритмов [5 – 7].

Автоматизированная генерация алгоритмов в большинстве своём приводит к созданию избыточного количества композиций, часть из которых в конкретных условиях является заведомо неприменимыми, а часть – неоптимальными. Это приводит к возникновению нескольких вопросов.

1. Каким образом осуществлять и как оптимизировать процесс генерации композиций алгоритмов в условиях частично нечётко формулируемых требований?
2. Как определить оптимальную композицию для конкретных условий задачи?
3. Как поступать с «лишними» композициями?
4. Как менять выбранную «локальную» композицию при изменении условий работы композиции в конкретной системе?

Методика синтеза композиций алгоритмов, «улучшающих» изображения

Под нечетким термином «улучшение» будем подразумевать преобразование исходного изображения к изображению, обладающего заданными характеристиками.

Синтез и выбор оптимальной композиции алгоритмов для конкретной задачи ранее частично был описан в работах [6, 8]. Его расширение на случай решения более общей задачи основано на применении модификации введённого авторами в работе [6] отношения пе-

реходного визуального сходства, путём введения сводного критерия, в состав которого входит линейный коэффициент корреляции исходного и эталонного изображений и свободно-определяемые параметры изображения.

$$r^* = \sqrt{(r_{f,g})^2 + c_i * \sum_{i=1}^N (crit_i - et_i)^2} \quad (1)$$

В формуле (1) $crit_i$ – это оценка критерия с номером i , et_i – «эталонное» значение критерия, c_i – степень значимости критерия. В частности, при $c_i = 0, \forall i \in [1, N]$ получаем указанный коэффициент визуального сходства $r_{f,g}$, использованный при решении задачи синтеза композиций алгоритмов получения градиентных изображений, схожих с визуальным описанием эталона.

Порядок синтеза алгоритмов сводится к итеративному выполнению следующих шагов.

1. Определение / пополнение групп функциональных *операторов* (алгоритмов), из которых формируются цепочки: для каждого шага решения поставленной задачи определяются наборы альтернативных операторов. В состав каждой группы обязательно включается «пустой» оператор, – не имеющий программного кода. «Включение» этого оператора в цепочку означает, что ни один из операторов данной группы не используется, т. е. соответствующая функциональная операция в формируемом алгоритме не предусматривается.

Начальным набором правил, позволяющим наполнять пул алгоритмов, служит система аксиом Цермело-Френкеля. Эта система аксиом служит для определения понятия множества. Если предлагаемый алгоритм при добавлении его к существующей системе нарушает эту систему аксиом, то предлагаемый алгоритм отбрасывается.

2. Определение *целесообразной последовательности* операторов, определяющей структуру возможных цепочек, образующих алгоритм решения поставленной задачи приведения изображения к виду, визуально сходному с эталонным.

3. Формирование *всех возможных цепочек* алгоритмов, образующих алгоритм преобразования объектов, представленных на обрабатываемых снимках. В процессе формирования цепочек первоначально создаются операторные группы – путем определения конкретных значений параметров. Конечность множества значений параметров обеспечена следующими особенностями. Многие параметры семантически целочисленны и их значения ограничены сверху эмпирически сложившимися максимальными значениями.

4. Определение значений показателя сложности (трудоемкости) для всех сформированных цепочек.

5. Ранжирование сформированных цепочек по значению показателя трудоемкости.

6. Осуществление поиска по принципу дихотомии в упорядоченном множестве сформированных цепочек цепочки, образующей алгоритм вычисления изображения, обеспечивающий требуемую корректность преобразования изображений, представленных на обрабатываемых снимках, и одновременно наиболее простую по трудоемкости. Этот этап имеет экзогенно-задаваемый параметр ε – характеризующий допустимое отклонение полученного изображения от шаблона: цепочка алгоритмов считается приемлемой, если коэффициент визуального сходства между полученным изображением и шаблоном не меньше, чем $1-\varepsilon$.

7. После завершения этапа дихотомического поиска осуществляется поиск требуемой цепочки с помощью генетического алгоритма, начальная популяция которого включает вариант, найденный дихотомией. Этот этап предусмотрен потому, что однозначной связи между сложностью алгоритма и качеством его результата нет. Генетический алгоритм осуществляет одновременно и параметрическую, и структурную идентификацию формируемых цепочек. В общем случае для его реализации могут потребоваться значительные временные за-

траты, поэтому он имеет специальный задаваемый экзогенно параметр Λ – количество попыток найти лучшую цепочку.

Особенности процесса генерации композиции алгоритмов преобразования изображений

В процессе синтеза композиции алгоритмов с помощью генетического алгоритма происходит генерация избыточного числа композиций. Функционально их структура может быть зафиксирована с целью учёта конкретной решаемой задачи. К примеру, в [6] была определена общая структура композиции. Однако наличие «пустого» оператора, осуществляющего «нейтральное» преобразование, позволяет говорить об упорядоченной структуре композиции произвольной длины. Часть композиций будет различаться только численными параметрами, не оказывающими воздействие на быстроедействие композиции, другая – структурно отличаться наличием «пропусков» в своей структуре.

С точки зрения экономии памяти системы целесообразно удалять «лишние» композиции, не прошедшие на последующие этапы генерации генетического алгоритма, однако с целью экономии времени новых генераций композиций в случае изменения условий эксплуатации или требований – предлагается сохранять композиции, структурно отличающиеся от «конкурентов», учитывая количество встреч таких композиций в различных поколениях, сформированных генетическим алгоритмом, и обладающих показателем качества, отличным от некоторой определяемой экзогенно нижней границы.

Особенности повторной генерации композиции алгоритмов

Описанный выше подход позволяет свести процесс повторной генерации композиции алгоритмов к процессу восстановления «пропущенных» значений – задаче достаточно известной в статистике.

Существует несколько вариантов восстановления пропущенных значений в различных выборках. Выделяют два направления – “Marginalization” и “Imputation”. Первый подход подразумевает устранение из рассмотрения объектов с неполным описанием. Второй заключается в восстановлении пропущенных значений признаков (или объектов).

В описываемом нами случае применение “Marginalization” не рассматривается, поскольку это в конечном счёте приводит к необходимости повторного запуска полной генерации пула алгоритмов генетическим алгоритмом, что достаточно ресурсоёмко.

Применение «Imputation» подхода в данном случае возможно по одному из нескольких способов.

1. Производится импутация параметров средним или медианной характеристикой алгоритмов, стоящих на определённой позиции в композиции. При этом значения вычисляются независимо для каждого параметра каждого алгоритма, так что корреляции между параметрами не учитываются. Метод не работает с качественными переменными. Никак не оценивается погрешность импутации.
2. Импутация данных с помощью метода ближайших соседей. Этот метод учитывает корреляцию между параметрами. Вычислительно дороже, так как требует держать в памяти не просто структуры алгоритмов, но и их параметры. Важно понимать, какая метрика дистанции используется для поиска соседей.
3. Импутация на основе поиска композиции, сработавшей на максимально похожем изображении. Осуществляется в несколько шагов: а) поиск наиболее похожего изображения, б) поиск композиций алгоритмов проводящих оптимизации отдельных параметров, отличающих найденное изображение от текущего, в) выстраивание единой композиции алгоритмов из подобранных путём стохастического поиска.

Отметим, что 1 и 2 способы работают корректно, только если восстанавливаются композиции алгоритмов определённой структуры, т. е. когда восстанавливается параметр конкретного «промежуточного» алгоритма. Третий способ позволяет восстановить и структуру композиции. В целом, вышеперечисленные способы основаны на аналогичных способах восстановления пропущенных выборочных данных, но применение подобных алгоритмов в задачах обработки изображений представляется перспективным развитием идей, заложенных в [6, 8], и позволит осуществить завершение разработки методики эволюционного синтеза алгоритмов обработки изображений.

Библиографический список

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Издание 3–е, исправленное и дополненное – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. Гренандер У. Лекции по теории образов (Том 2. Анализ образов); М.: СИНТЕГ, 2005. – 423 с.
3. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Под ред. Т.С. Хуанга. М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
4. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 400 с.
5. Махно Т.А. Автоматизированная система обработки ультра-звуковых изображений сонных артерий на основе эволюционных алгоритмов.: Дис. ... канд. техн. наук. Славянск., 2016. - 152 с.
6. Белов В.В., Лопатин А.К. Формирование смесей алгоритмов для решения задачи автоматического измерения размеров изделий на конвейерной ленте. Белов В.В., Лопатин А.К. Cloud of Science. 2017. Т. 4. № 3. С. 384 – 394.
7. Белоусов А.А., Спицын В.Г. Двухэтапный метод улучшения изображений // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии Microsoft в теории и практике программирования». Секция № 4 «Интеллектуальные системы и технологии». Томск, 17 – 18 марта 2009 г.. С. 123 – 125.
8. Белов В.В., Лопатин А.К. Применение генетических алгоритмов для формирования цепочек операторов, направленных на улучшение градиентных изображений // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы Материалы IV Международной научно-практической конференции. 2017. С. 57 – 61.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ СЛЕЖЕНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МЕТОДАХ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ

А.Ю. Овчинников, С.Е. Корепанов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, aleksovchinn@gmail.com*

Аннотация. Работа посвящена сравнению алгоритмов слежения за объектом, основанных на корреляционных методах в сложных условиях наблюдения. Приводятся их основные особенности, достоинства и недостатки, а также проведено их сравнение с помощью количественных характеристик.

Ключевые слова: слежение за объектом, корреляционный метод, корреляционные алгоритмы.

COMPARISON OF TRACKING ALGORITHMS BASED ON CORRELATION METHODS IN COMPLEX OBSERVATION CONDITIONS

A.Y.Ovchinnikov, S.E. Korepanov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, aleksovchinn@gmail.com*

The summary. The work is devoted to the comparison of object tracking algorithms based on correlation methods in difficult observation conditions. Their main features, advantages and disadvantages are given, and their comparison is carried out using quantitative characteristics.

Keywords: object tracking, correlation method, correlation algorithms.

Решение задачи слежения за объектом состоит в определении координат объекта слежения на каждом кадре наблюдаемой видеопоследовательности, при этом не ставится задача управления перемещением датчика изображений [1]. Определение координат усложняется тем обстоятельством, что текущее изображение объекта с течением времени может изменяться из-за поворотов в пространстве, удаления, приближения и через некоторое время может стать не похоже на исходное изображение объекта, таким образом условия наблюдения можно назвать сложными.

Для решения задачи слежения за объектом, сначала его необходимо обнаружить на изображении. Для обнаружения объектов зачастую применяют сопоставление с эталоном. Под эталоном понимается известное изображение обнаруживаемого объекта. При работе эталонное изображение объекта последовательно перемещается по изображению и исследуется его сходство с различными областями изображения. Если сходство между неизвестным объектом и эталоном велико, то этот объект помечается как соответствующий эталону [2]. В качестве меры, с помощью которой принимается решение о степени сходства изображений, используется функция сходства. Наибольшее распространение в качестве функции сходства получила взаимная корреляционная функция [1].

К алгоритмам слежения, основанным на корреляционном методе, относятся такие алгоритмы, как классический корреляционный алгоритм, разностные корреляционные алгоритмы, алгоритмы, основанные на адаптивных корреляционных фильтрах и другие.

Классический корреляционный алгоритм

Алгоритм использует классический корреляционный критерий [3,4], основанный на свертке эталонного и текущего изображений для различных возможных положений объекта на изображении. Критерий имеет вид:

$$F_K(\lambda_x, \lambda_y) = l_{\lambda_x, \lambda_y} * E = \sum_{(v, \mu) \in E} l(\lambda_x + v, \lambda_y + \mu) e(v, \mu), \quad (1)$$

где λ_x, λ_y – координаты центра объекта в системе координат изображения L;

l_{λ_x, λ_y} – часть наблюдаемого изображения с центром в координатах λ_x, λ_y с размерами, соответствующими размерам E;

$e(v, \mu)$ – элементы эталонного изображения объекта E;

v, μ – координаты точек, составляющих изображение объекта, в системе координат изображения объекта E (см. рисунок 1).

Критерий (1) также имеет название критериальной функции [1].

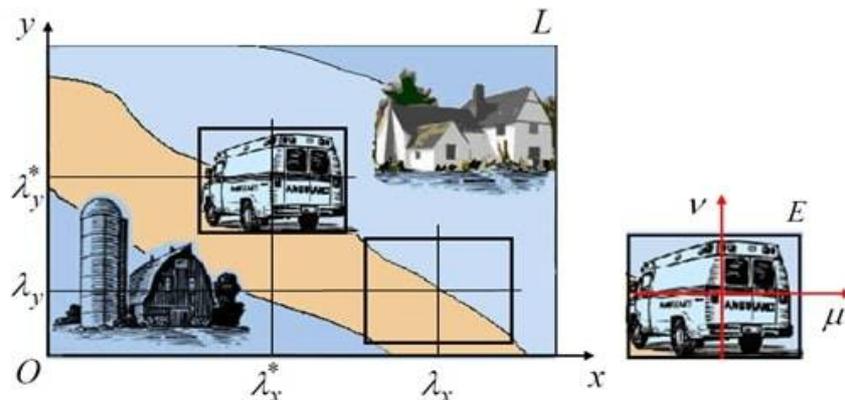


Рис. 1. Системы координат изображения L и объекта E

Недостатками классического корреляционно-экстремального алгоритма являются большое количество операций умножения, а также то, что он может давать грубые ошибки при наличии неоднородного фона на изображении.

Разностные корреляционные алгоритмы

Для снижения требуемого объема вычислений при поиске объектов на изображении, что особенно важно при работе в реальном масштабе времени, было предложено использовать вместо корреляционных критериальных функций так называемые разностные критериальные функции вида (2) и (3), для которых необходимо отыскивать глобальный минимум[3].

$$F_{p1}(\lambda_x, \lambda_y) = \sum_{(v, \mu) \in E} |l(\lambda_x + v, \lambda_y + \mu) - e(v, \mu)|, \quad (2)$$

$$F_{p2}(\lambda_x, \lambda_y) = \sum_{(v, \mu) \in E} (l(\lambda_x + v, \lambda_y + \mu) - e(v, \mu))^2. \quad (3)$$

Преимуществом разностных функций перед корреляционными функциями является отсутствие в них операции умножения. В то же время при малых отношениях сигнал-шум (менее трех) точностные характеристики разностных функций уступают корреляционным [3,4]. Под отношением сигнал-шум понимается отношение контраста объекта относительно фона к среднеквадратическому отклонению шума, присутствующего на изображении [4].

К недостаткам классического корреляционного алгоритма и разностных корреляционных алгоритмов можно отнести большое количество априорной информации, описывающей объекты, а также высокую вычислительную сложность. Кроме того алгоритмы неустойчивы к возможным преобразованиям изображения эталонного объекта.

Адаптивные корреляционные фильтры

Адаптивные корреляционные фильтры могут использоваться для слежения за объектами в сложных условиях при наличии геометрических преобразований изображения объекта (изменение масштаба, ракурса, сдвига и поворота, других преобразований).

Адаптивный фильтр – фильтр, в котором параметры изменяются в процессе работы, набор этих параметров зависит от критерия работы адаптивного фильтра [4].

Примерами адаптивных корреляционных фильтров являются фильтр с минимальной выходной суммой квадратичной ошибки MOSSE (Minimizing the Output Sum of Squared Error) [6], фильтр с усредненным результирующим значением, ASEF (Average of Synthetic Exact Filters) [6,7] и др.

Адаптивный фильтр MOSSE – это искусственно создаваемый шаблон, корреляция которого с исходным кадром позволяет получить заранее заданную желаемую реакцию (отклик) при обнаружении объекта слежения [4]. Так как фильтр MOSSE применяется для обработки сигналов в частотной области, то корреляцию можно записать в виде:

$$G = H \odot F^*, \quad (4)$$

где F – фурье-образ входного изображения;

G – фурье-образ выходного изображения (отклика);

H – фурье-образ фильтра;

\odot – обозначает поэлементное умножение;

$*$ – обозначает комплексное сопряжение.

В качестве отклика в работе был использован низкочастотный фильтр Гаусса. Фильтр Гаусса был выбран ввиду того, что прямое и обратное фурье-преобразование функции Гаусса также является гауссовой функцией.

Общий вид фильтра MOSSE представляется следующим выражением:

$$H = \frac{\sum_i G \odot F_i^*}{(\sum_i F_i \odot F_i^*)}, \quad (5)$$

где i – номер кадра.

Таким образом, задается фильтр в частотной области G , вычисляется его прообраз g в пространственной области, а затем используется полученный пространственный фильтр, как ориентир для построения частотного фильтра H , и его прообраза h в пространственной области. В итоге именно к нахождению такого фильтра H и сведется задача слежения за объектом [4].

Если полученный в (5) фильтр усреднить по количеству преобразований поворота изображения объекта, получится фильтр ASEF:

$$H_\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i, \quad (6)$$

где i – количество преобразований поворота изображения объекта на видеопоследовательности.

Для того, чтобы сравнить рассмотренные алгоритмы, были проведены экспериментальные исследования с использованием несколько натуральных видеопоследовательностей. Видеопоследовательности содержат движущиеся автомобили и другие сложности условий наблюдения: деревья, здания. Для формирования сюжета использовалась среда математического моделирования MATLABR2016b

Экспериментальные исследования проводились для сравнения следующих алгоритмов слежения за объектом:

1. Классический корреляционный алгоритм слежения (ККА).
2. Разностный корреляционный алгоритм слежения (РКА).
3. Разностный корреляционный алгоритм слежения, использующий разностную критериальную функцию, возведенную в квадрат (РКАК).
4. Алгоритм слежения, основанный на ASEF фильтре.
5. Алгоритм слежения, основанный на MOSSE фильтре.

Для того, чтобы оценить работоспособность рассмотренных алгоритмов использовались следующие количественные характеристики:

1. Точность слежения за объектом в присутствии шума на изображении. Для определения данной характеристики необходимо найти среднеквадратическое отклонение (СКО) координат объекта в присутствии шума. В экспериментальных исследованиях использовался аддитивный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием.

СКО координат – усредненное значение отклонения рассчитанных координат центра объекта от эталонных координат центра объекта на изображении. Формула для СКО координат имеет вид [8]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_0 - \mu_0)^2 + (x_1 - \mu_1)^2 + \dots + (x_N - \mu_N)^2}{N}}, \quad (7)$$

где x_i – оцененные значения координат объекта на i -х изображения, μ_i – эталонные значения координат объекта, N – количество кадров.

2. Среднее время обработки одного кадра, вычисляемое в соответствии с выражением:

$$t_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (8)$$

где t_i – время обработки i -ого кадра видеопоследовательности, n – количество кадров видеопоследовательности.

Значения точности слежения за объектом в присутствии шума на изображении приведены в таблице 1

Таблица 1 - Оценка точности измерения координат исследуемых алгоритмов

Название алгоритма	Значение сигнал/шум	Значение СКО, пиксель
ККА	1	5.94
	2	2.60
	3	0.20
	4	0.13
	5	0.11
РКА	1	0.66
	2	0.28
	3	0.16
	4	0.13
	5	0.09
РКАК	1	0.86
	2	0.32
	3	0.17
	4	0.12
	5	0.11
ASEF	1	0.565
	2	0.039
	3	0.0349
	4	0.036
	5	0.0344
MOSSE	1	1.1
	2	0.048
	3	0.038
	4	0.034
	5	0.026

Среднее время обработки одного кадра для рассмотренных алгоритмов слежения приведено в таблице 2.

Таблица 2. Среднее время обработки одно кадра

Название алгоритма	ККА	РКА	РКАК	MOSSE	ASEF
Среднее время обработки одно кадра, с	0,32	0,26	0.27	0.01	0.02

По проведенным экспериментальным исследованиям можно сделать следующие заключения:

– алгоритм слежения MOSSE показал наилучшие результаты с точки зрения точности на сюжетах со сложной фоноцелевой обстановкой, характеризующейся поворотом, изменениями сдвига, а также изменениями его ракурса, присутствием шума на изображении, а также частичным заслонением объекта слежения;

– вычислительная сложность алгоритма MOSSE оказалась минимальной. Среди всех рассмотренных алгоритмов слежения алгоритм, основанный на MOSSE фильтре оказался в 29 раз быстрее, чем классический корреляционный алгоритм, в 23 раз быстрее чем разностный корреляционный алгоритм, в 24 раза быстрее, чем разностный корреляционный алгоритм, использующий разностную критериальную функцию, возведенную в квадрат, в 2 раза быстрее, чем алгоритм, основанный на ASEF фильтре.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
2. Орлянский А. Ю. Реконструкция искаженных фонограмм методом сравнительной обработки текущего и эталонного графических образов // Прикладная информатика. – 2012. – №. 1 (37).
3. Алпатов Б. А. Методы и алгоритмы обработки изображений в системах управления // Рязань: РГРТА. – 1999.
4. Овчинников А.Ю., Корепанов С.Е. Слежение за объектом с использованием алгоритма адаптивной фильтрации эталона MOSSE // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2019. – С. 50-52.
5. Алпатов Б. А., Селяев А. А. Алгоритм оценки местоположения объекта на двумерном изображении // Изв. вузов. Приборостроение. – 1988. – Т. 31. – №. 5. – С. 3.
6. Bolme D. S. et al. Visual object tracking using adaptive correlation filters // 2010 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2010. – P. 2544-2550.
7. Bolme D. S., Draper B. A., Beveridge J. R. Average of synthetic exact filters // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2009. – P. 2105-2112.
8. Миловзоров О.В., Тарабрин Д.Ю. Обобщенная структура как средство автоматизированного проектирования маршрутно-операционных технологических процессов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № S1 С.51-56.

УДК 004.021; ГРНТИ 20.19.29

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА

Д.В. Гадеев

*Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева,
Российская Федерация, Казань, gadeevdmiriy@gmail.com*

Аннотация. В этой работе рассмотрены вопросы, решить которые необходимо для успешного применения алгоритмов искусственного интеллекта по диагностике кожных заболеваний, рассмотрены ключевые вопросы, с которыми сталкиваются исследователи.

Ключевые слова: машинное обучение (ML), заболевания кожи, подбор параметров, разметка данных (datalabelling).

SELECTION OF OPTIMAL MACHINE LEARNING ALGORITHMS IN THE RESEARCH OF HUMAN SKIN DISEASES

D.V. Gadeev

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,
Russia, Kazan, gadeevdmiriy@gmail.com*

The summary. The paper discusses the issues that need to be solved for the successful application of artificial intelligence algorithms to the diagnosis of skin diseases, given the key issues faced by researchers.

Keywords: machine learning (ML), skin diseases, parameter selection, data labelling.

Введение

Ранняя и точная диагностика меланомы жизненно важна для снижения уровня смертности от этого заболевания. Однако даже для опытных специалистов в области дерматологии и онкологии диагностика на раннем этапе заболевания все еще остается сложной задачей, требующей взятия образцов ткани (биопсии), проведения лабораторных анализов, дорогостоящих и требующих специального оборудования. Для решений этих медицинских задач последние несколько лет все чаще и чаще используют модели машинного обучения, разрабатывают нейронные сети, помогающие в диагностике заболеваний, прогнозировании роста новообразований и предполагаемой продолжительности жизни пациента.

Главные задачи и подходы к их решению, алгоритмы решения

Первоочередная задача для исследователей — решить, на какие именно заболевания ориентироваться. Сосредоточиться на узкой области лучше, чем ориентироваться на несколько заболеваний сразу. Эту мысль подтверждает множество успешных примеров в области диагностики одной конкретной болезни [1]. Такой подход позволяет отойти от необходимости делать модель универсальной, сосредоточившись на чём-то одном. Это дает большую вариативность и подталкивает к более глубокому исследованию области интереса.

В области заболеваний кожи человека, представляющих существенную угрозу здоровью, можно выделить злокачественные образования: карциному и меланому. Их уже неоднократно исследовали на предмет возможности диагностики и предсказания роста опухолей, например, [2]. Тем не менее, еще рано говорить о повсеместном использовании алгоритмов ИИ в процессе диагностики раковых заболеваний. Этому есть несколько причин:

- 1) относительно небольшие наборы данных, которых недостаточно для точного и воспроизводимого исследования;
- 2) отсутствие единой базы данных изображений для их использования в моделях машинного обучения;
- 3) отсутствие универсальных алгоритмов для проведения исследований;

Первый вопрос решается с помощью аугментации (с англ. augmentation – «увеличение») данных. Этот метод позволяет успешно использовать небольшие наборы данных для

обучения нейросетей [3]. В его основе лежит работа с изображениями, из одного исходного изображения можно получить несколько его искусственно синтезированных двойников, которые будут после отданы для обучения нейросети. Таким образом размеры датасета возможно увеличить в 5-10 раз без сильных потерь в качестве данных.

В случае с численными данными классический подход неприменим, однако возможна реализация обработки данных с помощью автоэнкодера [4].

Остальные два упомянутых вопроса сходятся на нет на фоне роста числа коллабораций между разными областями [5], например, программированием и диагностической медициной, статистикой и прогностической медициной. Такое сотрудничество помогает обеим сторонам достичь успеха в своей области, при этом, создавая множество идей, та или иная часть которых может быть впоследствии реализована, как на всеобщее благо человечества, так и в более мелких масштабах.

В исследовании кожных покровов качество снимка не является критически важным критерием отбора снимков (как в исследованиях заболеваний дыхательных путей большую роль играло качество КТ- и МРТ- снимков грудной клетки, которое могло повлиять на точность предсказания. Такая разница может возникнуть между данными, собранными в развитых странах с лучшим медицинским оборудованием, чем в развивающихся странах и странах третьего мира). В распознавании изображений новообразований на коже человека ключевыми являются параметры самого пациента: цвет кожи (зависящий от расы пациента), возраст. Как выяснили ученые [6], раковые заболевания кожи слабо распространены среди людей не с белым цветом кожи, но, если и происходят, то протекают тяжелее и имеют более высокий показатель смертности по сравнению с пациентами с белой кожей. Это объясняется затрудненной диагностикой, недоступностью квалифицированной помощи в бедных странах, разницей в уровне меланина в коже разных людей и другими факторами.

При работе со снимками участков кожи необходимо учитывать цвет кожи. Соотношение данных обязательно должно быть сбалансировано во избежание перекоса результатов работы алгоритмов в ту или иную сторону. Этого позволяет избежать предварительный анализ данных с помощью различных средств (например, для работы на Python существует множество библиотек вроде Pandas или Seaborn, Scikit-image или Pillow).

Заключение

Мы сейчас находимся на стадии развития технологий искусственного интеллекта, и использование их в области здравоохранения неизбежно приведет к доступности качественной медицины для всех. Этому сейчас способствуют как рост числа исследований на пересечении двух областей, так и прогресс в области анализа и обработки данных. Главной задачей на данный момент является умелое использование этих технологий.

Библиографический список

1. Li et al. Automatic diagnosis of melanoma using machine learning methods on a spectroscopic system. *BMJ Medical Imaging* 2014 14:36
2. Гадеев Д.В. Предсказание размеров новообразований меланомы с помощью базовых алгоритмов машинного обучения // Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты: сборник материалов Международной научно-практической конференции, 2020 — 103 с.
3. Xing Y. et al. Adversarial Pulmonary Pathology Translation for Pairwise Chest X-Ray Data Augmentation. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol 11769.
4. Autoencoders [Электронный ресурс]. URL: <http://ufldl.stanford.edu/tutorial/unsupervised/Autoencoders/> (дата обращения 20.02.2021).
5. Ponchek T. To collaborate or not to collaborate? A study of the value of innovation from a sectoral perspective. *J Knowl Econ*, 2016, 7, 43-79.
6. Bradford P.T. Skin cancer in skin of color. *Dermatology nursing*, 2009, 21(4), 170-178.

УДК 681.515; ГРНТИ 50.03.03

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДИКТОРА СМИТА И ИММУННОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

А.И. Бобиков, Т.С. Бубнова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, tanya.bubnova.94@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается методика проектирования автоматической системы управления неустойчивым объектом с запаздыванием с целью обеспечить робастность системы к неточностям параметров модели объекта управления в предикторе Смита. Кроме того, система должна соответствовать желаемым критериям качества управления, в том числе времени регулирования и уровню перерегулирования. Для повышения робастности предлагается использование иммунных ПИД-регуляторов в предикторе Смита.

Ключевые слова: неустойчивый объект управления, ПИД-регулятор, иммунный ПИД-регулятор, предиктор Смита.

ROBUST CONTROL OF AN UNSTABLE OBJECT WITH LEAD-BREATHING WITH THE USE OF IMMUNE PID REGULATOR IN THE SMITH PREDICTOR

A.I. Bobikov, T.S. Bubnova

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, tanya.bubnova.94@mail.ru*

The summary. The paper considers a methodology for designing an automatic control system for an unstable object with a delay in order to ensure the robustness of the system to changes in the parameters of the controlled object. In addition, the system must meet the desired control criteria, including control time and overshoot level. To increase robustness, it is proposed to use the immunePID controllers with Smith predictor.

Keywords: unstable control object, PID controller, immune PID controller, Smith predictor.

Для управления объектами с запаздыванием довольно эффективно применение предиктора Смита, который позволяет значительно снизить влияние запаздывания на работу системы. Как правило, в системе управления с предиктором Смита используется ПИД-регулятор, позволяющий обеспечить устойчивость системы и желаемое качество управления. Но при изучении неустойчивых объектов управления (ОУ) с запаздыванием нередко возникают сложности в обеспечении устойчивости и качества в связи с неопределенностями параметров ОУ. Решение этой проблемы чаще всего сводится к разработке методики настройки ПИД-регулятора, как, например в работе [1], где для объекта с двумя неустойчивыми полюсами предложен алгоритм для расчета параметров регулятора. Такой подход позволяет не только обеспечить устойчивость системы, но и снизить перерегулирование в сравнении с методом Циглера-Николса настройки ПИД-регулятора. В статье [2] представлен подход, позволяющий за счет преобразования классического предиктора Смита в фильтрованный предиктор Смита, содержащий в отличие от классического предиктора Смита фильтр обратной связи, добиться значительного уменьшения влияния возмущающего воздействия, а также снизить перерегулирование и уменьшить время регулирования. Однако, помимо повышения качества управления, важно учитывать робастность системы к неопределенностям ОУ. С этой точки зрения не всегда эта система управления с фильтрованным предиктором Смита демонстрирует высокую степень робастности.

В данной статье систему управления с предиктором Смита, представленную в работе [2], предложено модифицировать для повышения степени робастности системы к неопределенностям модели ОУ с помощью преобразования ПИД-регуляторов в иммунные ПИД-регуляторы, построенные таким образом, чтобы каждый из параметров ПИД-регуляторов настраивался с помощью отдельного иммунного регулятора. Такой подход позволил исклю-

чить из структуры системы фильтр обратной связи, компенсируя его отсутствие соответствующим выбором параметров иммунных ПИД-регуляторов.

Система управления с фильтрованным предиктором Смита

Система управления с фильтрованным предиктор Смита [2], структурная схема которой представлена на рисунке 1, содержит в себе два ПИД-регулятора, один из них с передаточной функцией (ПФ) $W_2(p)$ отвечает за реакцию системы на задающее воздействие v , а второй с ПФ $W_3(p)$ – за реакцию на возмущающее воздействие d , при этом будем считать, что $W_1(p)$ – передаточная функция неустойчивого объекта, τ – номинальное время запаздывания объекта, $W_m(p)$ – передаточная функция модели объекта, а τ_m – время запаздывания модели, u – сигнал управления, y – управляемая величина.

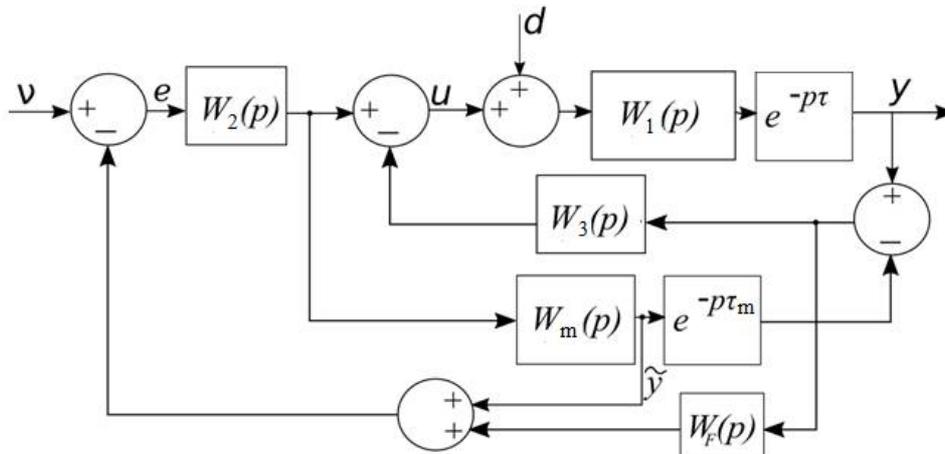


Рис.1. Структурная схема системы управления с фильтрованным предиктором Смита

Передаточные функции замкнутой системы слежения и регулирования

$$\Phi(p) = \frac{y}{v} = \frac{W_2(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}}{1+W_2(p)W_m(p)}, \quad (1)$$

$$\Phi_d(p) = \frac{y}{d} = \frac{\{1+W_2(p)W_m(p)[1-W_f(p)e^{-p\tau_m}]\}W_m(p)e^{-p\tau_m}}{[1+W_2(p)W_m(p)][1+W_3(p)W_m(p)e^{-p\tau_m}]}. \quad (2)$$

В идеальном случае предполагают, что модель объекта управления точно описывает его свойства, при этом фильтр обратной связи $W_f(p)$ позволяет значительно снизить влияние возмущающего воздействия на управляемую величину [2]. Однако, как показали эксперименты, даже при небольших неточностях в модели ОУ высока вероятность дестабилизации системы, что приводит к необходимости отказаться от применения фильтра обратной связи.

В данной работе каждый из ПИД-регуляторов на рисунке 1 преобразован в иммунный ПИД-регулятор, что позволило получить робастную систему управления с приемлемым качеством, и тем самым компенсировать отсутствие фильтра обратной связи. В итоге полученную систему будем называть *системой управления с иммунным предиктором Смита*.

ПИД-регулятор

Работа трехканального ПИД-регулятора описывается выражением:

$$u_{pid}(t) = u_p + u_i + u_d = k_p e(t) + k_i \int (e(t)) + k_d \frac{d(e(t))}{dt},$$

где $e(t) = v(t) - y(t)$ есть ошибка между задающим воздействием $v(t)$ и управляемой величиной $y(t)$; k_p , k_i и k_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления ПИД-регулятора.

Иммунный ПИД-регулятор

Немалое количество подходов для настройки и проектирования регуляторов сегодня берут свои корни из биологических процессов. Один из таких принципов был взят для проектирования непрерывного иммунного регулятора [3, 4]. Как правило, иммунный регулятор используется в качестве вспомогательного звена к ПИД-регулятору и воздействует сразу на все параметры ПИД-регулятора.

В общем случае закон управления непрерывного иммунного ПИД-регулятора можно представить в виде:

$$u_{Im}(t) = K f_s(u_s(t)) u_{pid}(t), \quad (3)$$

где иммунная моделирующая функция

$$f_s(u_s(t)) = 1 - \eta \frac{\exp(-cu_s(t)) - 1}{\exp(-cu_s(t)) + 1}, \tau > 0 \quad (4)$$

есть нелинейная функция, лежащая в диапазоне $[-1; 1]$, а K , η и c – параметры непрерывного иммунного регулятора. $u_{param}(t)$ здесь выступает в качестве выходного сигнала одного из каналов ПИД-регулятора, $u_s(t) = 1 - \exp(-Tu(t))$, T является еще одним параметром проектирования иммунного регулятора.

Закон управления иммунного ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$u(t) = [1 + K f_s(u_s(t))] u_{pid}(t). \quad (5)$$

В данной работе предложено при помощи иммунных регуляторов влиять на каждый из коэффициентов усиления ПИД-регулятора в отдельности. При этом закон управления иммунного ПИД-регулятора изменяется:

$$u(t) = K_{Imp} e(t) + K_{Imi} \int e(t) + K_{Imd} \frac{de(t)}{dt}, \quad (6)$$

где

$$K_{Imp} = [1 + K_p f_s(u_{sp}(t))] k_p, K_{Imi} = [1 + K_i f_s(u_{si}(t))] k_i, K_{Imd} = [1 + K_d f_s(u_{sd}(t))] k_d. \quad (7)$$

Здесь

$$u_{sp}(t) = 1 - \exp(-Tu_p(t)), u_{si}(t) = 1 - \exp(-Tu_i(t)), u_{sd}(t) = 1 - \exp(-Tu_d(t)), \quad (8)$$

причем для всех слагаемых настраивается также и параметр η . K_{Imp} , K_{Imi} и K_{Imd} – это пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления иммунного ПИД-регулятора.

Таким образом, на каждый канал ПИД-регулятора дополнительно воздействует иммунный регулятор, который в качестве входного воздействия принимает выходной сигнал соответствующего канала. В итоге все коэффициенты усиления иммунного ПИД-регулятора одновременно увеличиваются или уменьшаются. Однако при этом влияние изменения параметров пропорционального, интегрального и дифференциального каналов на свойства системы различны.

Экспериментальная часть

В качестве примера рассмотрим неустойчивый ОУ из работ [1, 2] с ПФ $W(p) = \frac{a(5p+1)e^{-p}}{50p^2-15p+1}$, где $a = 1$ – коэффициент усиления ОУ. Параметры ПИД-регулятора были взяты из работы [1] и имеют значения: $K_p = 9.4143, K_i = 5.1169, K_d = 0.6084$. ПФ фильтра обратной связи представлена как $W_F(p) = \frac{0.8p+0.2}{0.01p+1}$. При уменьшении времени запаздывания до 0.99975 система с фильтрованным предиктором Смита и классическими ПИД-регуляторами теряет устойчивость, как это можно видеть из рисунка 2.

Далее исследуем робастность систему с иммунным предиктором Смита. Параметры иммунного ПИД-регулятора в прямой связи имеют значения:

$$k_p = 9.4143, k_i = 5.1169, k_d = 0.6084,$$

при этом коэффициенты усиления иммунного регулятора

$$K_p = 1, K_i = 0.5 \text{ и } K_d = 0.$$

Иммунный ПИД-регулятор в обратной связи имеет параметры:

$$k_p = 9.4143, k_i = 5.1169, k_d = 0.6084, K_p = 0.22, K_i = 0.2 \text{ и } K_d = 0.$$

Уменьшим в модели ОУ коэффициент усиления a на 10%, в итоге ПФ модели объекта управления будет иметь вид:

$$W(p) = 0.9 \frac{(5p+1)e^{-p}}{50p^2-15p+1}.$$

Результаты моделирования показаны на рисунке 3, где видно, что неточность модели несколько снизила перерегулирование, при этом чуть увеличилось время регулирования. Однако реакция на возмущающее воздействие оказалась неизменной. При этом из рисунка 4, где продемонстрирован сигнал управления системы с иммунным ПИД-регулятором в предикторе Смита можно видеть, что сигнал управления не слишком большой как для идеального случая, так и при неточности модели ОУ.

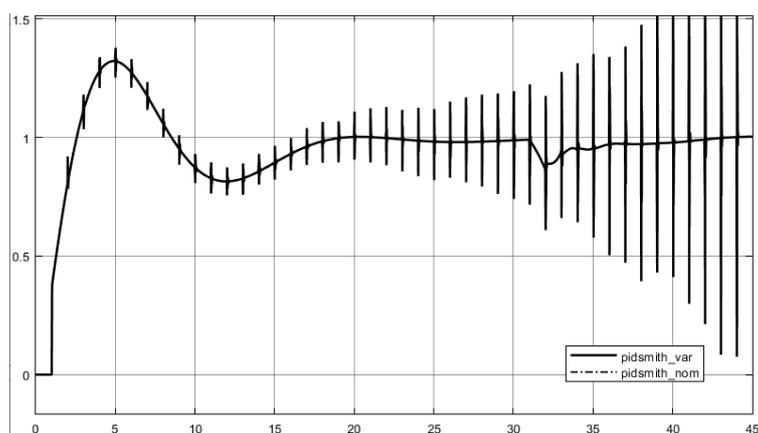


Рис. 2. Реакция системы с фильтрованным предиктором Смита на единичное входное воздействие при изменении времени запаздывания в модели ОУ на 0,00025 с.

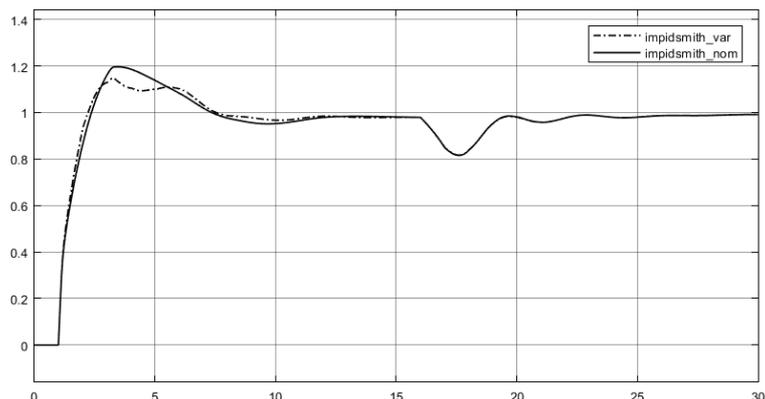


Рис. 3. Реакция системы симмунным ПИД-регулятором в предикторе Смита при уменьшении коэффициента усиления в модели ОУ на 10%

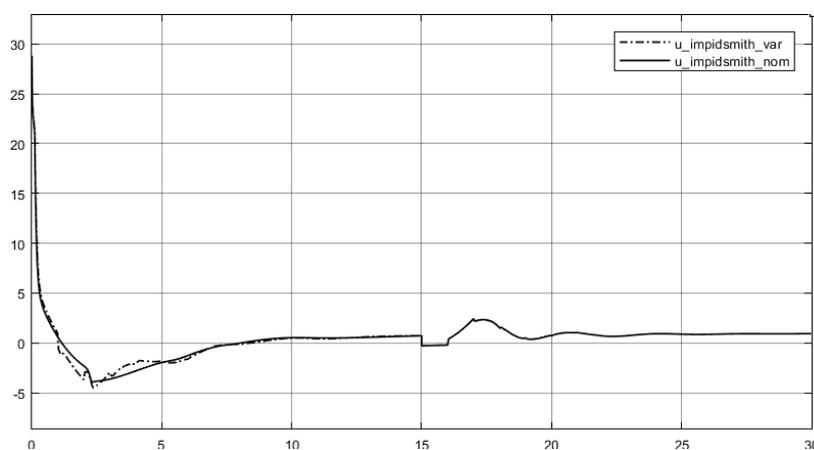


Рис. 4. Сигнал управления системы с иммунным ПИД-регулятором в предикторе Смита при уменьшении коэффициента усиления в модели ОУ на 10%

Увеличение коэффициента усиления ОУ приводит к небольшому повышению перерегулирования системы, как это можно увидеть на рисунке 5. При этом сигнал управления меняется совсем незначительно, что отображено на рисунке 6.

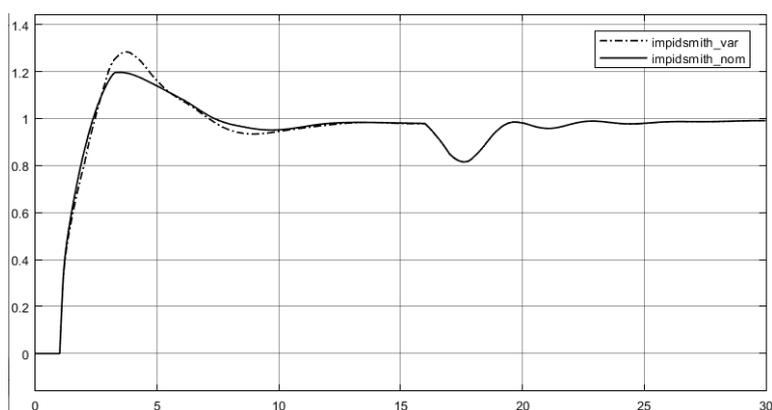


Рис. 5. Реакция системы с иммунным ПИД-регулятором в предикторе Смита при увеличении коэффициента усиления в модели ОУ на 10%

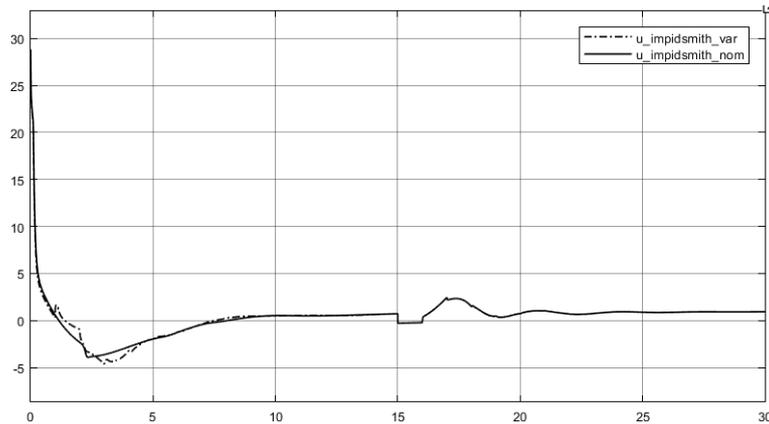


Рис. 6. Сигнал управления системы с иммунным ПИД-регулятором в предикторе Смита при увеличении коэффициента усиления в модели ОУ на 10%.

Следующим шагом увеличим коэффициент усиления и время запаздывания модели ОУ на 10%, в итоге ПФ модели ОУ будет иметь вид: $W(p) = 1.1 \frac{(5p+1)e^{-1.1p}}{50p^2-15p+1}$. Реакция системы представлена на рисунке 7, где с учетом рисунка 6 видно, что увеличение коэффициента усиления вместе с увеличением времени запаздывания приводит к большему перерегулированию, чем просто увеличение коэффициента усиления. При этом в сигнале управления появляются всплески (рисунок 8), обычно присущие использованию ПИД-регуляторов для управления объектами с запаздыванием.

На рисунке 9 представлена реакция системы при уменьшении запаздывания и коэффициента усиления на 10%. В этом случае также можно наблюдать увеличение перерегулирования системы, но сохранение времени установления.

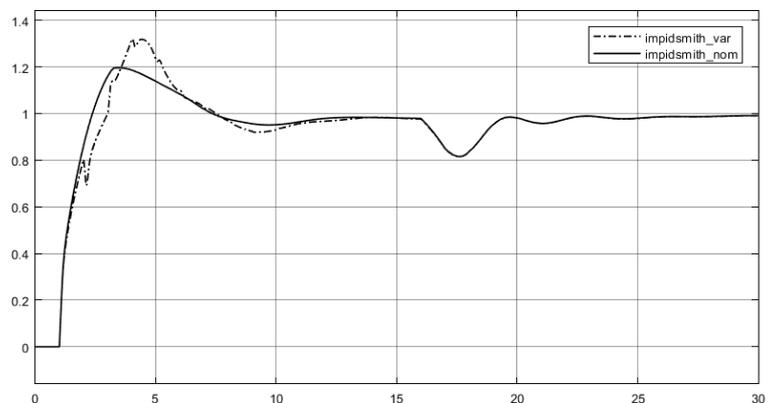


Рис. 7. Реакция системы с иммунным ПИД-регулятором в предикторе Смита при увеличении коэффициента усиления и запаздывания в модели ОУ на 10%

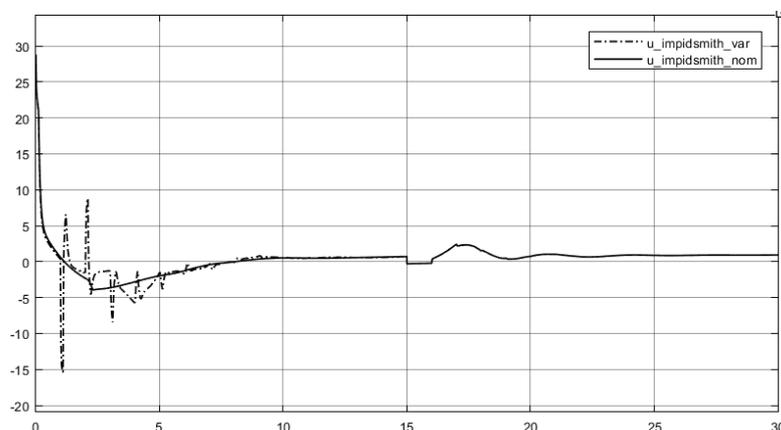


Рис. 8. Сигнал управления системы с иммунным ПИД-регулятором в предикторе Смита при увеличении коэффициента усиления и запаздывания в модели ОУ на 10%

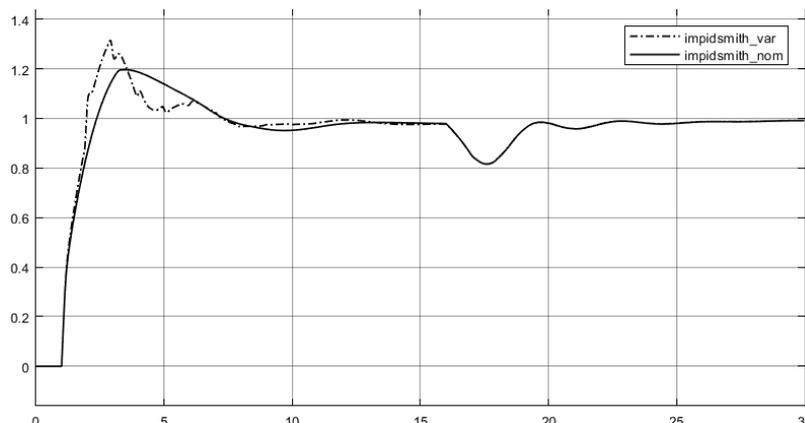


Рис. 9. Реакция системы с иммунным ПИД-регулятором в предикторе Смита при уменьшении коэффициента усиления и запаздывания в модели ОУ на 10%

Выводы

Предложенная система управления с иммунным ПИД-регулятором и предиктором Смита позволила сохранить устойчивость системы при анализируемых неопределенностях модели объекта управления, при этом система управления с фильтрованным предиктором Смита потеряла устойчивость даже при малом изменении времени запаздывания относительно номинального значения. Более того, предложенная система управления с иммунным ПИД-регулятором обеспечила практическую неизменность ее реакции на возмущающее воздействие при изменении коэффициента усиления и времени запаздывания на 10%. При неточности модели в 10% и в случае увеличения, и при уменьшении параметров модели ОУ возрастает перерегулирование системы, но сигнал управления меняется несильно и остается в допустимых пределах. Но стоит учесть, что иммунный предиктор Смита несколько хуже снижает влияние возмущающего воздействия по сравнению с методом, представленном в [2], когда модель ОУ совпадает с номинальной моделью объекта управления.

Библиографический список

1. Saxena N., Chidambaram M., Tuning of PID controllers for time delay unstable systems with two unstable poles, India 2016.
2. Бобиков А.И., Бубнова Т.С., Переоборудование ПИД-регулятора для неустойчивых объектов с запаздыванием в фильтрованный предиктор Смита. 108-119, Вестник, Рязань, 2020.
3. Takahashi K, Yamada T. Application of an immune feedback mechanism to control systems. JSMEIntJ, pp: 184-191, 1998.
4. Бобиков А. И., Бубнова Т. С. Управление неустойчивыми объектами и объектами с интегратором при помощи комбинации непрерывного иммунного и ПИД-регулятора. 116-128, Вестник, Рязань. 2020.

УДК 004.384; ГРНТИ 28.15.15

АЛГОРИТМ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВОЙНЫМ ИНТЕГРАТОРОМ

В.И. Захватов

*Воронежский государственный технический университет,
Россия, Воронеж, v.zakhvatov@bk.ru*

Аннотация. Разработан алгоритм прямого аналитического синтеза цифрового управляющего устройства по аналоговому прототипу для непрерывных объектов, что позволяет задавать в реальном времени требуемые динамические свойства замкнутой дискретно-непрерывной системы управления. Описание алгоритма синтеза приведено на примере управления объектом со структурой двойного интегратора.

Ключевые слова: система автоматического управления, полиномиальные уравнения, алгебраический синтез, цифровой регулятор.

DIGITAL CONTROL ALGORITHM OF THE DOUBLE INTEGRATOR

V.I. Zakhvatov

*Voronezh State Technical University,
Russia, Voronezh, v.zakhvatov@bk.ru*

Abstract. An algorithm for direct analytical synthesis of a digital control device based on an analog prototype for continuous objects has been developed. It allows you to set in real time the required dynamic properties of a closed discrete-continuous control system. The description of the synthesis algorithm is given on the example of controlling an object with the structure of a double integrator.

Keywords: automatic control system, polynomial equations, algebraic synthesis, digital controller.

Современные автоматические системы обычно конструируются на базе цифровой управляющей техники. Методы синтеза цифровых регуляторов разнообразнее и в общем случае сложнее по сравнению с аналоговыми. В частности, при изменении по какой-либо причине интервала квантования по времени, меняются и коэффициенты в уравнениях, описывающих работу цифровых устройств. В таком случае это уже будет более сложный для изучения класс дискретно-непрерывных систем с переменными параметрами. В инженерной и исследовательской практике во многих случаях гораздо проще сначала построить аналоговый регулятор, который затем переоборудовать в цифровой. Для объектов невысокого порядка можно выполнить регулятор полностью в обобщенном алгебраическом виде. В работе обсуждаются преимущества алгебраического метода синтеза алгоритмов регулирования на основе полиномиальных уравнений. Приведена методика получения передаточных функций регуляторов сначала в непрерывном, а затем и в цифровом варианте на примере управления объектом со структурой двойного интегратора.

Актуальным для автоматических систем является поддержание высокого качества управления в условиях значительного изменения состояний функционирования, смены режимов, характеристик и параметров внешних воздействий под влиянием окружающей среды. Также зачастую нелинейность объектов выражается в изменении коэффициентов передачи отдельных звеньев в зависимости от величины сигналов. Для парирования подобных отклонений требуется перенастройка законов управления, пересчет операций синтеза при каждой отдельной трансформации и перемене режимов. К сожалению, известные методы проектирования управляющих алгоритмов не поддерживают способность к непосредственному много-режимному управлению. При необходимости это принято делать с использованием весьма сложных методов адаптации или переключения на заранее настроенную структуру алгоритма для любого из возможных режимов. Наряду с этим одной из важных проблем теории автоматического управления является проблема ограничения координат систем. Для предотвращения их входа в нелинейную зону насыщения с последующей потерей устойчивости приходится занижать такие важнейшие показатели качества систем, как быстродействие и динамическая точность. Для борьбы с эффектом насыщения применяют комбинацию разных

алгоритмов, с выделением, например, разных настроек регулирования для больших и малых отклонений [1]. Для реализации таких возможностей управляющее устройство также должно функционировать при определенном множестве состояний системы, и обеспечивать некоторый набор различных регуляторов для разных режимов. При этом существенно усложняется структура закона управления, снижается его эффективность.

Одним из путей решения проблем многорежимного управления в изменяющихся условиях является привлечение операторно-алгебраического метода, построение обобщенных параметризованных передаточных функций регуляторов. Инструментом решения таких задач служит алгебраическое обобщение метода полиномиальных уравнений на основе символьных вычислений [2]. Методами компьютерной алгебры полиномов выводится символьная, а не как обычно, численная форма записи алгоритма управления [3]. Это позволяет отобразить в единой алгебраической формуле определенное множество возможных решений управляющего устройства. Из полученного множества по условиям функционирования системы и наложенных ограничений в конкретной ситуации для алгебраических коэффициентов задается наиболее приемлемый вариант численной реализации. Требуемые динамические свойства систем изменяются в реальном времени присвоением численных значений текущим параметрам закона управления как алгоритмически (программно), так и схемотехнически (внешним задающим сигналом). Выбор и конкретизацию параметров может назначать и некоторый дополнительный анализатор режимов после оценки текущего состояния объекта, если в системе предусмотрено многоуровневое иерархическое управление.

Рассмотрим предлагаемый новый подход к многорежимному регулированию на простом модельном примере с объектом второго порядка и передаточной функцией двойного интегратора, с представлением всех параметров регулятора полностью в алгебраическом виде. Сначала выводится аналитическая передаточная функция непрерывного устройства управления, за счет дискретизации которой далее получается цифровая параметрическая форма записи.

Синтез непрерывного управляющего устройства

В теории управления двойной интегратор часто используется как канонический пример системы второго порядка, который служит для наглядной демонстрации новых подходов к решению актуальных задач. Объекты, описываемые в первом приближении моделью непрерывного двойного интегратора, нередко встречаются в задачах управления поступательным и вращательным движением твердых тел и механизмов с одинарной степенью свободы. Это, например, некоторые летательные аппараты, системы электромеханики и робототехники. Обычно в таких случаях рассматриваются методы синтеза управляющих алгоритмов, оптимальных по минимуму затрат энергии, либо по минимальному времени переходных процессов [4]. Наличие в структуре нелинейных элементов типа насыщения чрезвычайно усложняет задачу синтеза [5]. Однако в подобных условиях можно предложить более простой способ решения проблемы. Изменять режимы и не допускать превышения критического уровня амплитуды сигналов позволяет контролируемое управление полосой пропускания, то есть быстроедействие систем, которые зависят от величины их полюсов.

Постановка и решение задач динамического управления полюсами операторным методом, с использованием алгебры полиномов и аппарата передаточных функций базируется на задании в качестве эталона некоторого обобщенного нормированного характеристического полинома (ХП) замкнутых систем с символьными значениями коэффициентов. Сравнением эталонного и фактического ХП, в результате решения полиномиальных уравнений вычисляется аналитическая передаточная функция регулятора. Она может охватывать и не все, а только некоторое расширенное семейство возможных вариантов, если определенную часть параметров приходится задавать в комбинированном, численно-аналитическом виде из-за

чрезмерной объемности получаемых выражений. Но в данном простом примере получение всех коэффициентов регулятора полностью в алгебраической форме позволяет описать все множество допустимых решений.

Пусть объект управления имеет передаточную функцию интегрирующего звена второго порядка: $W_0(p) = \frac{k}{p^2}$, а проектируемый регулятор – первого порядка: $W_p(p) = \frac{m \cdot p + c}{p + n}$. Тогда фактический ХП системы управления будет иметь следующий вид:

$$\Delta(p) = k \cdot (m \cdot p + c) + p^2 \cdot (p + n). \quad (1)$$

Эталонный ХП замкнутой системы выберем в типовой нормированной форме записи:

$$\Delta_0(p) = p^3 + \alpha \cdot \omega \cdot p^2 + \beta \cdot \omega^2 \cdot p + \omega^3, \quad (2)$$

где ω – среднегеометрический корень, определяющий скорость протекания переходных процессов, α и β – нормированные коэффициенты настройки их качества. Приравнивая формулы (1) и (2), получаем так называемое диофантово полиномиальное уравнение синтеза. Для расчета искомых параметров настройки регулятора m , n , c , как функции параметра k объекта и коэффициентов α , β , ω эталонного ХП (2), составим систему алгебраических уравнений, путем сравнения коэффициентов при одинаковых степенях комплексной переменной p в уравнениях (1) и (2). Решив систему уравнений и опуская промежуточные результаты, получим аналитическую форму параметризованной передаточной функции регулятора:

$$W_p(p, \omega) = \frac{\beta \cdot \omega^2 \cdot p + \omega^3}{k \cdot (p + \alpha \cdot \omega)} \quad (3)$$

Полученный общий вид передаточной функции регулятора (3) может быть использован для настройки системы на любую требуемую полосу пропускания и быстродействие, которые задаются величиной параметра ω . Этим же параметром определяется и амплитуда выходного сигнала регулятора. Зависимость амплитуды управления от параметра ω в общем случае можно оценить по методике, изложенной в [6]. А в нашем примере это легко сделать, определив передаточную функцию выхода регулятора относительно входа задания системы:

$$W_y(p, \omega) = \frac{\beta \cdot \omega^2 \cdot p^3 + \omega^3 \cdot p^2}{k \cdot (p^3 + \alpha \cdot \omega \cdot p^2 + \beta \cdot \omega^2 \cdot p + \omega^3)}.$$

При подаче на вход задания системы единичного ступенчатого сигнала и нулевых начальных условиях объекта (с учетом теоремы о начальном значении изображения по Лапласу) в данном примере максимум сигнала регулятора U_m будет достигаться в начальный, нулевой момент времени и иметь следующее значение:

$$U_m(0) = \frac{\beta \cdot \omega^2}{k}. \quad (4)$$

Формула (4) позволяет выбрать исходную величину ω так, чтобы выход регулятора не достигал зоны насыщения. По мере уменьшения ошибки регулирования быстродействие и точность системы могут быть повышены увеличением ω , но так, чтобы амплитуда управления все время оставалась меньше величины насыщения, находясь в зоне линейности регулятора или исполнительного устройства. Это позволит более полно и эффективно использовать ресурсы управления. Отметим также, что при перенастройках ω сохраняется заданное качество переходных процессов в замкнутой системе, которое определяется значениями коэффициентов α и β , принятых при выборе эталонного ХП.

Цифровое переоборудование непрерывного управляющего устройства

Для дискретизации непрерывных прототипов применяются несколько методов, различных по точности и размерности получаемой дискретной модели. Однако при выборе приемлемого дискретного эквивалента непрерывной передаточной функции важно сохранить все существенные свойства замкнутой системы без неоправданного усложнения. Один из распространенных подходов к дискретизации аналоговых регуляторов основан на использовании метода фиктивного квантования, с помощью Z-преобразования для последовательного соединения экстраполятора нулевого порядка и непрерывного прототипа. Это можно сделать с помощью символьных операций, имеющихся в популярных математических пакетах типа Mathcad. Для этого сначала получим с помощью обратного преобразования Лапласа непрерывной передаточной функции регулятора (3) выходную импульсную переходную функцию времени (весовую функцию):

$$h(t) = \frac{\omega^2}{k} \cdot (\omega \cdot e^{-\alpha \cdot \omega \cdot t} + \beta \cdot \Delta(t) - \alpha \cdot \beta \cdot \omega \cdot e^{-\alpha \cdot \omega \cdot t}),$$

где $\Delta(t)$ дельта-функция Дирака. Далее символьное Z-преобразование $h(t)$ с периодом дискретизации T возвращает обобщенную дискретную форму регулятора:

$$W_p(z, \omega, T) = \frac{\omega^2}{k} \cdot \frac{(\beta + \omega - \alpha \cdot \beta \cdot \omega) \cdot z - \beta \cdot e^{-\alpha \cdot \omega \cdot T}}{z - e^{-\alpha \cdot \omega \cdot T}}. \quad (5)$$

Как видно из (5), дискретная передаточная функция регулятора несколько сложнее, чем непрерывная (3), но также позволяет полностью корректировать динамику процессов в реальном времени. Она отличается гибкостью и простотой перестройки алгоритма управления, в том числе, как видно, и при переменном периоде дискретизации T , который входит в форму (5) как параметр. Следует отметить, что принятая при синтезе за основу эталонная модель (2) содержит все допустимые варианты реализации систем данного вида, поэтому обобщенная форма (5) дает полное описание множества возможных цифровых алгоритмов первого порядка для рассматриваемых объектов типа двойного интегратора. Например, можно легко учесть нелинейность характеристик объекта, которая проявляется в изменении коэффициента k его передаточной функции в зависимости от положения рабочей точки или от величины ошибки регулирования.

В соответствии с теоремой о начальном значении Z-изображения функции (5) можно получить оценку максимального значения выхода цифрового регулятора в начальный момент времени при подаче на вход системы единичного ступенчатого сигнала:

$$U_m(0) = \frac{\omega^2}{k} \cdot (\beta + \omega - \alpha \cdot \beta \cdot \omega) \quad (6)$$

Некоторое несовпадение формул (4) и (6), видимо, связано с неидеальной дискретизацией непрерывной модели. Известно, что идентичность процессов в непрерывных и дискретных системах может быть достигнута лишь в некоторых ограниченных пределах ввиду особенностей цифровых устройств.

Таким образом, за счет преимуществ обобщенной аналитической формы алгоритма регулирования можно обеспечить конструирование многорежимных систем с оперативной динамической коррекцией свойств в реальном времени сообразно с текущей ситуацией, без проведения каких-либо дополнительных перерасчетов и операций.

Библиографический список

1. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. К вопросу синтеза систем многорежимного регулирования // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2020. Т. 18. С. 41–49.
2. Захватов В. И. Применение символьных вычислений при проектировании автоматических систем // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017: сб. тр. II междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 9 т. Т. 1 / под общ. ред. О. В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2017. С. 45-50.
3. Захватов В. И. Методы компьютерной алгебры полиномов в задачах автоматического управления // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019). Москва, 17-20 Июня 2019 г. URL: https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Доклады ВСПУ-2019/18_В БК3/ЗахватовВИ.pdf (дата обращения 20.02.2021).
4. Ляпин Л. Н., Муромцев Ю. Л., Попова О. В. Оптимальный по минимуму затрат энергии регулятор объекта двойного интегрирования // Техническая кибернетика. Известия РАН. 1992. №2. С.39-46.
5. Bhat S. P., Bernstein D. S. Continuous finite-time stabilization of translational and rotational double integrators, IEEE Trans. Automat. Contr. 1998. Vol. 43. May. P. 678-682.
6. Ким Д. П. Синтез оптимальных по быстродействию непрерывных линейных регуляторов // Автоматика и телемеханика. 2009. № 3. С. 5-14.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

СЛЕЖЕНИЕ ЗА ОБЪЕКТАМИ НА СЛОЖНОМ НЕОДНОРОДНОМ ФОНЕ ВБЛИЗИ ПОХОЖИХ ОБЪЕКТОВ

Ю.Р. Алланазарова, А.Б. Фельдман

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, chernichka66.yulia@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе ставится задача совмещения корреляционно-экстремального алгоритма с методом выделения движущихся объектов путем оценки фона.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальный алгоритм, выделение движения, оценка фона.

TRACKING OBJECTS ON A DIFFICULT INHOMOGENEOUS BACKGROUND NEAR SIMILAR OBJECTS

Y.R. Allanazarova, A.B. Feldman

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, chernichka66.yulia@yandex.ru*

The summary. In this paper, the problem is posed of combining the correlation-extremal algorithm with the method of detecting moving objects by assessing the background.

Keywords: correlation-extreme algorithm, motion detection, background score.

Введение

Обычно под бортовыми системами видеослежения понимают системы компьютерного зрения, устанавливаемые на борту какого-либо летательного аппарата – вертолета, самолета, беспилотного летательного аппарата [1]. Иногда термин бортовые системы понимают шире и относят к таким системам, как системы машинного зрения, устанавливаемые на подвижном носителе – автомобиле, мобильном роботе, вездеходе и т.п.

Бортовые системы технического зрения могут решать разнообразные задачи, среди них задачи комбинированного видения [2], автоматического обнаружения и сопровождения объектов [1, 3], в том числе воздушных.

В виду многообразия рассматриваемых систем и условий, в которых им приходится работать, трудно провести достаточно четкую классификацию как решаемых ими задач, так и применяемых алгоритмов компьютерного зрения. В общем случае можно выделить следующие уровни обработки информации [4]: восстановление изображений, выделение сегментов, оценка параметров сегментов, слежение за объектами, оценка параметров объектов, обнаружение объектов, распознавание объектов, сопровождение объектов.

Под сегментами здесь понимается связанная совокупность точек бинарного изображения, полученного в результате той или иной обработки исходного полутонового изображения. Под объектами здесь подразумевается изображения реально наблюдаемых объектов. Сегменты обычно являются исходными данными для обнаружения объектов.

Ясно, что задачи компьютерного зрения, решаемые на борту летательного аппарата, по своей специфике и особенностям значительно отличаются от других задач компьютерного зрения. Исследователи обычно выделяют такие факторы [1]:

- многообразие объектов интереса;
- многообразие фонов, наличие неоднородного и движущегося фона;
- неоднородность атмосферы при наблюдении объектов на больших расстояниях;
- мешающие факторы, обусловленные погодными явлениями: дождь, снег, туман;
- движение датчика изображений и его носителя в пространстве.

Корреляционно-экстремальные методы

При создании бортовых систем видеослежения часто применяют корреляционно-экстремальные алгоритмы, которые также иногда называют алгоритмами сопоставления с эталоном [4]. Последняя фраза, по существу, характеризует принцип работы подобных алгоритмов. Автоматически или при помощи человека-оператора выделяется изображение объекта-интереса, которое обычно называют эталоном. В дальнейшем слежение за объектом осуществляется путем измерения его координат в каждом кадре. Для этого фрагменты текущего изображения внутри зоны поиска объекта сопоставляются с эталоном по заданному критерию. Точка наилучшего совмещения принимается за местоположения объекта, после чего могут применяться различные межкадровые процедуры для обновления эталонного изображения и уточнения координат объекта [4].

Известны достоинства и недостатки корреляционно-экстремальных алгоритмов. Среди достоинств обычно выделяют хорошую помехоустойчивость. К недостаткам обычно относят требования к наличию априорной информации (необходимо задание эталона объекта), а также достаточно высокую вычислительную сложность.

Существуют два основных способа борьбы с вычислительной сложностью корреляционно-экстремальных алгоритмов [1]. Первый способ предполагает использование стратегии последовательных испытаний, второй – применение при сопоставлении изображений различных интегральных преобразований. Алгоритм коррекции эталонного изображения при слежении за двумерным объектом

Методы выделения движущихся объектов

Другой подход, широко применяемый в бортовых системах автоматического обнаружения и сопровождения объектов - выделение движущихся относительно фона фрагментов [1, 3-5]. Обычно в качестве объектов интереса выступают движущиеся объекты искусственного происхождения – автомобили, самолеты, речные и морские суда, люди. Сам факт движения этих объектов позволяет отличить их от окружающего фона и в этой связи его разумно использовать для синтеза алгоритмов обнаружения и прослеживания объектов. Однако для хорошего функционирования этих алгоритмов факт их движения должен быть достаточно выраженным, а отношение сигнал/шум достаточно большим.

Большинство рассмотренных алгоритмов базируется на идее формирования оценки фона, которая в последствии сравнивается с текущим кадром для выделения изображений движущихся объектов. Таким образом, ключевым вопросом становится получение оценки фона. Если фон неподвижный (видеодатчик не движется), то получение оценки фона при помощи временной фильтрации, как правило, не вызывает существенных проблем. Если фон подвижный, то сперва необходимо решить задачу совмещения смежных кадров, для чего мо-

гут применяться самые разнообразные алгоритмы, в том числе корреляционные алгоритмы [6, 7], или алгоритмы на основе выделения и сопоставления особых точек, такие как SIFT [8] или SURF [9].

Из недостатков можно отметить следующее: все подобные методы чувствительны к качеству движения и отношению сигнал/шум. Для временного анализа последовательности изображений необходимо выполнять высокоточную геометрическую привязку изображений [5], наконец, все подобные методы чувствительны к теням и вообще к изменению освещения сцены.

Кроме того, методы, основанные на движении, позволяют выделить только движущиеся сегменты изображения, которые еще необходимо сопоставить с объектами интереса. Последнее так же является непростой задачей. Для ее решения известны различные подходы, основанные как на локальном анализе, так и на глобальной оптимизации траекторий слежения на длительном интервале наблюдения. В качестве примера можно привести решение задачи о назначениях на основе венгерского алгоритма [10], или алгоритм, предназначенный для малогабаритных систем слежения, основанный на разбиении двудольного графа [11].

Содержание исследования

Таким образом, мы видим, что оба основных класса методов, используемых в бортовых системах видеослежения имеют как принципиальные преимущества, так и принципиальные недостатки. Корреляционно-экстремальные алгоритмы считаются наиболее надежными. И хотя они способны работать при низких отношениях сигнал/шум, но могут давать грубые ошибки, связанные с перепутыванием объекта интереса, с похожими на него близкорасположенными объектами или фоновыми образованиями. Алгоритмы, основанные на выделении движения, требуют наличия контрастных объектов и совершенно не работают, если объект перестает двигаться относительно фона.

В данной работе предлагается устранить принципиальные недостатки рассматриваемых методов за счет их комплексирования. Это предполагает, что корреляционно-экстремальный алгоритм и алгоритм выделения движения работают одновременно и их результаты объединяются таким образом, чтобы обеспечить повышение эффективности слежения за выбранным объектом в присутствии посторонних объектов и фоновых образований.

Обычно в корреляционных алгоритмах для определения местоположения объекта интереса каждую точку в зоне поиска сопоставляют с эталоном объекта. Точку наилучшего совмещения определяют с использованием того или иного критерия сходства или различия изображений. Наиболее широко применяется критерий сходства изображения с эталоном, основанный на вычислении модуля разности между сравниваемыми изображениями [1, 3]. Этот критерий не учитывает, что помимо объекта интереса в зоне поиска могут быть другие похожие на объект интереса посторонние объекты или фоновые образования, которые могут давать ложные минимумы обозначенного критерия, что как раз и приводит к появлению грубых ошибок измерения координат объекта интереса.

Предлагается модифицировать критерий модуля разности, введя в него информацию о фоне и посторонних объектах, получаемую от алгоритма выделения движущихся фрагментов изображения. Последний, вообще говоря, помимо указания на движущиеся фрагменты изображения формирует оценку фонового изображения.

В модифицированном корреляционном критерии можно штрафовать те точки в зоне поиска, которые помимо сходства с объектом, имеют также сходство с фоном. Другими словами, если сходство фрагмента изображения с эталоном объекта является плюсом, то его же сходство с фрагментом фона - является минусом. Эти две части критерия балансируют друг друга в процессе работы. В наилучшей ситуации фрагмент изображения будет похож на эталон объекта и отличаться от фона, что даст хорошо выраженный минимум. Если фрагмент изображения похож одновременно и на эталон объекта, и на элемент фона, то к такому

фрагменту надо отнестись с меньшим доверием, т.к. взятая с минусом составляющая сравнения с фоном будет уменьшать выраженность общего минимума критерия.

Аналогично, хотя и с некоторыми нюансами, в общий критерий интегрируется информация о посторонних движущихся объектах. Если мы знаем, что в каком-то месте расположен посторонний объект, то мы в этой точке требуем, чтобы фрагмент изображения был похож на эталон и отличался от изображения постороннего объекта. Если сходство, наблюдается в обеих ситуациях, то это снова уменьшает выраженность общего минимума критерия. При этом возникает вопрос, связанный с тем, что объект интереса также может быть подвижным и, следовательно, без специальных мер его изображение будет отнесено к обоим частям критерия сопоставления. Однако, эта проблема решается путем анализа движущихся фрагментов. На основе информации о движении объекта интереса, его форме и размерах, накапливаемых за время наблюдения, сегмент движения, порожденный объектом интереса, легко отделить от других движущихся фрагментов и исключить из рассмотрения при вычислении модифицированного критерия для корреляционно-экстремального алгоритма.

Экспериментальные исследования

Для подтверждения эффективности разработанного решения были проведены экспериментальные исследования. Исследования проводились с привлечением большого числа натуральных видеосюжетов. На данных сюжетах присутствовали разнообразные объекты интереса, прежде всего автомобили, движущиеся по сложному городскому ландшафту и пересеченной местности. Съемки выполнены видеодатчиками с узким полем зрения на расстояниях до объектов порядка 5-7 км. В исследованиях рассматривались как сюжеты с телевизионных датчиков изображений, так и с тепловых. Легко заметить, что в тепловом диапазоне спектра проблема перепутывания объектов стоит гораздо острее.

Исследования показали, что предложенный подход с модификацией корреляционного критерия на основе комплексирования данных является работоспособным и обеспечивает прирост продолжительности слежения без срывов на величину до 30% за счет исключения грубых ошибок, связанных с перепутыванием объекта интереса с другими объектами.

Надо отметить, что предлагаемый подход, основанный на комплексировании двух типов алгоритмов, безусловно, требует больших вычислительных ресурсов. Однако, проведенная оценка показывает, что это не является проблемой с учетом современного уровня развития вычислительной техники.

Заключение

Таким образом, в данной работе предложен новый подход к слежению за объектами в присутствии посторонних похожих на них объектов и элементов фона. Выполнено компьютерное моделирование и проведены экспериментальные исследования на натуральных видеосюжетах, показавшие эффективность применения разработанного подхода в бортовых системах автоматического обнаружения и сопровождения объектов.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.: ил.
2. Алпатов Б.А., Ершов М.Д., Фельдман А.Б. Алгоритм обработки изображений для системы комбинированного видения летательного аппарата // Журнал «Цифровая обработка сигналов». – 2015. – №3. – С. 8-14.
3. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов. // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – №2. – С. 45-51.

4. Алпатов Б.А., Ерохин Д.Ю., Ершов М.Д. Обработка изображений в задачах видеоаналитики // К.Э.Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика: 7-я Международ. науч.-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2017. – С. 360-362.
5. Бабаян П.В. Выделение объектов в условиях случайных геометрических преобразований изображения // Автометрия. – 2010. – №3. – С.41-47.
6. Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, В.В. Стротов Анализ точностных характеристик системы слежения за фоновым изображением для бортовой видеоинформационной системы / Вестник РГРТА. - Вып. 20. - Рязань, 2007. – С.3-10
7. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Стротов В.В. Многоэтальный алгоритм слежения за фоном. // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. Тез. докл. 14-я Международная научно-техническая конференция. Рязань, 2005 — с. 108-109.
8. Lowe, David G. (2004). "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints". International Journal of Computer Vision. 60 (2): 91–110
9. Bay H. et al. Speeded-up robust features (SURF) //Computer vision and image understanding. – 2008. – Т. 110. – №. 3. – С. 346-359.
10. Keysers D., Deselaers T., Ney H. Pixel-to-pixel matching for image recognition using hungarian graph matching //Joint Pattern Recognition Symposium. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – С. 154-162.
11. Бабаян П. В., Стротов В. В. Реализация алгоритма слежения за множеством объектов на основе разбиения двудольного графа в малогабаритных бортовых системах видеослежения //Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – №. 54-2. – С. 32-38.

УДК 004.032.26; ГРНТИ 28.23.37

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СУПЕРРАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Е.В. Тишковец

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, tiishka2@gmail.com*

Аннотация. В работе описывается план разработки сверточной нейронной сети, решающей задачу суперразрешения изображений. Выстраивается структурная схема сети и предлагается один из возможных вариантов законченной архитектуры сети.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, суперразрешение изображений, глубокое обучение.

DESIGNING A CONVENTIONAL NEURAL NETWORK FOR SOLVING THE PROBLEM OF SUPER-RESOLUTION OF IMAGES

E.V. Tishkovets

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, , tiishka2@gmail.com*

The summary. The paper describes a development plan for a convolutional neural network that solves the problem of super-resolution of images. A structural diagram of the network is built and one of the possible options for a complete network architecture is proposed.

Keywords: convolutional neural networks, super-resolution images, deep learning.

Задача суперразрешения изображений, то есть восстановления изображения с высоким разрешением по имеющемуся изображению с низким разрешением, актуальна на протяжении многих лет. Однако за последнее десятилетие произошел значительный прорыв в решении этого вопроса, который связан в основном с началом использования сверточных нейронных сетей и глубокого обучения.

В настоящее время существует уже около десятка архитектур нейронных сетей, которые решают задачу суперразрешения лучше, чем традиционные методы интерполяции. Тем не менее, им присущи определенные недостатки - некоторые из них имеют слишком сложную архитектуру и большое количество весов, из-за чего время прогнозирования ответа значительно увеличивается. Сети, имеющие более простую архитектуру, зачастую не могут по-

казать лучшие показатели по детализации предсказанного выходного изображения. Именно поэтому в современном мире, несмотря на то, что существует явный прогресс в решении задачи суперразрешения, вопрос улучшения качества детализации и времени предсказания прогнозируемого изображения все еще актуален.

В данной статье рассматриваются вопросы планирования разработки, составления общей структурной схемы нейронной сети, а также приведен пример ее архитектуры. Работа будет полезна для всех, кто интересуется машинным обучением и обработкой изображений.

План разработки сверточной нейронной сети

На момент начала разработки любого алгоритма или решения важно выбрать верную стратегию и составить план, следование которому приведет к необходимому результату. Для разработки архитектуры сети было решено придерживаться следующих действий:

1. Анализ существующих решений.
2. Разработка структурной схемы.
3. Разработка архитектуры нейронной сети.
4. Создание набора данных.
5. Обучение.
6. Анализ качества работы сети на метриках оценки пиковое отношение сигнал шум (PSNR), индекс структурного сходства (SSIM).
7. Уточнение архитектуры сети, повтор пунктов 3, 5, 6.

Для того, чтобы построить собственную архитектуру, первоначально необходимо проанализировать существующие решения. После этого следует найти некоторые общие шаблоны проектирования, присущие всем или большей части исследуемых моделей, для того, чтобы построить структурную схему сети. Предполагается, что следующий этап - переход от структурной схемы к непосредственно архитектуре - самая нетривиальная задача. Она осложняется тем, что из одной и той же структурной схемы можно построить огромное множество различных вариантов сетей. Кроме того, не до конца ясно, насколько будут влиять небольшие архитектурные изменения сети на качество ее работы, а также как задать такие гиперпараметры как функции потерь и активации, метод обучения, чтобы добиться лучшего выходного результата. В этот момент также необходимо создать и разметить набор данных для обучения и последующего тестирования сети. Качество работы различных архитектур можно проверить только методом проб и ошибок, за счет чего пункты, касающиеся создания конечной архитектуры, обучения сети и анализа качества ее работы (п. 3, 5, 6) следует повторять до тех пор, пока полученная сеть не будет удовлетворять желаемым характеристикам.

Разработка структурной схемы

Сравнительный анализ архитектуры и особенностей работы нескольких сверточных нейронных сетей (DBPN [1], EDSR [2], CARN [3], FRSR [4]), имеющих одни из лучших характеристик [5] в метриках оценки PSNR и SSIM, решающих задачу суперразрешения изображений, был произведен в статье [6]. На основе него были выделены ключевые структурные особенности, присущие большинству исследуемых сетей.

Следует отметить, что общая тенденция последних лет такова, что помимо улучшенной детализации выходное изображение обычно увеличено в масштабе (обычно в 2, 3 или 4 раза). Таким образом, предполагается, что разрабатываемая сеть также сможет увеличивать изображение на величину заданного масштабного коэффициента. Для более простой и удобной реализации сети на начальном этапе было решено создать сеть с масштабным коэффициентом, равным 4. Соответственно, исследуемые сети были также проанализированы именно

в той конфигурации, которая позволяла реализовать такой же масштабный коэффициент. Структурная схема, построенная на основе разобранных сетей, представлена на рисунке 1.

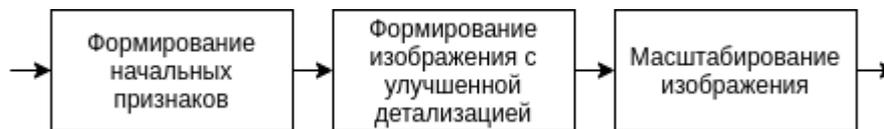


Рис. 1. Структурная схема архитектурной сети

В трех исследуемых сетях (EDSR, CARN, FRSSR) четко прослеживаются три основные составляющие: часть, отвечающая за выявление начальных признаков на входном изображении, основная часть, отвечающая за формирование изображения тех же размеров, что и входное, с улучшенной детализацией, и заключительная часть, цель которой - масштабирование изображения. В сети DBPN вторая и третья части объединены за счет использования слоя развертки (транспонированного сверточного слоя) convT в основной части, который позволяет масштабировать изображение на всем процессе прохождения изображения через сеть, а не в самом конце.

Разработка архитектуры сети

Формирование первой архитектуры сети предполагает более детальный обзор содержания каждой структурной единицы рассматриваемых сетей.

Часть формирования начальных признаков у всех сетей имеет одинаковое строение. Ее основная задача - получить такое количество карт признаков, которое будет необходимо для последующей работы в основной части. Здесь обычно используется один сверточный слой с фильтром 3×3 , формирующий 64 карты признаков.

Основная часть - *формирования изображения с улучшенной детализацией*, у всех сетей сильно варьируется. Тем не менее можно выделить, что все архитектуры в той или иной мере используют некоторую "обратную связь", то есть либо конкатенацию, либо сложение всех полученных карт признаков перед прохождением одного из сверточных слоев. Практика показывает, что такой подход позволяет повысить качество выходного изображения за счет уменьшения ошибки предсказания. Можно сделать вывод, что в разрабатываемой сети обязательно следует создать обратную связь, однако вопрос ее объема остается актуальным. Так, сети DBPN и FRSSR используют конкатенацию в значительной мере, в то время как EDSR использует ее меньше, но показатели ее работы по качеству одни из лучших в метриках PSNR и SSIM.

Кроме того, количество строительных единиц сети - блоков, и количество сверточных слоев с весами также имеет значение. В основной части EDSR используется 33 сверточных слоя с 64 картами признаков с фильтром 3×3 , DBPN использует 39 сверточных слоев с 64 картами признаков с фильтром размером 9×9 , CARN - 36 сверточных слоев с 64 картами признаков с фильтром 3×3 , FRSSR - 48 сверточных слоев с 64 картами признаков с фильтром 3×3 . Из этого можно сделать вывод, что количество сверточных слоев может находиться в пределах от 30-50 для того, чтобы выстроить достаточно качественное изображение при относительно небольших вычислительных затратах. Сеть DBPN имеет значительно больший объем весов за счет того, что имеет увеличенный размер фильтра. Мы возьмем в качестве базового сверточного слоя, как и в большинстве сетей, слой с 64 картами признаков и размером фильтра 3×3 .

Заключительная часть в сетях, кроме DBPN, состоит из двух пар: сверточного слоя с 256 картами признаков и фильтром 3×3 и слоя попиксельного перемешивания [7] для восстановления масштабированного изображения с меньшим числом карт признаков из кратного

го масштабному коэффициенту набору карт признаков. Как уже было описано ранее, сеть DBPN использует слой convT для увеличения изображения. Такой подход позволяет регулировать масштабирование, задавая параметры слоя.

Сеть DBPN показывает лучшие параметры по качеству выходного изображения, на что может влиять способ масштабирования изображения. Для того, чтобы учесть одновременно оба способа увеличения изображения, спроектируем эту часть следующим образом. Пусть масштабирование осуществляется в двух местах - в середине сети, и в самом конце. Каждое масштабирование увеличит размер изображения в 2 раза, таким образом выходное изображение будет увеличено в 4. Слой масштабирования будет состоять из слоя convT с 64 картами признаков и фильтром 3×3 .

Полученная на основе вышеизложенных предположений и выводов архитектура сети представлена на рисунке 2.

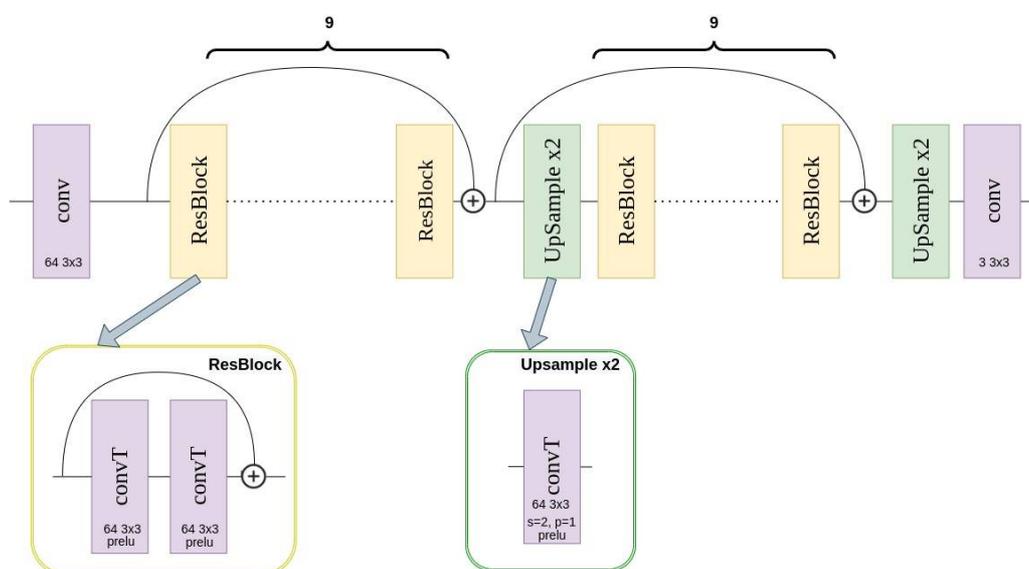


Рис. 2. Разработанная архитектура сверточной нейронной сети

Часть формирования начальных признаков здесь точно такая же, как и в проанализированных сетях. Часть масштабирования изображения разделена надвое и находится в середине и конце сети. Основная часть включает в себя 18 блоков ResBlock, состоящих из двух последовательно соединенных сверточных слоев с 64 картами признаков с фильтром 3×3 и функцией активации prelu. В конце ResBlock и перед каждым масштабированием происходит поэлементная сумма карт признаков.

Полученную архитектуру сети можно считать первым пробным вариантом. Для оценки ее по меркам PSNR и SSIM нужно подготовить необходимые наборы данных и обучить. После этого, проанализировав полученные результаты, модифицировать архитектуру и повторить процесс обучения заново до тех пор, пока выходной результат и численные данные не будут удовлетворять требуемым характеристикам.

Библиографический список

1. M. Haris, G. Shakhnarovich, N. Ukita, Deep Back-Projection Networks for Super-Resolution, in: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
2. J. Kim, J.K. Lee, K.M. Lee, Accurate Image Super-Resolution Using VeryDeep Convolutional Networks, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 38, Iss. 2, Nov. 2015, pp. 295–307.]
3. Y. Li1, E. Agustsson1, S. Gu1, R. Timofte1, L. V. Gool, CARN: Convolutional Anchored Regression Network for Fast and Accurate Single Image Super-Resolution, ECCV-2018, Vol. 16, September 2018/

4. J. W. Soh, G. Y. Park, J. Jo, N. I. Cho, Natural and Realistic Single Image Super-Resolution with Explicit Natural Manifold Discrimination, CVPR-2019 Vol. 10, pp. 8192-8131, June 2019/

5. A. Saarimaki. Single Image Super-Resolution using convolutional neural networks, in: 2018, Tampere University of Technology, vol. 68/

6. Е.В. Тишковец. Анализ существующих решений задачи увеличения разрешения изображений на основе сверточных нейронных сетей, 2020: Новые информационные технологии в научных исследованиях, 3 стр

7. W. Shi, J. Caballero, F. Huszar, J. Totz, A. P. Aitken, R. Bishop, D. Rueckert, and Z. Wang. Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network. In CVPR, 2016.

УДК 004.81; ГРНТИ 28.23.37

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Я.Д. Жаворонков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, yaroslav.zhavoronkov25@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматриваются архитектуры нейронных сетей применительно к обработке изображений. Приводятся их основные особенности, достоинства и недостатки, а также результаты использования при решении реальной задачи.

Ключевые слова: многослойный перцептрон (MLP), рекуррентные нейронные сети (RNN), сверточные нейронные сети (CNN), сеть с долгосрочной кратковременной памятью (LSTM), сверточная сеть с центральным элементом (VGG-16), семантическое сегментирование (DeepLab).

OBJECT DETECTION USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Ya.D. Zhavoronkov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, yaroslav.zhavoronkov25@gmail.com*

Annotation. The paper discusses the architecture of neural networks in relation to image processing. Their main features, advantages and disadvantages, as well as the results of their use in solving a real problem are presented.

Keywords: multilayer perceptron (MLP), recurrent neural networks (RNN), convolutional neural networks (CNN), Long-term short-term memory network (LSTM), centralized convolutional network (VGG-16), semantic segmentation (DeepLab).

В последние десятилетия, когда уровень развития компьютерных технологий достиг необходимого уровня, все большее внимание ученых сосредоточено на интеллектуализации техники. Успехи, уже достигнутые в этой области, используются как в научной и промышленной, так и в бытовой сферах. Одной из наиболее распространенных и изучаемых технологий сейчас является технология искусственного зрения и распознавания объектов. Научив машину «видеть» и понимать «увиденное», человечеству удастся решить огромное количество проблем во всех сферах жизни.

Используя нейронные вычисления, компьютеры осуществляют сбор данных, их анализ, изучение и принимают обоснованные решения. Ранее роль механизма нейронных вычислений играли сложные математические уравнения, что делало трудоемкость выполнения подобных задач невероятно высокой. В 1958 году Фрэнк Росенблатт озвучил идею перцептрона – алгоритма для контролируемого обучения бинарных классификаторов. Этот алгоритм лег в основу технологии нейронных сетей. Работа алгоритма основана на выполнении следующих шагов:

- разделение входных данных на несколько каналов;
- построение карты объектов;
- определение значения каждой функции;

- принятие решения;

Входной слой содержит количество нейронов, соответствующее количеству входных каналов. Скрытый слой представляет карту объектов с их значениями. Выходной слой содержит результат работы нейронной сети.

Это пример классической и самой простой нейронной сети. Реальные сети могут содержать сотни слоев и тысячи параметров. На основе персептронов построены все современные нейронные вычислительные сети.

Для разных задач используют различные типы сетей, которых существует огромное количество, но, что еще хуже, большинство нейронных сетей достаточно гибки, чтобы работать во многих областях, даже при использовании с неправильным типом данных. Так какую модель сети выбрать для конкретной задачи обработки изображений? Рассмотрим три главных класса искусственных нейронных сетей:

- многослойный персептрон (MLP);
- рекуррентные нейронные сети (RNN);
- сверточные нейронные сети (CNN).

Эти три класса сетей обеспечивают большую гибкость и за десятилетия доказали свою полезность и надежность при решении широкого круга задач [1]. Они содержат множество подтипов, которые помогают приспособить их к особенностям различных формулировок задач прогнозирования и различных наборов данных.

Многослойные персептроны

За исключением входных узлов, каждый узел MLP представляет собой нейрон, который использует нелинейную функцию активации. Многослойность и нелинейная активация отличают MLP от линейного персептрона, он может различать данные, которые нельзя разделить линейно. Гибкость многослойного персептрона позволяет применять его к различным типам данных, способным быть представленными в виде одной строки. MLP раньше применялся в компьютерном зрении, но в настоящее время считается недостаточным для современных сложных задач. Недостатком является то, что количество общих параметров может вырасти до очень большого (количество нейронов в слое 1, умноженное на количество нейронов в слое 2, умноженное на количество в слое 3 и так далее). Это неэффективно, потому что в таких больших измерениях существует избыточность. Другой недостаток - игнорирование пространственной информации.

Многослойные персептроны эффективны при:

- обработке изображений;
- обработке текстовых данных;
- обработке временных рядов.

Рекуррентные нейронные сети

Рекуррентные нейронные сети (RNN) - это современный алгоритм для последовательных данных, который используется, например, SiriApple и голосовым поиском Google. Это первый алгоритм, который запоминает свои входные данные благодаря внутренней памяти, что делает его идеально подходящим для задач машинного обучения, связанных с последовательными данными.

Как и многие другие алгоритмы глубокого обучения, рекуррентные нейронные сети относительно старые. Первоначально они были созданы в 1980-х годах, но только в последние годы мы увидели их истинный потенциал. Благодаря внутренней памяти RNN могут запоминать важные вещи о полученных ими данных, что позволяет им очень точно предсказывать, что будет дальше. Вот почему они являются предпочтительным алгоритмом для после-

довательных данных, таких как временные ряды, речь, текст, финансовые данные, аудио, видео, погода и многое другое. Рекуррентные нейронные сети могут формировать гораздо более глубокое понимание последовательности и ее контекста по сравнению с другими алгоритмами. RNN имеет два входа: настоящее и недавнее прошлое. Это важно, потому что последовательность данных содержит важную информацию о том, что будет дальше, поэтому RNN может делать то, что другие алгоритмы не могут.

Нейронная сеть с прямой связью назначает, как и все другие алгоритмы глубокого обучения, весовую матрицу своим входам, а затем выдает выходные данные. В то время как нейронные сети с прямой связью сопоставляют один вход с одним выходом, RNN могут сопоставлять один со многими, многие со многими (перевод) и многие с одним (классификация голоса).

RNN используется с:

- текстовыми данными;
- речевыми данными;
- проблемами прогнозирования классификаций и регрессий;
- генеративными моделями.

Рекуррентные нейронные сети не подходят для табличных наборов данных и обработки изображений.

RNN часто уступают простым MLP, применяемым к одним и тем же данным [1]. Тем не менее, эта область активно развивается, особенно в сферах временных рядов и гибридных моделей сетей.

Сверточные нейронные сети

Сверточные нейронные сети, или CNN, были разработаны для сопоставления данных изображения с выходной переменной. Они оказались настолько эффективными, что являются подходящим методом для любого типа задач прогнозирования, в которых используются изображения в качестве входных данных.

Сверточные нейронные сети состоят из нескольких слоев искусственных нейронов, которые вычисляют взвешенную сумму нескольких входов и выводят значение активации. Поведение каждого нейрона определяется его весами. При подаче значений пикселей искусственные нейроны CNN выделяют различные визуальные особенности. Когда вы вводите изображение в CNN, каждый из его слоев генерирует несколько карт активации. Карты активации выделяют соответствующие особенности изображения. Каждый из нейронов принимает в качестве входных данных фрагмент пикселей, умножает их значения цвета на свои веса, суммирует их и прогоняет через функцию активации. Первый (или нижний) уровень CNN обычно обнаруживает основные особенности, такие как горизонтальные, вертикальные и диагональные края. Выходные данные первого слоя используются в качестве входных данных для следующего слоя, который извлекает более сложные элементы, такие как углы и комбинации кромок. По мере того, как вы углубляетесь в сверточную нейронную сеть, слои начинают обнаруживать высокоуровневые функции, такие как объекты и лица. Операция умножения значений пикселей на веса и их суммирования называется сверткой (отсюда и название сверточной нейронной сети). CNN обычно состоит из нескольких сверточных слоев, но также содержит другие компоненты. Последний уровень CNN - это уровень классификации, который принимает выходные данные последнего сверточного слоя в качестве входных данных. На основе карты активации последнего сверточного слоя классификационный слой выводит набор оценок достоверности (значения от 0 до 1), которые определяют, насколько вероятно, что изображение принадлежит к классу.

CNN эффективны при:

- обработке изображений;

- решении проблем прогнозирования классификаций и регрессий;
- обработке текстовых данных;
- обработке временных рядов;

В области обработки изображений лучше всех зарекомендовали себя различные архитектуры из класса сверточных нейронных сетей, а также многослойные перцептроны. Рекуррентные нейронные сети не рекомендуется использовать при работе с изображениями.

В рамках проекта NASA NeMO-Net было проведено исследование эффективности спектрального и пространственного анализа изображений с использованием различных архитектур нейронных систем. В качестве входных данных использовались многоканальные спутниковые изображения (RGB, NIRchannels) [2]. Исследование проводилось на трех архитектурах:

- схема многослойного перцептрона (MLP);
- схема сверточной сети с центральным элементом (VGG-16);
- схема семантического сегментирования (DeepLab).

VGG16 и DeepLab являются моделями сверточной нейронной сети. VGG16 - это модель CNN, предложенная К. Симоньяном и А. Зиссерманом из Оксфордского университета в статье «Очень глубокие сверточные сети для распознавания крупномасштабных изображений». Входной набор данных содержит изображения фиксированного размера $224 * 224$ и имеют каналы RGB. Итак, у нас есть тензор $(224, 224, 3)$ на входе. Эта модель обрабатывает входное изображение и выводит вектор из 1000 значений. Этот вектор представляет вероятность классификации для соответствующего класса. Архитектура модели VGG-16 показана на рисунке 1.

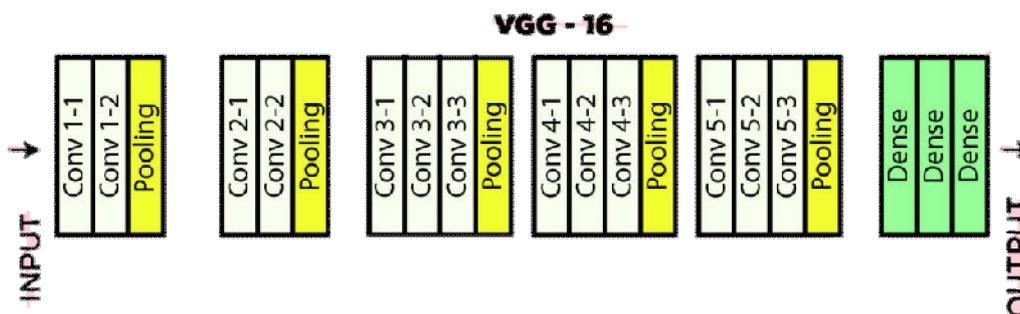


Рис. 2. Архитектура сверточной модели VGG-16

DeepLab, также являющаяся моделью сверточной сети, осуществляет семантическое сегментирование. На рисунке 2 представлена топология данной сети [2].

Первый блок данной архитектуры частично соответствует архитектуре VGG-16, которая является реализацией сверточной сети, описанной в работе К. Симоньяна, А. Засермана. Структура сети состоит из 5 упрощенных сверточных блоков, каждый из которых содержит ряд фильтров, за которыми следуют слой нормализации и слой подвыборки.

Второй блок параллельно осуществляет свертку с разной степенью детализации (коэффициент расширения: 6, 12, 18, 24). Причем, размер сверточного слоя фиксирован и равен 3×3 .

В третьем блоке производится обратное масштабирование результата методом билинейной интерполяции до размеров исходного изображения.

На выходе получаем массив масок (размер маски равен размеру исходного изображения), где глубина массива равна количеству определяемых классов.

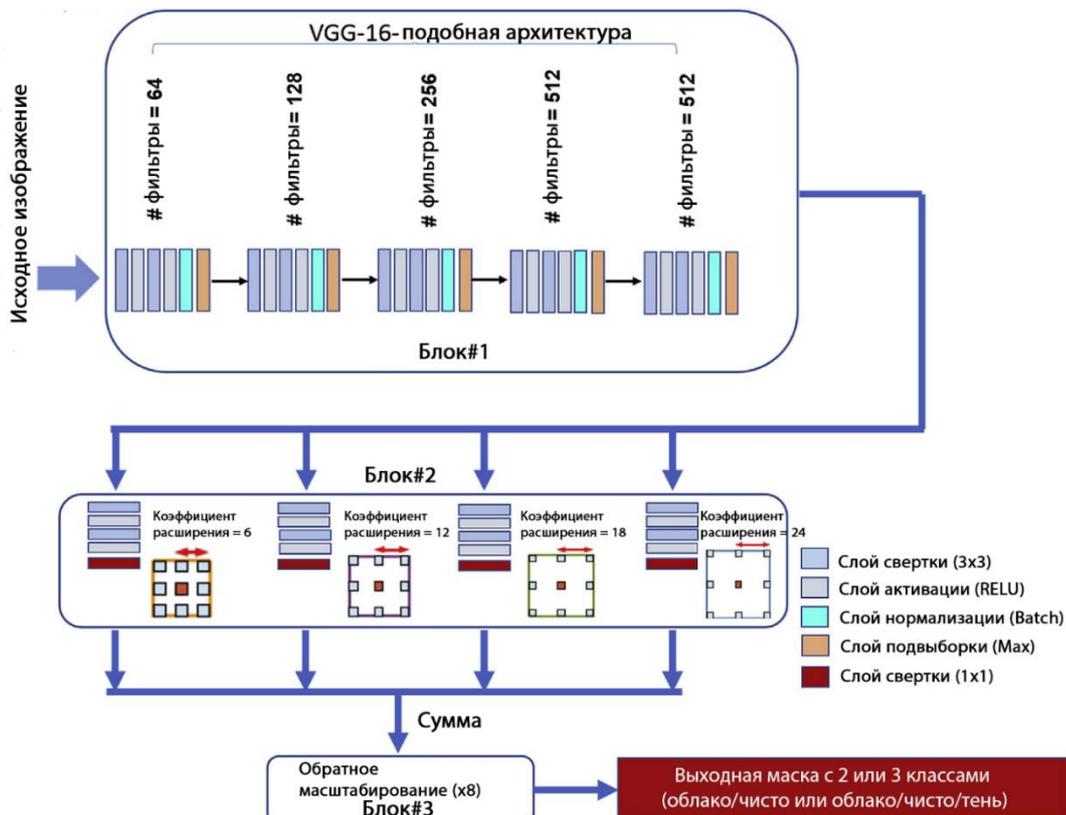


Рис. 3. Топология сети с архитектурой DeepLab

В результате проведенных тестов наилучший результат показала схема семантического сегментирования. Результаты тестирования трех архитектур представлены в таблице 1.

Таблица 1. Статистика обнаружения облаков для трех архитектур

	Общая точность	Вероятность обнаружения	Вероятность необнаружения	Вероятность ложного обнаружения	Индекс критического успеха
DeepLab	94	89	11	16	75,6
VGG-16	54,7	92,9	7,1	70,7	28,7
MLP	84,5	60	40	35,5	45

Библиографический список

1. Neural Networks in Deep Learning // www.analyticsvidhya.com (датаобращения: 21.02.2021).
2. Михал Сегал-Розенхаймера, Алан Ли, Камалика Дас, Вед Чираят Cloud detection algorithm for multi-modal satellite imagery using convolutional neural-networks // Remote Sensing of Environment. 2020. №237.

УДК 004.67; ГРНТИ 50.03.03

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ДЕКОММУТАЦИИ БЫСТРОМЕНЯЮЩИХСЯ ПАРАМЕТРОВ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Л.Л. Кузнецов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, г. Рязань, kuznleo@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы оценки поведения сложного технического объекта. Решается задача сокращения вычислительных затрат на обработку измерительной информации в системе декоммутации быстро меняющихся параметров.

Ключевые слова: сложные технические объекты (СТО), быстро меняющиеся параметры (БМП).

DATA PROCESSING IN SYSTEMS TO DECOMMUTE RAPIDLY CHANGING PARAMETERS IN COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

L.L. Kuznetsov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
Ryazan, Russian Federation, kuznleo@gmail.com*

Abstract. The article considers complex technical objects' behavior estimation matters. The way to reduce calculations on measuring data processing in systems that decommute rapidly changing parameters is shown.

Keywords: complex technical objects, rapidly changing parameters.

Оценка поведения сложного технического объекта (СТО) осуществляется посредством анализа состояния одной или нескольких размещенных на нем подсистем. При этом высокая стоимость изготовления и эксплуатации СТО обуславливает необходимость сокращения времени проведения подобного анализа и предоставления результатов инженеру-оператору в целях принятия решения. В ряде случаев, например, при проведении лётных испытаний, результаты анализа состояния подсистем СТО должны быть представлены инженеру-оператору в реальном времени.

Состояние подсистем СТО характеризуется изменением поведения различных параметров, которые укрупнённо можно разделить на две группы – быстро меняющиеся (например, параметры вибрации и акустического давления) и медленно меняющиеся (например, температура, напряжение на химическом источнике тока и т.д.). При этом для быстро меняющихся параметров (БМП) ввиду соответствующей физической природы необходимо обеспечение регистрации и обработки с большей частотой (в Гц), чем для медленно меняющихся. Поскольку обработка и анализ поведения параметров осуществляется с использованием современных электронно-вычислительных средств, то в целях уменьшения времени проведения анализа состояния подсистем СТО и предоставления результата инженеру-оператору, особую актуальность представляет задача оптимизации вычислительных затрат, необходимых для выполнения операций с быстро меняющимися параметрами.

На практике имеется система декоммутации БМП, в которой после принятия и обработки файла телеметрии производится визуализация (построение графиков) происходящих процессов. Телеметрический файл имеет объём порядка 1 Гбайта, обработка происходит в кодах, вольтах или физических величинах, в результате чего генерируется набор файлов, суммарный объём которых составляет примерно тот же 1 Гбайт. Пример создаваемых файлов приведён на рисунке 1.

Параметр 1.tp	1 296 КБ	Файл "ТР"
Параметр 2.tp	97 240 КБ	Файл "ТР"
Параметр 3.tp	1 632 КБ	Файл "ТР"
Параметр 4.tp	1 624 КБ	Файл "ТР"
Параметр 5.tp	97 224 КБ	Файл "ТР"
Параметр 6.tp	59 928 КБ	Файл "ТР"

Рис. 4. Генерируемые файлы

При загрузке этих файлов для визуализации программа не может обработать их целиком, поэтому для анализа приходится выбирать временные отрезки, которые составляют очень малую долю от длительности самого анализируемого процесса. Такая обработка неприемлема, поскольку интервал времени, на котором происходит изменение БМП, очень мал, и его поиск занимает большое количество времени.

Была поставлена задача оптимизировать работу существующей программы обработки так, чтобы конечные файлы не приходилось разбивать на части, временной интервал загружался целиком и процесс поиска БМП стал простым и быстрым.

Создаваемые файлы имеют расширение .tp, что означает время-параметр (time-parameter); в них чередуются значения времени измерения и значения параметра в этот момент времени. Запись в выходные файлы осуществляется с помощью массива данных, содержащего на чётных позициях значения времени, а на нечётных – параметра, оба типа double, занимающего 8 байт, что представлено на рисунке 2. Поскольку алгоритм работы программы изменять нежелательно, способ записи в файл путём формирования массива необходимо сохранить.

```

00000000: 9A 99 99 99 99 99 99 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000010: 46 B6 F3 FD D4 78 99 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000020: F2 D2 4D 62 10 58 99 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000030: 9E EF A7 C6 4B 37 99 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000040: 4A 0C 02 2B 87 16 99 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000050: F6 28 5C 8F C2 F5 98 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000060: A2 45 B6 F3 FD D4 98 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000070: 4E 62 10 58 39 B4 98 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000080: FA 7E 6A BC 74 93 98 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
00000090: A6 9B C4 20 B0 72 98 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
000000A0: 52 B8 1E 85 EB 51 98 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
000000B0: FE D4 78 E9 26 31 98 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
000000C0: AA F1 D2 4D 62 10 98 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
000000D0: 56 0E 2D B2 9D EF 97 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
000000E0: 02 2B 87 16 D9 CE 97 BF|00 00 00 00 00 00 00 00
    
```

Рис. 2. Исходное представление данных

Очевидным способом оптимизации использования памяти является изменение типа данных для хранения времени и параметра. Стоит отметить, что точность измерения времени на практике ограничивается миллисекундами, а значение параметра – 5-разрядным кодом, соответственно тип double является излишним в обоих случаях. Ближайший вещественный тип данных к double – float, занимающий 4 байта, обеспечивает точность 6-9 значащих цифр, что является достаточным для требуемых диапазонов времени, а 32 целочисленных значения параметра помещаются в однобайтный тип char. Поскольку обычные массивы не могут хранить данные разных типов, воспользуемся контейнерным типом данных среды разработки Qt Creator – QVector, в качестве элементов которого будем использовать структуру данных, содержащую float-значение времени и char-значение параметра. Тогда отображение данных в новом формате будет иметь вид, представленный на рисунке 3.

```

00000000: CD CC CC BC 00 A8 C6 CB|BC 00 83 C0 CA BC 00 5E
00000010: BA C9 BC 00 39 B4 C8 BC|00 14 AE C7 BC 00 F0 A7
00000020: C6 BC 00 CB A1 C5 BC 00|A6 9B C4 BC 00 81 95 C3
00000030: BC 00 5C 8F C2 BC 00 37|89 C1 BC 00 12 83 C0 BC
00000040: 00 EE 7C BF BC 00 C9 76|BE BC 00 A4 70 BD BC 00
00000050: 7F 6A BC BC 00 5A 64 BB|BC 00 35 5E BA BC 00 10
00000060: 58 B9 BC 00 EC 51 B8 BC|00 C7 4B B7 BC 00 A2 45
00000070: B6 BC 00 7D 3F B5 BC 00|58 39 B4 BC 00 33 33 B3
00000080: BC 00 0E 2D B2 BC 00 E9|26 B1 BC 00 C5 20 B0 BC
00000090: 00 A0 1A AF BC 00 7B 14|AE BC 00 56 0E AD BC 00
000000A0: 31 08 AC BC 00 0C 02 AB|BC 00 E7 FB A9 BC 00 C3
000000B0: F5 A8 BC 00 9E EF A7 BC|00 79 E9 A6 BC 00 54 E3
000000C0: A5 BC 00 2F DD A4 BC 00|0A D7 A3 BC 00 E5 D0 A2
000000D0: BC 00 C1 CA A1 BC 00 9C|C4 A0 BC 00 77 BE 9F BC
000000E0: 00 52 B8 9E BC 00 2D B2|9D BC 00 08 AC 9C BC 00

```

Рис. 5. Оптимизированное представление данных

Создаваемые файлы с оптимизированным хранением данных имеют меньший объём, чем первоначальные, и они представлены на рисунке 4.

Параметр 1.tp	413 КБ	Файл "TP"
Параметр 2.tp	30 395 КБ	Файл "TP"
Параметр 3.tp	510 КБ	Файл "TP"
Параметр 4.tp	508 КБ	Файл "TP"
Параметр 5.tp	30 390 КБ	Файл "TP"
Параметр 6.tp	18 730 КБ	Файл "TP"

Рис. 4. Генерируемые файлы с оптимизированными данными

Таким образом, результирующий объём генерируемых файлов в результате изменения формата хранения данных уменьшился почти на 70%, что позволяет на следующем этапе работы разработать графическое приложение, целиком загружающее выходные файлы без необходимости разбиения временного интервала на части для проведения анализа.

УДК 004.81; ГРНТИ 28.23.37

ИЗУЧЕНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.С. Борц

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, 89156238147@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются основные подходы к решению задач распознавания образов и рассматривается алгоритм совмещения изображений с применением инвариантных моментов.

Ключевые слова: распознавание образов, принцип сравнения с эталоном, инвариантные моментыHu.

STUDYING IMAGE RECOGNITION ALGORITHMS

A.S. Borts

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, 89156238147@mail.ru*

The summary. The paper discusses the main approaches to solving problems of pattern recognition and considers an algorithm for combining images using invariant moments.

Key words: pattern recognition, principle of comparison with a standard, invariant moments Hu.

Распознавание образов является одной из самых распространенных задач, выполняемых человеком на повседневной основе. Поэтому задача автоматического распознавания образов – одна из самых актуальных, начиная с анализа изображений, которые были получены дистанционно, идентификации человека, заканчивая диагностикой с помощью медицинских снимков.

Задача распознавания образов часто связана с понятием классификации, и решением проблемы отнесения объекта к какому-либо классу. Объекты одного класса должны иметь общие признаки и быть близки друг к другу по некоторым критериям. Следовательно, распознать образ объекта – это определить и указать к какому классу он относится. Исходя из этого, можно сказать, что образ — это описание объекта или процесса, позволяющее выделять его из окружающей среды и группировать с другими объектами или процессами для принятия необходимых решений.

Основные подходы к решению задачи распознавания образов

Любая система распознавания включает как процесс синтеза образов, то есть формирования описаний объектов и их классов, так и анализа образов. Выделяют три подхода к решению данной задачи:

1. Сравнение с эталоном;
2. Кластеризация;
3. Общности свойств.

Принцип сравнения с эталоном так же называют принципом перечисления. Он применяется, если для каждого класса можно сопоставить набор эталонных образов, тогда задача распознавания сводится к простому сопоставлению образов с эталонами на основе выбранной меры сходства.

Принцип кластеризации применяется, если признаки являются набором параметров без явно заданных взаимосвязей. В этом случае образ представляется n -мерным вектором в признаковом пространстве, а каждому классу сопоставляется множество векторов. Тогда каждому классу соответствует область признакового пространства, называемая кластером. В данном случае задача распознавания – это однозначное отнесение точки пространства к определенному классу.

Принцип общности свойств основывается на выявлении отличительных особенностей классов по конечным выборкам образов. Выявленные свойства хранятся в виде некоторых структур, функций или отношений. Процесс распознавания сводится к анализу образа по схеме, позволяющей выявить необходимые свойства образа, с последующим сопоставлением со свойствами классов.

Основные этапы распознавания текста на основе принципа сравнения с эталоном

Общий алгоритм системы распознавания образов состоит из следующих этапов:

1. Нормализация эталонных изображений – этап, на котором устраняются основные типы искажений эталонных изображений.
2. Выделение признаков – нахождение определенных метрик, выбранных в качестве мер сходства.
3. Нормализация текущего изображения – этап, на котором устраняются основные типы искажений текущего изображения.
4. Сегментация – процесс разделения общего изображения с текстом на отдельные посимвольные изображения.
5. Выделение признаков – нахождение определенных метрик, выбранных в качестве мер сходства.

6. Классификация – принятие решения о принадлежности текущего изображения определенному классу на основе сравнения метрик текущего и эталонных изображений.

Рассмотрение применения инвариантов для совмещения и распознавания изображений

Для решения задачи распознавания печатного текста оптимальным является применение принципа сравнения с эталоном. Одним из способов решения данной задачи является использование инвариантных моментов для совмещения и распознавания изображений.

К достоинствам использования инвариантов для описания изображения можно отнести то, что признаки не изменяются, если объект претерпевает следующие изменения:

1. Масштабирование;
2. Перемещение;
3. Поворот;
4. Зеркальное отражение;
5. Различные комбинации ранее перечисленных изменений.

Среди разнообразных алгоритмов выделения признаков изображения хорошие результаты позволяет получить метод моментных инвариантов Ну, основанный на выделении статистических закономерностей, описывающих изображение. Математической основой выделения инвариантных признаков является теория алгебраических инвариантов. Эта теория исследует класс алгебраических функций, не изменяющихся при определенных преобразованиях координат.

Сущность данного метода заключается в том, что в области изображения D , для которой вычисляются моменты, по формуле (1) можно найти двумерные моменты $(p + q)$ -го порядка совместной плотности вероятности $p(x, y)$.

$$m_{pq} = \iint_D x^p y^q f(x, y) dx dy, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Произведем замену совместной вероятности изображения $p(x, y)$ в выражении (1) на функцию яркости изображения $f(x, y)$. Согласно теореме единственности, при соблюдении условия, что $f(x, y)$ является кусочно-непрерывной функцией, которая имеет ненулевые значения лишь на ограниченной части плоскости $X-Y$, то существуют моменты всех порядков и последовательность моментов m_{pq} однозначно определяется функцией $f(x, y)$, а m_{pq} однозначно определяет функцию $f(x, y)$.

Для обеспечения инвариантности двумерных моментов к сдвигу произведем переход к центральным моментам, где инвариантность обеспечивается независимостью степенных произведений под знаком интеграла от сдвига.

Таким образом, для вычисления координаты центра области D применим функции:

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \text{ – координаты центра области } D.$$

Подставим полученные формулы в выражение (1) и получим формулу для нахождения моментов, инвариантных к сдвигу:

$$\mu_{pq} = \iint_D (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Обрабатывая дискретные изображения, можно записать следующую формулу для нахождения моментов инвариантных к сдвигу:

$$\sum_{x=1}^K \sum_{y=1}^L (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (3)$$

Для обеспечения инвариантности изображения относительно масштабирования выполним переход к нормализованным центральным моментам:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{p+q}^{\frac{p+q}{2}}}. \quad (4)$$

Для обеспечения инвариантности относительно поворота, необходимо из моментов второго и третьего порядков получить систему моментов Ну:

$$\begin{aligned} S_1 &= \eta_{20} + \eta_{02}, \\ S_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2, \\ S_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12}) + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2, \\ S_4 &= (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{03} + \eta_{21})^2, \\ S_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{03} + \eta_{21})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{03} + \eta_{21}) [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2], \\ S_6 &= (\eta_{20} - \eta_{02}) [(\eta_{30} + \eta_{12}) - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{21}), \\ S_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{03} + \eta_{21}) [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] + (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{21}) [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2]. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученная система моментов Ну позволяет получить значения функций S1 - S7 инвариантных к вращению, изменению изображения на зеркальное, а также к комбинации этих операций.

Таким образом, используя принцип сравнения с эталоном, необходимо сопоставить набор эталонных изображений с текущим изображением, на основе выбранного в качестве меры сходства вектора инвариантных признаков. Обозначим вектор инвариантных признаков эталонного изображения - $P_{ЭИ}$ и вектор, соответствующий области текущего изображения - $P_{ТИ}$.

Для нахождения меры сходства эталонного изображения, описываемого вектором признаков $P_{ЭИ}$, и соответствующей области текущего изображения, описываемого вектором признаков $P_{ТИ}$, может быть применена корреляционная функция следующего вида:

$$K(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^7 S_i \bar{S}_i(x, y)}{[\sum_{i=1}^7 S_i^2 \sum_{i=1}^7 \bar{S}_i^2(x, y)]^{\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

где i – изменяется от 1 до 7, а S_i – является i -м моментом вектора признаков $P_{ЭИ}$. $\bar{S}_i(x, y)$ – i -й момент соответствующей подобласти ТИ, описываемой вектором признаков $P_{ТИ}$ в положении (x, y) .

Таким образом, для решения задачи распознавания текста – рационально использовать принцип сравнения с эталонным изображением совместно с вектором значений инвари-

антных моментов Ну – в качестве меры сходства изображений. Это позволит добиться устойчивости результатов к сдвигам, повороту, зеркальному отражению и комбинации этих искажений для изображения. Так же, при решении задачи распознавания для печатных текстов, не имеет существенного влияния основной недостаток использования инвариантов – на изображениях с отсутствием явно выраженного однородного фона, инвариантные моменты Ну не дают хороших результатов при совмещении изображений.

Библиографический список

1. Л.Н.Чабан. Теория и алгоритмы распознавания образов. Учебное пособие. М.: МИИГАиК. 2004. – 70с.
2. С.И. Елесина, А.А. Логинов, М.Б. Никифоров Математическое и алгоритмическое обеспечение методов глобальной оптимизации при совмещении изображений: учеб. пособие - Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2014. 80 с.

УДК 621.397; ГРНТИ 49.40

ОРГАНИЗАЦИЯ БУФЕРОВ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ КАДРОВ

М.Ю. Звездочкин

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - ОКБ «Спектр»,
Российская Федерация, Рязань, pub@zvyozdochkin.ru

Аннотация. Решены вопросы обработки и передачи видеоинформации, организованной в виде циклических структур, в частности, проблема буферизации видеокадров. Рассмотрены методы буферизации видеопотока, оценены их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: видеосигнал, потоковое видео, буферизация видео.

IMPLEMENTATION OF SOFTWARE BUFFERS FOR VIDEO STREAMS INVARIABLE FRAME RATE SYSTEMS

M.Y. Zvezdochkin

AO "RKT "Progress" – OKB "Spectr",
Russia, Ryazan, pub@zvyozdochkin.ru

The summary. The paper discusses the problems of processing of videostreams given from periodic data structures, particularly, video buffering. Given some software buffering methods, their advantages and disadvantages.

Keywords: video signal, video streaming, video buffering.

Для передачи и приёма потоковой видеоинформации (ВИ) разработан ряд протоколов, например, RTSP/RTP. Однако в некоторых отраслях целесообразно применение специфических протоколов и контейнеров. В частности, в космической отрасли практикуется передача видеоинформации по телеметрическим каналам [1 - 2]. При этом видеопоток упорядочивается в циклические структуры с фиксированным периодом.

Циклические структуры не синхронизированы с видеопотоком, в одном цикле может содержаться несколько видеокадров от разных источников, в том числе неоконченных (границы видеокадров в общем случае не совпадают с границами цикла). Также подобные системы характеризуются применением переменной частоты кадров для повышения эффективности использования информационного канала, которая до недавнего времени редко применялась в видеосистемах [3].

Программно-аппаратный комплекс, обрабатывающий ВИ с описанными характеристиками, должен преобразовывать её в структуры известных форматов (в частности, UDP/MJPEG или RTSP/H.264) и транслировать потребителям. При этом стоит задача воссоздания достоверных временных интервалов между кадрами с учётом применения переменной

частоты кадров. Если эта задача не решена, декодированный видеопоток будет передаваться потребителю в виде «дёрганого», неравномерного по времени видеоряда.

Для передачи ВИ с сохранением временных интервалов применяется программная буферизация: видеокадры, декодируемые из циклической структуры, помещаются в буферы, организуемые программным обеспечением (ПО), и извлекаются из буферов перед отправкой ВИ потребителям.

Буферизация видеопотока – хорошо известный метод в передаче потоковой ВИ [4]. Буферизация характеризуется такими параметрами, как количество буферов, количество кадров в каждом буфере, стратегия извлечения кадров из буфера (циклический буфер, либо буфер, рассчитанный на определённое время), алгоритм расчёта межкадровых интервалов.

В данной статье в контексте работ [5 - 7] рассмотрены методы построения программного буфера ВИ, проанализированы достоинства и недостатки этих методов, сделаны рекомендации по их практическому применению.

Кольцевой кадровый буфер с разделением и без разделения по источникам

Кольцевой единый буфер кадров без разделения по источникам – простейший способ буферизации ВИ. Буфер организован в виде массива N_{fr} кадровых массивов $Fr_1 \dots Fr_N$. Каждый кадровый массив хранит один кадр ВИ.

Заполнение буфера происходит при получении циклов ВИ, из которых декодируются кадры. Извлечение кадров из буфера производится по таймеру. Интервал таймера пересчитывается для каждого следующего кадра на основании временных меток текущего и предыдущего кадра:

$$\Delta t = t_{cur} - t_{prev} . \quad (1)$$

После того, как заполнен последний кадровый массив, последующие кадры будут записаны в массивы с наименьшими номерами.

Метод является универсальным и не привязан к цикличности входных структур данных. Вместе с тем он чрезвычайно уязвим к искажениям временных меток. Одна искажённая временная метка может стать причиной длительного перерыва передачи или полного её прекращения. Другой, менее очевидный, но также весомый недостаток - накопление погрешности расчёта временных задержек: интервал между кадрами вычисляется с конечной точностью. Указанное накопление может привести либо к запаздыванию обработки (в наихудшем случае - переполнению буфера и потере кадров), либо к опустошению буфера, что эквивалентно отключению буферизации.

Усовершенствованный вариант данного метода – выделение отдельных буферов для каждой видеокамеры. Для каждого кадра, извлечённого из цикла, ПО идентифицирует видеокамеру и копирует кадр в соответствующий буфер (рис. 1):

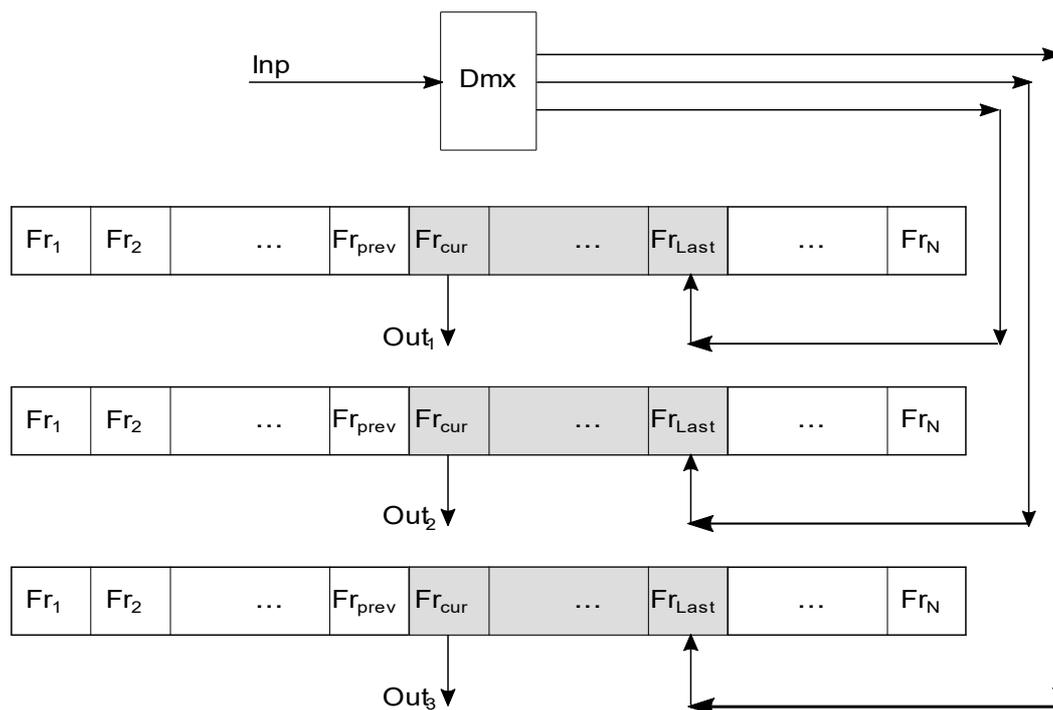


Рис. 1. Кольцевой буфер с разделением по источникам

Значение интервала таймера по каждой камере вычисляется отдельно относительно предыдущего извлечённого кадра по этой же камере.

Разделение буферов по источникам снижает риск прекращения передачи из-за единичной ошибки. Также упрощается расчёт задержек, поскольку обеспечивается положительность временных интервалов между соседними кадрами.

С другой стороны, накопление погрешности расчёта временных интервалов, о котором говорилось при рассмотрении буфера без разделения по источникам, не только сохраняется, но и влечёт за собой визуально заметную рассинхронизацию ВИ от разных камер. Второй недостаток варианта без разделения по источникам - влияние существенного искажения одной временной метки – при разделении по источникам смягчается, но не устраняется полностью: прекращение передачи может произойти не по всем камерам, а только по одной, что также неприемлемо.

Расчёт интервалов с привязкой к времени начала приёма

Для устранения накопления погрешности расчёта временных интервалов – основного недостатка кольцевого буфера – может применяться ряд методов. Один из них - изменение метода вычисления интервалов.

В момент приёма первого кадра ВИ фиксируется текущее системное время T_s и сопоставляется с временем метки первого полученного кадра T_v :

$$\Delta T_{ses} = T_s - T_v . \quad (2)$$

Для каждого декодированного кадра также фиксируется значение T_{sc} . Далее временной интервал определяется как

$$\Delta t = t_{cur} + \Delta T_{ses} - T_{sc} \quad (3)$$

В итоге время отправки очередного кадра определяется только системным временем и не зависит от рассчитанного времени предыдущего кадра.

Привязка к времени начала приёма позволяет решить проблему накопления погрешности расчёта временных интервалов, но не решает проблему неточности системного таймера. Также метод обоснован из неявного предположения, что расхождение приращения времени на передающих и приёмных сторонах невелико. При исправных технических средствах приёмной и передающей стороны это условие соблюдается. Оно может быть нарушено при проверке системы обработки ВИ посредством программных имитаторов. Соответственно, программный имитатор должен применять таймер высокой точности.

Общетехнические методы

Уменьшение погрешности расчёта временных интервалов также может быть достигнуто применением операционных систем реального времени (ОСРВ). ОСРВ проектируются таким образом, чтобы обеспечить гарантированное время отклика при обработке событий.

Применение ОСРВ позволяет дать наилучшие результаты по достижению заявленных временных характеристик. Однако ситуации с заведомо искажёнными временными интервалами по-прежнему необходимо обрабатывать вручную.

Помимо этого, преимущества ОСРВ могут быть использованы только при использовании инструментария и библиотек, специфичных для конкретной ОСРВ. Это означает плохую переносимость программного кода. Трудоёмкость переноса на другую ОСРВ приближается к разработке с нуля.

Ещё один общетехнический метод уменьшения погрешности состоит в том, чтобы не отказываться от ОС общего назначения, но применять таймер высокой точности, который присутствует на всех современных ПК. К сожалению, программный интерфейс для работы с таймером высокой точности различен в разных ОС. Соответственно, недостатки этого метода такие же, как при использовании ОСРВ, хоть и в меньшей степени (доля платформозависимого кода меньше).

Адаптивный метод с внесением поправок

До сих пор мы определяли временные интервалы детерминировано, исходя из временных меток декодированной ВИ. Однако можно предложить и адаптивные методы. Рассмотрим способ, основанный на внесении отрицательной обратной связи в работу программного буфера.

При данном способе контролируется степень заполнения буфера, определяемая как

$$R_b = \frac{N_{frLast} - N_{frCur} + 1}{N_{fr}}, \quad (4)$$

т.е. как отношение количества кадров, помещённых в буфер в настоящий момент, к общей ёмкости буфера.

Буфер может находиться в трёх состояниях, определяемых четырьмя пороговыми значениями:

– состояние нормальной передачи. Интервалы вычисляются в соответствии с (1). Если заполненность буфера превысила некоторое пороговое значение R_{aon} , буфер переходит в состояние ускорения выборки (см. ниже), если опустилась ниже значения R_{don} – буфер переходит в состояние замедления выборки;

– состояние ускорения выборки. Интервал передачи кадров понижается. Если заполненность буфера опустилась ниже значения R_{aoff} , буфер возвращается в состояние нормальной передачи;

– состояние замедления выборки. Интервал передачи кадров понижается. Если заполненность буфера превысила значение R_{aoff} , буфер возвращается в состояние нормальной передачи.

Перечисленные состояния описываются графом (Рис. 2):

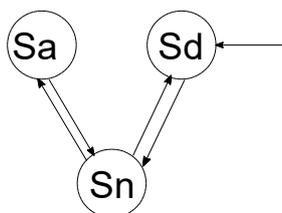


Рис. 1. Состояния буфера при внесении поправок

Область применения метода внесения поправок – коррекция погрешностей таймера. Заведомо искажённые временные метки должны корректироваться другими методами. Для работоспособности метода необходимо, чтобы временные метки кадров соответствовали средней частоте кадров на входе системы (это условие может быть нарушено, если на вход подаётся воспроизводимая ВИ, записанная ранее).

Буфер, привязанный к циклам входной информации

Поскольку входная ВИ организована в циклы, период которых известен, буферизация ВИ может быть привязана к моментам приёма циклов. Это позволяет отказаться от кольцевого буфера. Вместо него создаётся сокращённый буфер для кадров в пределах одного или нескольких циклов.

Простейшая реализация такого подхода – буфер, рассчитанный на один цикл входной ВИ. Размер каждого буфера N_{bc} должен не менее, чем на 1, превышать максимальное количество целых кадров, которые могут быть переданы в цикле.

По поступлении цикла из него извлекаются кадры и помещаются в буфер. В том числе в буфер помещается граничный кадр, т.е. кадр, начало которого было принято в предыдущем цикле (если есть). Для каждого буфера рассчитывается временной интервал:

$$\Delta t = t_{cur} - t_{cycle} + \Delta t_b . \quad (5)$$

Здесь t_{cycle} – системное время, зафиксированное на момент получения цикла ВИ, Δt_b – задержка, вносимая с целью корректной передачи граничного кадра.

Каждый кадр, помещённый в буфер, извлекается и отсылается в выходной видеопоток по отдельному таймеру однократного срабатывания.

Недостаток этой реализации состоит в том, что декодирование входного потока занимает ненулевое время, особенно, если цикл ВИ восстанавливается из помехоустойчивого кода [8 -9]. Кроме того, граничный кадр имеет более раннее время, чем начало цикла. Поэтому отсылка последних кадров происходит уже после прихода следующего цикла, что может породить конфликт данных в буфере.

Указанная проблема может быть решена организацией двух буферов, каждый размером N_{bc} (требование к значению N_{bc} то же, что и ранее). Первый буфер – приёмный, ПО копирует в этот буфер декодируемые кадры. Второй буфер – передающий, из него кадры из-

влекаются по таймеру. В момент начала обработки следующего цикла приёмному буферу присваивается статус передающего, в роли приёмного выступает второй буфер.

Реализация с двумя буферами решает проблему конфликта данных. Однако остаётся проблема искажения временных интервалов ввиду ненулевого времени декодирования. Поэтому интервалы для кадров от начала цикла должны рассчитываться с поправкой на время декодирования очередного кадра.

Описанный метод кардинально решает проблему синхронизации потоков входной и выходной ВИ, а также проблему взаимной синхронизации выходных потоков. Однако он применим только если для разрабатываемой системы приемлемо внесение задержки передачи ВИ порядка 1-2 циклов.

Выводы

Исследование показало, что привязка буферизации ВИ к циклам входной информации имеет наибольшую надежность из всех рассмотренных в работе методов.

Доказано, что другиеприменяемые на практике методы (а также их комбинации) могут быть рекомендованы для пересылки ВИ, которая уже была декодирована из циклических структур на предыдущих узлах передачи данных, поскольку в этом случае информация о привязке ВИ к циклам отсутствует.

Библиографический список

1. Климов Д. И., Мамедов Т. Т., Губайдуллин И. Р. Тенденции развития видеотелеметрических систем для измерения температуры термонагруженных областей средств выведения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020, т. 7, №4. С. 90-96.
2. Бортовая система видеоконтроля для ракет-носителей и разгонных блоков БСВК // Сайт ООО «ИРЗ». <https://www.irz.ru/products/11/500.htm> (Дата обращения 10.03.2021).
3. Yu Yuan, D. Feng, YuzhuoZhong Fast adaptive variable frame-rate coding // 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. VTC 2004-Spring (IEEE Cat. No.04CH37514). Milan, Italy, 17-19 May 2004.
4. Гребёнкина Т. Ю. Сегментация рынка программного обеспечения для потоковой передачи видеоданных // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов международной научно-практической конференции. 2019, №1-2. С. 185-188.
5. Кащеев А.А., Миронов В.В. Повышение точности оценки длительности сеансов связи космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с наземными пунктами приема информации для надежных высокоскоростных радиолиний // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2108. Т. 15. №6. С. 235-244.
6. Звездочкин М.Ю., Миронов В.В. Обработка потоков информации с применением кодов Рида-Соломона // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020: сб. тр. III междуна. науч.-техн. форума: в 10 т. – Рязань: РГРТУ, 2020. – Т. 3 – С. 27 – 31.
7. Миронов В.В., Труханов С.В. Применение математического аппарата нечеткой логики при тематической обработке данных космической гиперспектральной съемки // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020: сб. тр. III междуна. науч.-техн. форума: в 10 т. – Рязань: РГРТУ, 2020. – Т. 5 – С. 199 – 204.
8. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – Москва: Мир, 1986.
9. Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. М. : Горячая Линия - Телеком, 2004.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О IV МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2021».....	3
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ».....	5
Секция «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ».....	5
Гужвенко Е., Тумаков Н., Гужвенко В. Статистическая обработка результатов обучения армейской тактической стрельбе.....	5
Бухенский К.В., Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Анисимов К.В. Промежуточные результаты исследований по проекту «Трансформации нечеткости в системах нечеткого вывода».....	11
Федосова Е.Б. Исторический аспект создания моделей технических систем на основе булевой алгебры логики.....	18
Лискина Е.Ю. Условия существования устойчивого равновесия в системе «хищник–жертва» с конкуренцией за ресурсы в популяции жертв и нелинейной зависимостью плодовитости хищников от их численности.....	21
Прохорцева А.С. Фазовые траектории демографических моделей А.В. Подлазова.....	26
Давыдова Е.И. Исследование скрытых временных эффектов, влияющих на состояние уровней рабочей силы регионов России.....	31
Гизамова А.Р., Ганеев Ф.А. Моделирование канала преобразования ионно-меточного измерителя воздушной скорости.....	35
Дмитриев О.С., Живенкова А.А., Барсуков А.А. Устойчивый алгоритм для определения теплофизических характеристик.....	38
Абрамов В.В. Бифуркация Андронова – Хопфа в одной системе второго порядка.....	44
Земенков А.В. Периодическое решение линейной системы дифференциальных уравнений с малым параметром.....	50
Чернов В.Г. Нечеткие модели исследования операций.....	53
Карасева Н.И., Дмитриева М.Н., Акимова И.А, Ермошина Л.Н., Костюкова Е.В. Анализ содержания бора в подземных водоисточниках на территории Рязанской области.....	56

Полосин А.Н., Артюхов А.С. Математическая модель процесса соэкструзии полимеров при изготовлении рукавной пленки по методу Пратта.....	62
Бабаев Д.Р., Ларинский С.А. Моделирование индекса Хирша-Миронова цитирования статей.....	68
Девяткова Д.А. Обзор проблемы управляемости и наблюдаемости в приложении к анализу движения малого космического аппарата.....	73
Ермилов В.В. Алгоритм и программная реализация распознавания тождеств многообразий алгебр.....	76
Киселев Н.В. Вклад российских математиков в решение проблем Гильберта и некоторые современные вопросы.....	82
Прибылов П.Д. Обзор проблемы «Обработка данных и гарантированное оценивание параметров космических систем».....	87
Секция «ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ».....	92
Соловьева И.А., Соловьев Д.С. Использование методологии функционального моделирования IDEF0 для формализации процесса планирования выпуска готовой продукции.....	92
Кузнецов Н.А. Использование модели машинного обучения для диагностики пневмонии.....	95
Обухов А.Д., Дедов Д.Л., Суркова Е.О., Вострикова В.В., Теселкин Д.В. Алгоритм сбора информации о траектории движения человека на управляемой беговой дорожке.....	99
Ловкин Д.В., Корепанов С.Е. Алгоритм автоматического слежения за объектом с использованием метода Лукаса – Канаде.....	103
Белов В.В., Лопатин А.К. Подход к восстановлению цепочек алгоритмов с частично фиксированной функциональной структурой.....	108
Овчинников А.Ю., Корепанов С.Е. Сравнение алгоритмов слежения, основанных на корреляционных методах в сложных условиях наблюдения.....	111
Гадеев Д.В. Выбор оптимальных алгоритмов машинного обучения в исследовании заболеваний кожи человека.....	117
А.И. Бобиков, Т.С. Бубнова Робастное управление неустойчивым объектом с запаздыванием с использованием предиктора Смита и иммунного ПИД-регулятора.....	119

Захватов В.И. Алгоритм цифрового управления двойным интегратором.....	126
Алланазарова Ю.Р., Фельдман А.Б. Слежение за объектами на сложном неоднородном фоне вблизи похожих объектов.....	130
Тишковец Е.В. Проектирование сверточной нейронной сети для решения задачи суперразрешения изображений.....	134
Жаворонков Я.Д. Распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей.....	138
Кузнецов Л.Л. Обработка информации в системах декоммутации быстроменяющихся параметров в сложных технических объектах.....	143
Борц А.С. Изучение алгоритмов распознавания изображений.....	145
Звездочкин М.Ю. Организация буферов видеоинформации в системах с переменной частотой кадров.....	149

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Научное издание

В 10 томах

Том 5

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.21. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Редакционно-издательский центр РГРТУ,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.
Отпечатано в типографии Book Jet,
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, д. 18